



کالیبراسیون پارامترهای مدل آسیب گیسمو جهت پیش‌بینی رفتار پلاستیک و شکست نرم آلومینیوم ۲۰۲۴

حمید رخی^۱، مجتبی ضیاءشمامی^{۲*}، سید محمد وهاب موسوی^۲، توحید میرزابابایی مستوفی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

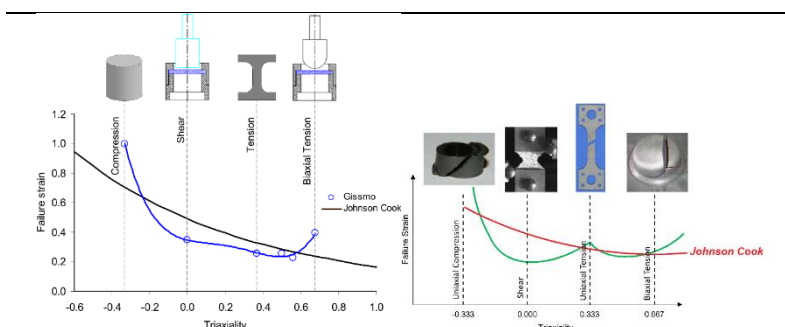
^۲ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

برجسته‌ها

- کالیبراسیون ضرایب ثابت مدل آسیب گیسمو برای ماده فلزی آلومینیوم ۲۰۲۴
- پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار ماده فلزی در حالت‌های تنش مختلف در برخوردهای شدید و تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۳۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

ارائه برخط: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

*نویسنده مسئول:

mziash@ihu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

شبیه‌سازی عددی

رفتار پلاستیک

شکست نرم

مدل آسیب گیسمو

حالت تنش

چکیده

امروزه به‌منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی نقاط شکست قطعات در فرایندهای تولید و همچنین بررسی خسارت وارده به قطعات پیچیده در طی برخورد، به‌طور گسترده‌ای از مدل‌های آسیب استفاده می‌شود. هدف از تحقیق حاضر، تعیین ثابت‌های مدل مادی و مدل آسیب گیسمو برای آلومینیوم ۲۰۲۴ می‌باشد. بدین منظور از داده‌های آزمون‌های تجربی انجام‌گرفته روی شش نمونه مورد آزمایش (نمونه‌های استاندارد کشش و فشار تک‌محوره، نمونه‌های شیاردار و تست پانچ) استفاده شد. سپس با تخمین مقدار کرنش شکست در هر نمونه از روی داده‌های تجربی، وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش در مدل آسیب گیسمو، تعیین گردید. در ادامه، از مدل آسیب پیشنهادی برای شبیه‌سازی آزمون‌های تجربی انجام‌گرفته در نرم‌افزار ال‌اس‌داینا استفاده شد. دقت نتایج عددی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که می‌توان از روش ارائه‌شده در تحقیق حاضر برای بیان رفتار شکست فلزات دیگر در حالت‌های تنش مختلف استفاده کرد.

۱- مقدمه

فرایندهای شکل دادن فلزات مانند کشش عمیق، پولک زنی، برشکاری و خم کاری ورق های فلزی همراه با تغییر شکل های پلاستیک قابل توجه می باشند که ممکن است به نقطه شکست فلز ختم شود. لذا باید در طی فرایند تولید از شکست اجتناب شود. همچنین به منظور تخمین مقدار صدمه وارد شده به سرنشینان خودرو در طی تصادف های رانندگی، نیاز به فهم دقیق تغییر شکل های شدید بدنه خودرو که شامل لهیدگی و شکست قطعات بدنه و موتور است، می باشد. جهت شبیه سازی پدیده های مرتبط به تغییر شکل های شدید فلزات ناشی از بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی نه تنها رفتار تنش- کرنش پلاستیک ماده، بلکه رفتار شکست ماده نیز باید تعیین گردد. رفتار شکست ماده به عواملی مانند رفتار پلاستیک ماده بعد از نقطه تسلیم، حالت تنش، شرایط و سرعت بارگذاری و دمای محیط بستگی دارد. شکست در فلزات را می توان به دو دسته کلی طبقه بندی کرد: شکست نرم و شکست ترد. در شکست نرم، مقدار قابل توجهی تغییر شکل پلاستیک قبل از مرحله پیشرفت ترک و در حین آن مشاهده می شود. در حالی که در شکست ترد، پیشرفت ترک بسیار سریع اتفاق می افتد و میزان تغییر شکل پلاستیک بسیار ناچیز می باشد.

برای توصیف رفتار شکست نرم مواد در نرم افزار تجاری اجزاء محدود ال ای اس داینا از مدل های آسیب متفاوتی می توان استفاده کرد که از میان آنها می توان به مدل های آسیب کاکرافت و لاتهام [۱]، گرسون- تی و و گارد- نیدلمن [۲]، جانسون- کوک [۳]، جانسون- کوک جدولی [۴] و گیسمو [۵] اشاره کرد. در مدل های آسیب کاکرافت و لاتهام، گرسون- تی و و گارد- نیدلمن و جانسون- کوک، رفتار شکست ماده بر اساس مشاهده های تجربی تعریف می شود که شامل توابع ریاضی با عدم پیش زمینه فیزیکی برای تطبیق با مشاهدات تجربی می باشد. در حالی که در مدل های آسیب جانسون- کوک جدولی و گیسمو، مشاهدات تجربی رفتار شکست ماده به طور مستقیم در نظر گرفته شده و از توابع ریاضی برای بیان آن استفاده نمی شود. لذا این دو مدل اخیر با درصد موفقیت بالاتری همراه می باشند [۵]. در مدل های

آسیب کاکرافت و لاتهام، گرسون- تی و و گارد- نیدلمن و جانسون- کوک، وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش، نرخ کرنش و نرم شوندگی ماده که در اثر افزایش دمای آدیاباتیک ناشی از کار پلاستیک رخ می دهد در نظر گرفته می شود. در حالی که در مدل های آسیب جدولی جانسون- کوک و گیسمو علاوه بر موارد ذکر شده، وابستگی کرنش پلاستیک شکست به زاویه لود و اندازه المان هم در نظر گرفته می شود [۵]. در تحقیق انجام شده توسط بیوک [۴]، رفتار شکست آلومینیوم ۲۰۲۴ با استفاده از مدل آسیب جانسون- کوک جدولی تعیین گردید. در این پروسه از آزمون های کشش روی نمونه های استاندارد و نمونه های شیاردار با شعاع های شیار مختلف در شرایط کرنش و تنش صفحه ای تحت نرخ کرنش ها و دماهای مختلف استفاده شد. اعتبار سنجی پارامترهای کالیبره شده این مدل آسیب، با داده های تست بالستیک انجام شد. در پژوهش انجام شده توسط آندراده و همکاران [۵]، چگونگی بیان رفتار شکست فولاد DP800 با استفاده از مدل گیسمو با انجام آزمون کشش تک محوره روی نمونه های صاف و شیاردار با شعاع های مختلف در شرایط تنش صفحه ای و همچنین تست پانچ در دمای محیط و شرایط استاتیکی شرح داده شد. ثابت های به دست آمده با شبیه سازی آزمایش بارگذاری استاتیکی روی ستون مرکزی یک خودرو اعتبار سنجی شد. در تحقیق انجام شده توسط پوپلاوسکی و همکاران [۶]، ثابت های مدل مادی و مدل آسیب گیسمو برای فولاد زرهی Armox 500T تعیین شد. آنها از آزمایش کشش تک محوره با نمونه های استاندارد و نمونه های شیاردار با شعاع های شیار مختلف در شرایط کرنش و تنش صفحه ای استفاده کردند. آزمایش ها در دماها و نرخ کرنش های متفاوت انجام شد. اعتبار سنجی مدل کالیبره شده با شبیه سازی تست نفوذ پرتابه صلب در زره انجام شد.

ژیانو و هو [۷-۹] با استفاده از مدل آسیب گیسمو، رفتار شکست آلومینیوم ۷۰۰۳ را تعیین کردند. آنها از آزمایش کشش تک محوره با نمونه های استاندارد و نمونه های شیاردار با شعاع های شیار مختلف در شرایط تنش صفحه ای و همچنین تست پانچ استفاده کردند. مدل آسیب کالیبره شده

شبیه‌سازی آزمون‌های تجربی انجام‌گرفته در نرم‌افزار ال‌اس‌داینا استفاده شد.

۲- مدل آسیب گیسمو

مطالعات انجام‌گرفته نشان می‌دهد که حد شکست برای یک ماده ثابت نبوده و وابسته به حالت تنش آن ماده می‌باشد [۳]. به بیان دیگر، مقدار کرنش پلاستیک شکست برای یک ماده مفروض در حالت بارگذاری کششی تک‌محوره با حالت بارگذاری کششی دوماحوره، برشی و فشاری یکسان نبوده بلکه می‌تواند متفاوت باشد. درحالی‌که در مدل فون-مایز، کرنش پلاستیک شکست برای همه حالت‌های بارگذاری، یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود.

جانسون و کوک برای اولین بار وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش ماده را به صورت رابطه زیر بیان کردند [۳]:

$$\varepsilon_p^f = (D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*) \quad (1)$$

در رابطه بالا D_1 ، D_2 و D_3 پارامترهایی می‌باشند که از تست تجربی قابل محاسبه خواهند بود، σ^* حالت تنش و ε_f کرنش پلاستیک شکست می‌باشد. حالت تنش که اصطلاحاً سه‌محوری نامیده می‌شود، به صورت زیر بیان می‌شود [۳]:

$$\sigma^* = \frac{-P}{\sigma_{eff}} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eff}} \quad (2)$$

در رابطه بالا، σ_m تنش میانگین و σ_{eff} تنش فون-مایز می‌باشد. با توجه به رابطه بالا، مقدار سه‌محوری برای حالت‌های کشش دوماحوره، کشش تک‌محوره، برش و فشار به ترتیب برابر با $-\frac{2}{3}$ ، $-\frac{1}{3}$ ، 0.0 و $\frac{1}{3}+$ خواهد بود.

با این وجود، مطالعات بیشتر نشان داد که وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش ماده برای بسیاری از فلزات، کاملاً غیرخطی بوده و قابل بیان با رابطه (۱) نخواهد بود [۱۳]. به همین خاطر، مدل شکست گیسمو بر پایه مفهوم وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش ماده توسعه یافت که در آن از توابع ریاضی برای بیان وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش ماده استفاده نمی‌شود، بلکه مشاهدات تجربی رفتار شکست ماده به طور مستقیم در نظر گرفته می‌شود [۵]. مفهوم وابستگی

با شبیه‌سازی تست خمش سه‌نقطه‌ای برای چند حالت اعتبار سنجی شد.

چن و همکاران [۱۰] برای تخمین رفتار شکست فولادهای استحکام بالای نسل سوم، از مدل آسیب گیسمو استفاده کردند. برای تعیین وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش، از نتایج آزمایش‌های برش، کشش تک‌محوره و دو جهته استفاده شد. همچنین در تحقیق انجام‌شده توسط ایشان، وابستگی کرنش پلاستیک شکست به اندازه المان مدل المان محدود بررسی شد. اعتبار سنجی مدل کالیبره شده با شبیه‌سازی تست خمش سه‌نقطه‌ای انجام گرفت.

گی و همکاران [۱۱] به منظور تخمین رفتار صفحات نازک جاذب انرژی ساخته‌شده از آلیاژهای آلومینیوم ریخته‌گری شده در برخورد، از مدل آسیب گیسمو برای تخمین رفتار شکست استفاده کردند. در اینجا از نتایج آزمایش‌های برش، کشش تک‌محوره و نمونه‌های شیاردار برای کالیبراسیون مدل آسیب گیسمو استفاده شد. همچنین وابستگی نتایج به اندازه المان مدل المان محدود هم بررسی شد.

ژو و همکاران [۱۲] از مدل آسیب گیسمو برای بیان رفتار فولاد SUS301L-MT استفاده کردند. از نتایج آزمایش‌های برش، کشش تک‌محوره و نمونه‌های شیاردار در حالت تنش صفحه‌ای برای تخمین وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش استفاده شد.

اگرچه رویکرد مقالات اخیر محققان، استفاده از مدل‌های آسیب مانند گیسمو و جانسون-کوک جدولی برای بیان رفتار شکست فلزات می‌باشد ولی تاکنون روشی قاعده‌مندی برای استفاده از مدل آسیب گیسمو که به سادگی قابل استفاده برای طیف وسیعی از فلزات باشد، ارائه نشده است. در این تحقیق از داده‌های ارائه‌شده برای آلومینیوم ۲۰۲۴ برای تعیین ثابت‌های مدل آسیب گیسمو استفاده شده است [۱۳]. بدین منظور از داده‌های آزمون‌های تجربی انجام‌گرفته روی شش نمونه مورد آزمایش (نمونه‌های استاندارد کشش و فشار تک‌محوره، نمونه‌های شیاردار و تست پانچ) استفاده شد. سپس با تخمین مقدار کرنش شکست در هر نمونه از روی داده‌های تجربی، وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش در مدل آسیب گیسمو، تعیین گردید. در ادامه از این مدل آسیب برای

کالیبره شده آسیب گیسمو در نرم افزار ال اس داینا شبیه سازی شد و نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی ارائه شده توسط سیت [۱۳] (نمودار نیرو-جابجایی) مقایسه گردید. ماده مورد آزمایش در تست تجربی انجام شده، آلومینیوم سری ۲۰۲۴ می باشد. شش نمونه مورد آزمایش شامل نمونه های استاندارد کشش و فشار تک محوره، نمونه های شیاردار و تست پانچ (کشش دو محوره و برش) می باشند. ابعاد نمونه های تجربی به همراه حالت تنش متناظرشان در شکل ۲، نشان داده شده است. در این شکل واحدها بر حسب میلی متر می باشند. ضخامت نمونه های حالت تنش صفحه ای (نمونه استاندارد کشش تک محوره و نمونه های شیاردار)، ۰/۷۶۲ میلی متر می باشد. نمونه استاندارد فشار تک محوره به صورت یک استوانه با نسبت طول به قطر یک انتخاب شده است. قطر این استوانه، ۳/۰۴۸ میلی متر می باشد [۱۳].

۳-۱- تعیین منحنی تنش- کرنش پلاستیک حقیقی

قبل از تخمین وابستگی کرنش پلاستیک شکست یک ماده به حالت تنش، ابتدا باید منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی برای آن ماده با استفاده از داده های تست کشش بر روی یک نمونه استاندارد تعیین شود.

در این تحقیق، از روش پیشنهاد شده توسط سازمان هوانوردی فدرال برای تعیین منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی یک ماده مفروض، استفاده شده است [۴]. مقادیر کرنش و تنش مهندسی یک نمونه استاندارد با استفاده از روابط زیر محاسبه می شوند [۴]:

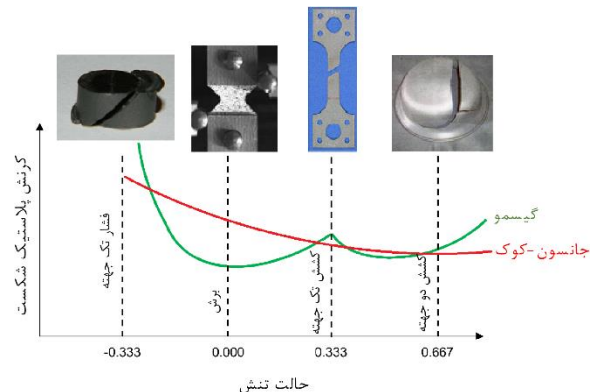
$$\varepsilon_0 = \frac{L - L_0}{L} \quad (4)$$

$$\sigma_0 = \frac{F}{A} \quad (5)$$

در روابط بالا، ε_0 کرنش مهندسی، σ_0 تنش مهندسی، L_0 طول اولیه گیج، F مقدار نیرو و A مساحت سطح مقطع نمونه می باشد. با استفاده از مقادیر به دست آمده، تنش و کرنش حقیقی به صورت زیر محاسبه خواهند شد [۴]:

$$\sigma = \sigma_0(1 + \varepsilon_0) \quad (6)$$

کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش ماده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): مفهوم وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش [۳ و ۵].

در مدل شکست گیسمو، کرنش پلاستیک شکست وابسته به حالت تنش، نرخ کرنش و اندازه المان می باشد. این مدل شکست، به صورت ریاضی با رابطه زیر بیان می شود [۵]:

$$\varepsilon_p^f = f(\sigma^*)g(\dot{\varepsilon})i(l) \quad (3)$$

در رابطه بالا، ε_p^f کرنش پلاستیک شکست، $f(\sigma^*)$ تابع وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش ماده، $g(\dot{\varepsilon})$ تابع وابستگی کرنش پلاستیک شکست به نرخ کرنش و $i(l)$ تابع وابستگی کرنش پلاستیک شکست به اندازه المان می باشد. هر کدام از این توابع، داده های حاصل از نتایج آزمایشگاهی می باشند. برای تعیین ثابت های مدل آسیب گیسمو باید مقدار کرنش پلاستیک شکست برای حالت های تنش مختلف معلوم باشد تا بتوان منحنی کرنش شکست بر حسب حالت تنش ماده را تخمین زد. از آنجاکه برای تعیین منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی از نمونه استاندارد تست کشش استفاده می شود، تنها نیاز به داشتن حداقل نتایج سه تست دیگر با حالت های تنش متفاوت (کشش دو محوره، برش و فشار) خواهد بود.

۳- شبیه سازی اجزاء محدود

در این تحقیق از نرم افزار ال اس داینا برای تعیین ثابت های مدل آسیب گیسمو و میزان دقت این مدل در پیش بینی رفتار شکست ماده استفاده شد. آزمون های تجربی انجام گرفته روی شش نمونه مورد آزمایش با استفاده از مدل

این نقطه، منحنی نیرو-جابجایی به صورت افقی در خواهد آمد (شکل ۳).

ادامه منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی را بایستی با روش سعی و خطا تقریب زد. به این صورت که ادامه منحنی بعد از نقطه گلوپی شدن با چند منحنی دیگر، تقریب زده شده و شبیه سازی تست کشش به صورت شبه استاتیکی با منحنی های مفروض انجام می شود و از خروجی شبیه سازی، منحنی نیرو-جابجایی استخراج می شود. آن منحنی تقریبی که بتواند بهتر منحنی نیرو-جابجایی را پیش بینی کند، به عنوان ادامه منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی بعد از نقطه گلوپی شدن، انتخاب می شود [۴]. منحنی های تقریبی بعد از نقطه گلوپی شدن، به صورت زیر تقریب زده می شوند [۴-۵]:

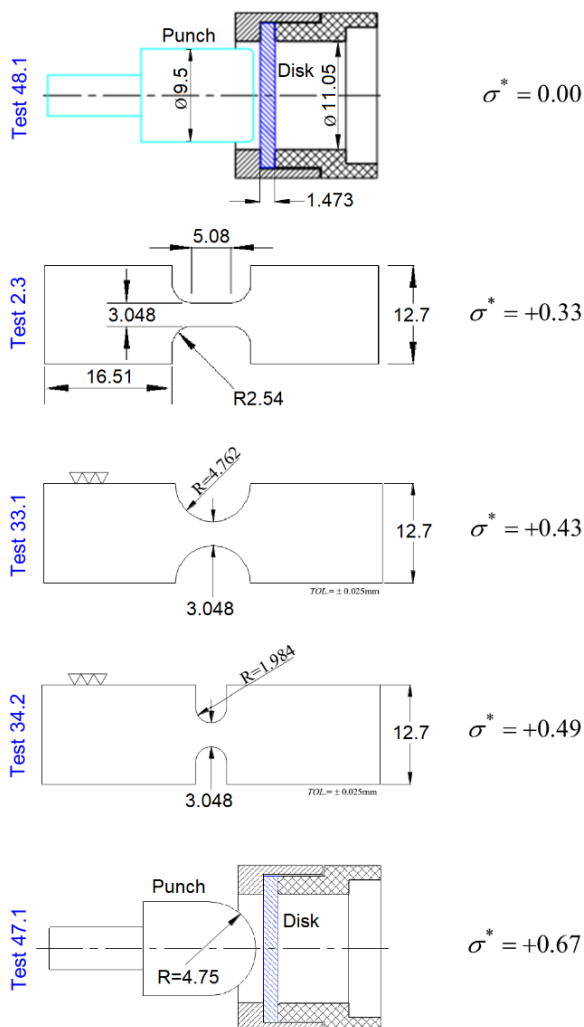
$$\sigma = K(\varepsilon_e + \varepsilon_p)^n \quad (9)$$

$$K = A(n)^{-n} \quad (10)$$

$$\varepsilon_e = n - B \quad (11)$$

در روابط بالا، σ تنش بعد از نقطه گلوپی شدن، A تنش حقیقی در نقطه گلوپی شدن، B کرنش پلاستیک حقیقی در نقطه گلوپی شدن و n عددی بین ۰ تا ۱ در نظر گرفته می شود.

ابتدا منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی از نمونه استاندارد تست کشش (نمونه ۲-۳ نشان داده شده در شکل ۲) استخراج شد. تا نقطه گلوپی شدن، مقادیر تنش-کرنش پلاستیک حقیقی با استفاده از روابط (۴) تا (۸) محاسبه شد. در حالی که ادامه منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی بعد از نقطه گلوپی شدن با روش سعی و خطا تقریب زده شد. در این قسمت شبیه سازی تست کشش به صورت شبه استاتیکی با استفاده از حلگر غیرصریح نرم افزار برای چند منحنی تقریب زده شده بعد از نقطه گلوپی شدن انجام شد و از خروجی شبیه سازی، منحنی نیرو-جابجایی استخراج شد. داده های محاسبه شده مربوط به منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی قبل از نقطه گلوپی شدن توسط روابط (۱) تا (۸) به همراه منحنی تقریب زده شده بعد از نقطه گلوپی شدن توسط روابط (۹) تا (۱۱)، به صورت مستقیم در مدل مادی $\text{Piecewise Linear Plasticity}$ تعریف شد. خواص



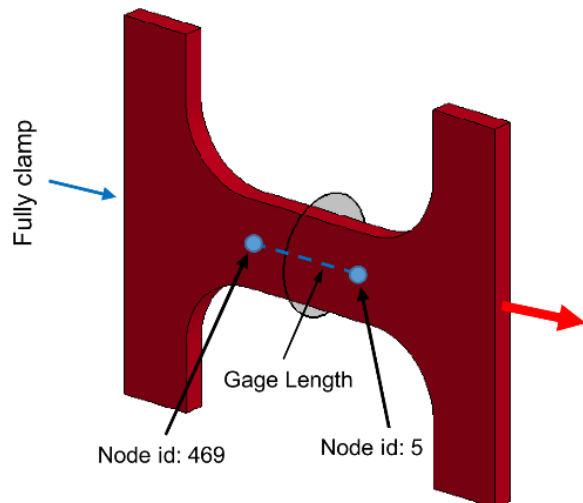
شکل (۲): ابعاد نمونه های تست پانچ (برش)، استاندارد کشش تک محوره، شیاردار و تست پانچ (کشش دوماحوره) [۱۳].

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_0) \quad (7)$$

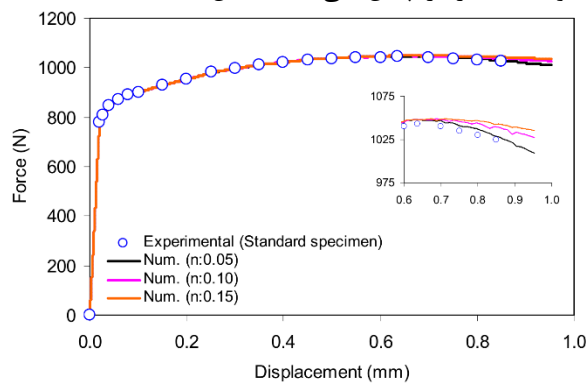
کرنش حقیقی پلاستیک (ε_p) با استفاده از رابطه زیر به دست می آید [۴]:

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \frac{\sigma_Y}{E} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، σ_Y تنش تسلیم و E مدول الاستیسته می باشد. با این وجود، مقادیر تنش-کرنش پلاستیک حقیقی محاسبه شده توسط روابط (۴) تا (۸)، تنها تا نقطه گلوپی شدن اعتبار خواهند داشت؛ زیرا در این نقطه به علت کاهش سطح مقطع، مقادیر محاسبه شده برای تنش از درجه اعتبار ساقط خواهند بود. نقطه گلوپی شدن جایی است که شیب منحنی تنش-کرنش، برابر با صفر می شود. به عبارت دیگر در



شکل (۴): مدل در نظر گرفته شده در شبیه سازی عددی مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد که منحنی تقریب زده شده بعد از نقطه گلوپی شدن توسط روابط (۹) تا (۱۱) با فرض $n = 0.05$ به خوبی می تواند نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد را پیش بینی کند (شکل ۵).



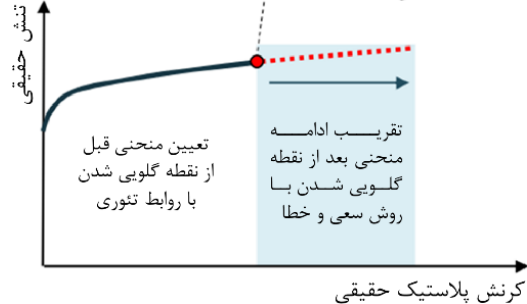
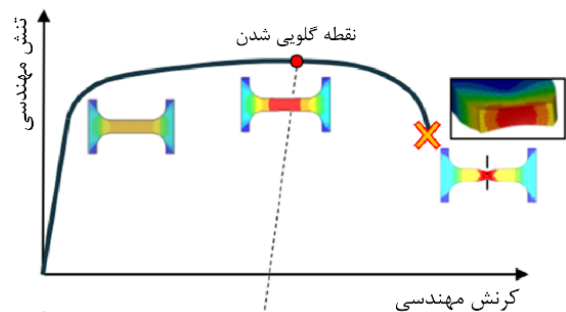
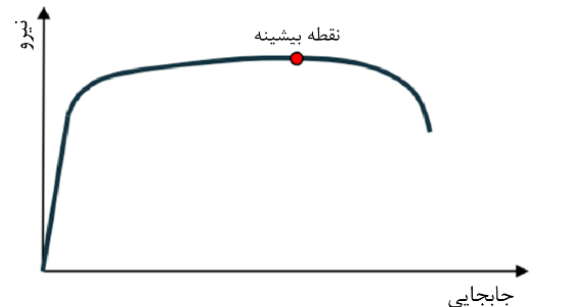
شکل (۵): نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد.

برای اطمینان از دقت روش استفاده شده در تخمین منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی ماده مفروض، مقادیر بیشینه و کمینه کرنش اصلی با نتایج تجربی مقایسه شدند (شکل ۶).

همان طور که مشاهده می شود، بیشینه مقدار کرنش اصلی به صورت تجربی برابر با 0.25 می باشد، درحالی که نتایج عددی بیشینه مقدار کرنش اصلی را 0.258 پیش بینی می کنند که بسیار نزدیک به یکدیگر می باشند. همچنین نتایج عددی کمینه مقدار کرنش اصلی را 0.13 تخمین می زنند، درحالی که کمینه مقدار کرنش اصلی به صورت تجربی برابر با 0.15 می باشد.

مکانیکی تعریف شده در این مدل برای آلومینیوم ۲۰۲۴ در جدول ۱، ارائه شده است.

مدل در نظر گرفته شده در شبیه سازی عددی در شکل ۴، نشان داده شده است. در این مدل، تغییر طول گیج با محاسبه اختلاف دو گره متناظر با ابتدا و انتهای گیج اندازه گیری شده است. درجات آزادی گره های واقع در انتهای یک سر نمونه کاملاً بسته شده درحالی که با استفاده از دستور Boundary Prescribed Motion Set، جابجایی به گره های واقع در سر آزاد نمونه اعمال شده است.



شکل (۳): روش تعیین منحنی تنش-کرنش پلاستیک ماده [۴].

جدول ۱: خواص مکانیکی آلومینیوم ۲۰۲۴

پارامتر	مقدار	واحد
چگالی	۲۷۰۰	Kg/m ³
مدول یانگ	۷۰	GPa
ضریب پواسون	۰/۳	

شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، رفتار این ماده را نمی توان با دقت مناسبی با استفاده از مدل جانسون-کوک (رابطه ۱۱) بیان کرد. درحالی که مشاهدات تجربی رفتار شکست ماده به طور مستقیم در مدل گیسمو در نظر گرفته شده و از توابع ریاضی برای بیان آن استفاده نمی شود.

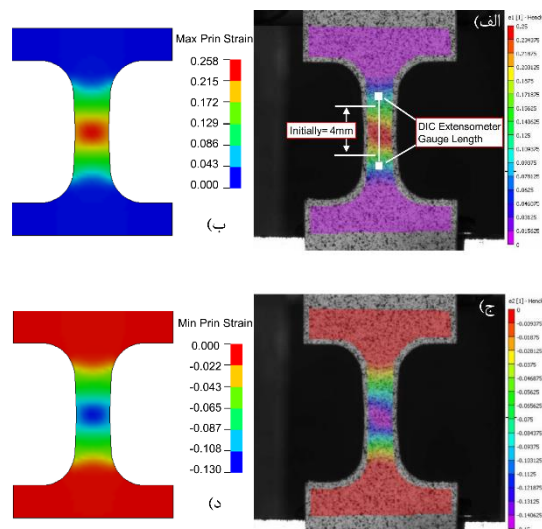
۳-۳- نتایج و بحث

نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد تست کشش تک محوره با در نظر گرفتن مدل آسیب گیسمو به همراه شکل شکست قطعه در شکل ۹ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود مدل آسیب گیسمو با دقت بسیار خوبی توانسته رفتار شکست ماده مفروض در حالت کشش تک محوره را پیش بینی کند. نمودار نیرو-جابجایی نمونه های شیاردار و پانچ (برش و کشش دومحوره) با در نظر گرفتن مدل آسیب گیسمو در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود نمودارهای به دست آمده از شبیه سازی عددی به خوبی توانسته اند که رفتار شکست ماده را در حالت های تنش مختلف پیش بینی کنند.

برای اطمینان از دقت روش کالیبراسیون انجام گرفته، دو تست دیگر با شکل هندسی و حالت تنش متفاوت که داده های تجربی آن برای ماده مورد بررسی در دسترس بوده، با استفاده از مدل آسیب گیسمو شبیه سازی شده و نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه شده است. شکل و ابعاد هندسی دو نمونه بررسی شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نمودار نیرو-جابجایی دو نمونه بررسی شده با در نظر گرفتن مدل آسیب گیسمو در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود نمودارهای به دست آمده از شبیه سازی عددی به خوبی توانسته اند که رفتار شکست ماده را در حالت های تنش مختلف پیش بینی کنند.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق از روش اجزاء محدود برای تخمین وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش در مدل آسیب گیسمو و میزان دقت این مدل در پیش بینی رفتار شکست



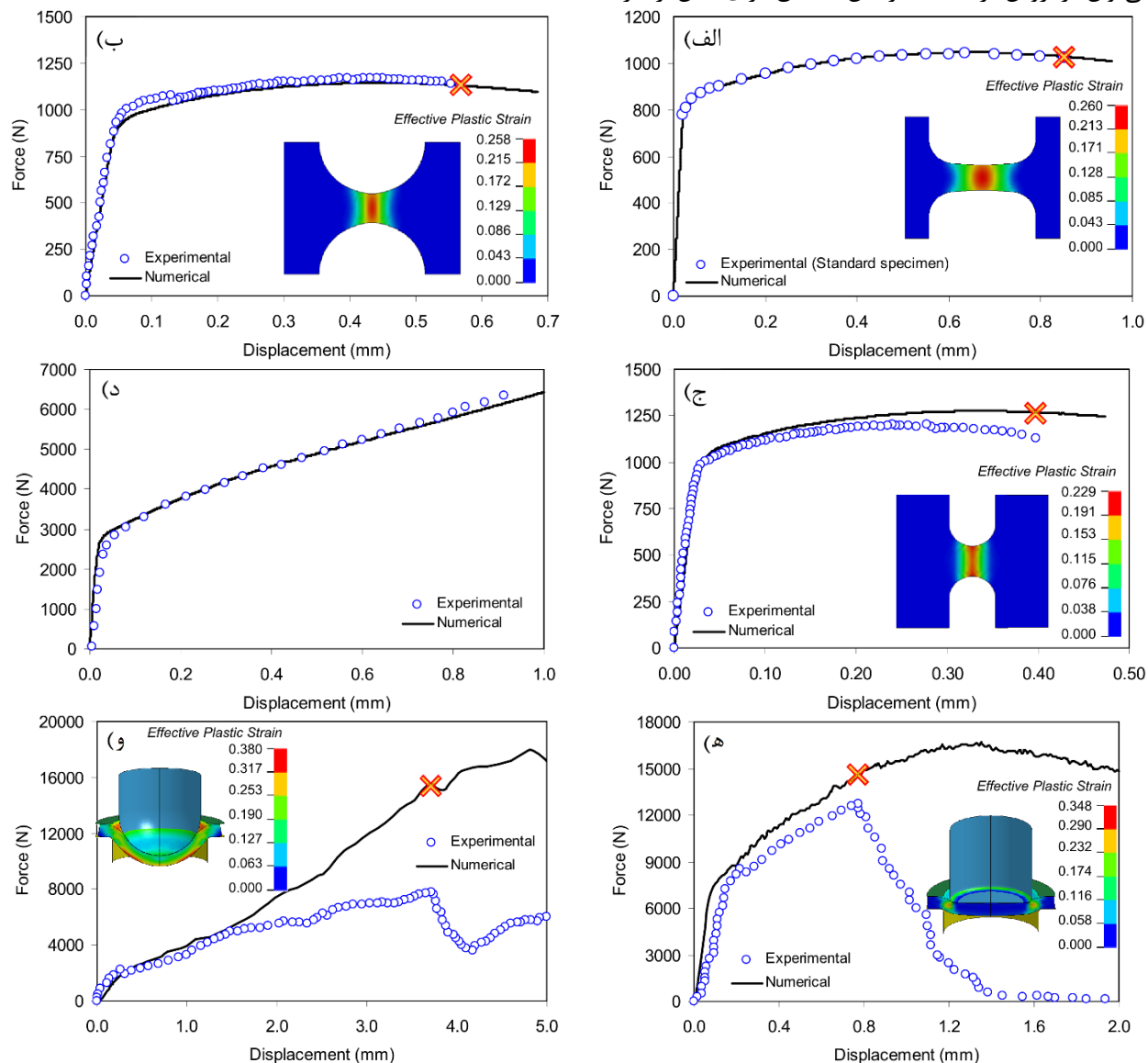
شکل (۶): (الف) کانتور بیشینه کرنش اصلی (تجربی)؛ (ب) کانتور بیشینه کرنش اصلی (شبیه سازی عددی)؛ (ج) کانتور کمینه کرنش اصلی (تجربی)؛ (د) کانتور کمینه کرنش اصلی (شبیه سازی عددی).

۳-۲- تخمین ثابت های مدل آسیب گیسمو

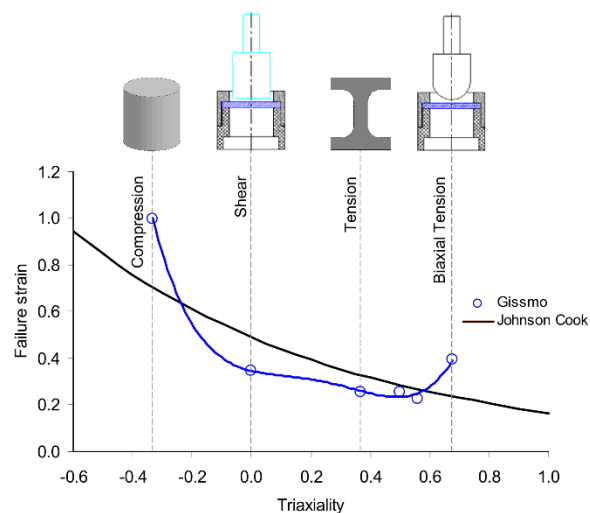
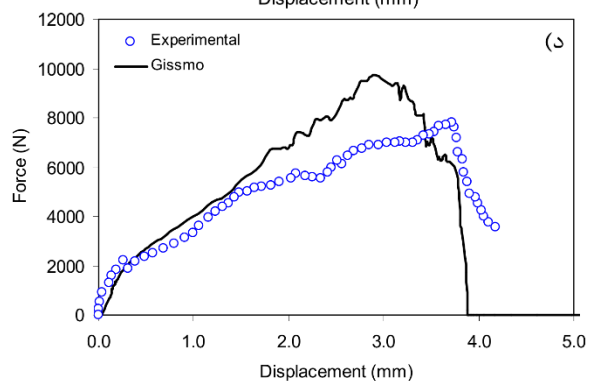
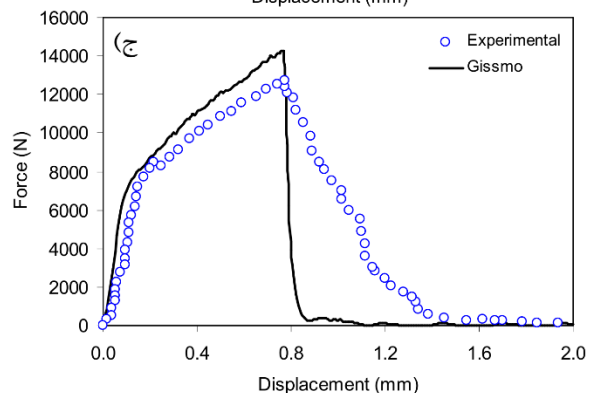
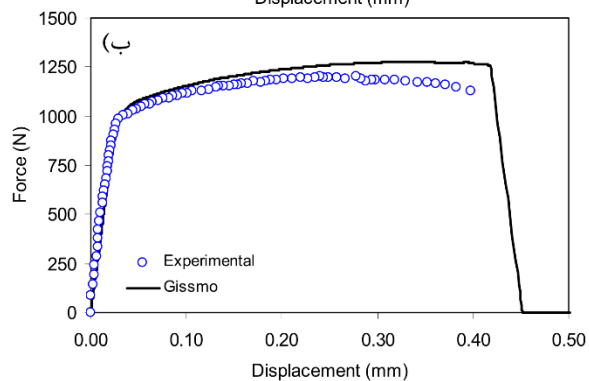
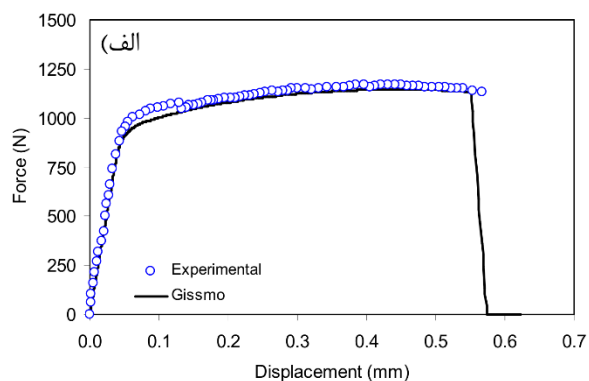
همان طور که اشاره شد برای تعیین ثابت های مدل آسیب گیسمو، ابتدا باید مقدار کرنش پلاستیک شکست برای حالت های تنش مختلف تخمین زده شود. کرنش پلاستیک شکست در لحظه ای که قطعه دچار شکست می شود، تعیین می شود. نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد کشش تک محوره، نمونه های شیاردار، استاندارد فشار تک محوره و پانچ (برش و کشش دومحوره) به همراه کانتور کرنش پلاستیک در لحظه شکست نمونه در شکل ۷ نشان داده شده اند. همان طور که مشاهده می شود، مقدار کرنش پلاستیک شکست برای شش حالت بررسی شده یکسان نمی باشد. این پدیده با مشاهدات تجربی صورت گرفته توسط سایر محققان که در آن کرنش پلاستیک شکست تابعی از حالت تنش بوده و مقداری ثابت نیست، تطابق دارد [۴-۱۷]. همچنین از آنجاکه برای تست فشار تک محوره، نقطه شکست مشخصی در تست تجربی مشاهده نشد، لذا مقدار کرنش پلاستیک شکست برای این تست برابر با ۱/۰ در نظر گرفته شده است. تغییرات کرنش پلاستیک شکست نسبت به حالت تنش (سه محوری)، برای ماده مفروض در

شکست فلزات دیگر در حالت‌های تنش مختلف استفاده کرد. همچنین نتایج عددی نشان داد که همواره باید به محدودیت‌های مدل آسیب جانسون-کوک توجه کرد؛ زیرا الزاماً وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش یک ماده مفروض، الزاماً از روابط این مدل آسیب تبعیت نمی‌کند.

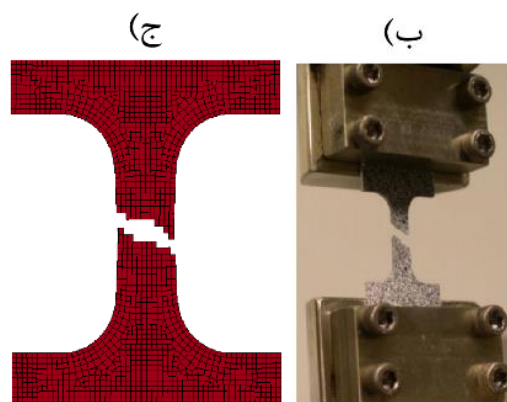
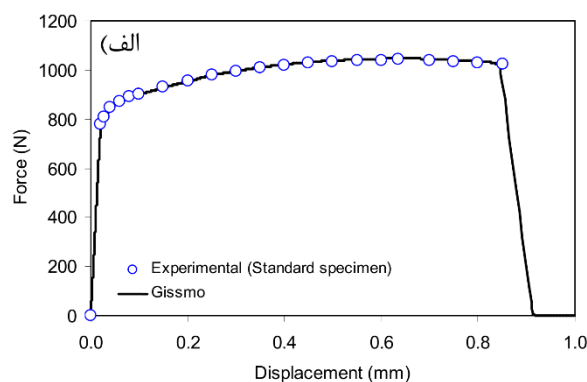
ماده با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ال‌اس‌داین‌ا استفاده شد. آزمون‌های تجربی انجام‌گرفته روی شش نمونه مورد آزمایش (نمونه‌های استاندارد کشش و فشار تک‌محوره، شیاردار و تست پانچ) با استفاده از منحنی شکست کالیبره شده مدل آسیب گیسمو در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا شبیه‌سازی شد و نتایج عددی به‌دست‌آمده با نتایج تجربی مقایسه گردید. دقت نتایج عددی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که می‌توان از روش ارائه‌شده در این تحقیق برای بیان رفتار



شکل (۷): نمودار نیرو-جابجایی به همراه کانتور کرنش پلاستیک در لحظه شکست قطعه: الف) کشش تک‌محوره؛ ب) شیاردار (R:4.762)؛ ج) شیاردار (R:1.984)؛ د) فشار تک‌محوره؛ ه) پانچ (برش)؛ و) پانچ (کشش دوم‌محوره).



شکل (۸): تغییرات کرنش پلاستیک شکست نسبت به حالت تنش.



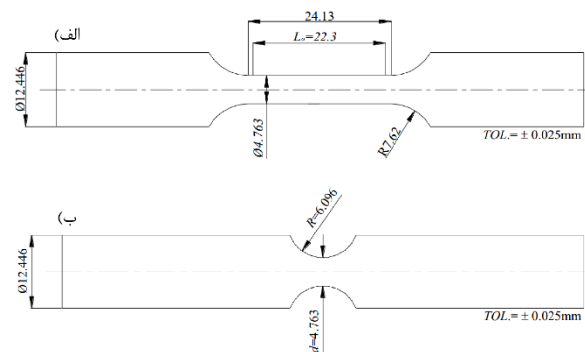
شکل (۹): (الف) نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد کشش تک‌محوره؛ (ب) شکل شکست قطعه استاندارد در تست تجربی؛ (ج) شبیه‌سازی با مدل شکست گیسمو.

شکل (۱۰): نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها با استفاده از مدل آسیب گیسمو: (الف) نمونه شیاردار (R:4.762؛ ب) شیاردار (R:1.984؛ ج) پانچ (برش؛ د) پانچ (کشش دو‌محوره).

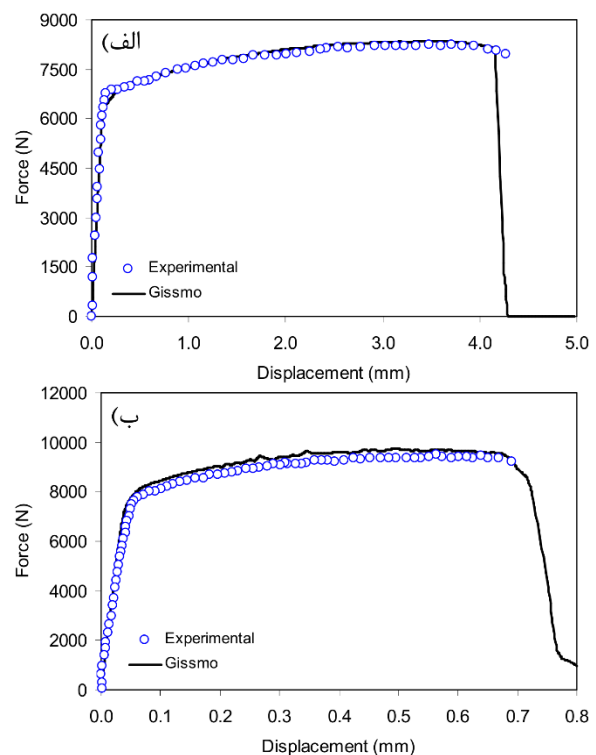
کالیبراسیون پیش‌بینی می‌کنند. لذا لازم هست که علاوه بر تعیین وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش ماده، وابستگی به اندازه المان در مدل المان محدود هم بررسی شود. قدم بعدی نویسندگان این مقاله، تعیین وابستگی کرنش پلاستیک شکست به اندازه المان در مدل‌های المان محدود می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] Cockcroft MG. Ductility and workability of metals. *Journal of Metals*. 1968;96:2444.
- [2] Gurson AL. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1977;99(1):2-15. DOI 10.1115/1.3443401.
- [3] Johnson GR, Cook WH. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*. 1985;21(1):31-48. DOI 10.1016/0013-7944(85)90052-9.
- [4] Buyuk M. Development of a tabulated thermo-viscoplastic material model with regularized failure for dynamic ductile failure prediction of structures under impact loading. PhD Dissertation, The George Washington University, 2013.
- [5] Andrade FX, Feucht M, Haufe A, Neukamm F. An incremental stress state dependent damage model for ductile failure prediction. *International Journal of Fracture*. 2016;200:127-50. DOI 10.1007/s10704-016-0081-2.
- [6] Popławski A, Kędzierski P, Morka A. Identification of Armox 500T steel failure properties in the modeling of perforation problems. *Materials & Design*. 2020;190:108536. DOI 10.1016/j.matdes.2020.108536.
- [7] Xiao Y, Hu Y. An extended iterative identification method for the GISSMO model. *Metals*. 2019; 9(5):568. DOI 10.3390/met9050568.
- [8] Xiao Y, Hu Y. Numerical and experimental fracture study for 7003 aluminum alloy at different triaxialities. *Metals and Materials International*. 2021;27:2499-511. DOI 10.1007/s12540-020-00619-7.
- [9] Xiao Y, He Z. A continuum constitutive model for a 7003-Aluminum alloy considering the stress state and strain rate effects. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of*



شکل (۱۱): ابعاد نمونه‌های دمبلی شکل: (الف) استاندارد کشش تک‌محوره؛ (ب): شیاردار (R:6.096) [۱۳].



شکل (۱۲): نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها با استفاده از مدل آسیب گیسمو: (الف) استاندارد کشش تک‌محوره؛ (ب): شیاردار (R:6.096).

علاوه بر وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش ماده، این پارامتر به اندازه المان نیز وابسته می‌باشد [۱۵]. به این مفهوم که استفاده از مدل المان محدودی با اندازه المان بزرگ‌تر، مقدار کرنش پلاستیک شکست کمتر و استفاده از مدلی با اندازه المان کوچک‌تر، مقدار کرنش پلاستیک شکست بالاتری را برای نمونه‌های مورد استفاده در فرایند

- Mechanical Engineering. 2023; 47:741-751. **DOI** 10.1007/s40997-022-00544-7.
- [10] Chen X, Chen G, Huang L. Validation of GISSMO model for fracture prediction of a third-generation advanced high-strength steel. SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 2018; 11(4):293-302. **DOI** 10.4271/2018-01-0107.
- [11] Ge Y, Dong L, Song H, Gao L, Xiao R. On the Prediction of material fracture for thin-walled cast alloys using GISSMO. Metals. 2022; 12: 1850. **DOI** 10.3390/met12111850.
- [12] Zhu T, Ding H, Wang Ch, Liu Y, Xiao Sh, Yang G, Yang B. Parameters calibration of the GISSMO failure model for SUS301L-MT. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2023; 36:20. **DOI** 10.1186/s10033-023-00844-2.
- [13] Seidt JD. Plastic deformation and ductile fracture of 2024-T351 aluminum under various loading conditions. PhD Dissertation, The Ohio State University, 2010.
- [14] Mackenzie AC, Hancock JW, Brown DK. On the influence of state of stress on ductile failure initiation in high strength steels. Engineering Fracture Mechanics. 1977;9(1):167-168. **DOI** 10.1016/0013-7944(77)90062-5.
- [15] Haufe A, Neukamm F, Feucht M, DuBois P, Borvall T. Recent developments in damage and failure modeling with LS-DYNA. 2010; In; Nordic LS-DYNA Users Forum.
- [16] Rokhy H, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T. Calibration of different constitutive material models for Vosges sandstone due to its application in rock-cutting processes. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2022;44(10):468. **DOI** 10.1007/s40430-022-03764-9.
- [17] Rokhy H, Mostofi TM. Tracking the explosion characteristics of the hydrogen-air mixture near a concrete barrier wall using CESE IBM FSI solver in LS-DYNA incorporating the reduced chemical kinetic model. International Journal of Impact Engineering. 2023;172:104401. **DOI** 10.1016/j.ijimpeng.2022.104401.



Parameters Calibration of GISSMO Damage Model to Predict the Plastic Behavior and Ductile Fracture of Aluminum 2024

Hamid Rokhy¹, Mojtaba Ziya-Shamami^{2*}, Seyed Mohammad Vahab Mousavi², Tohid Mirzababaie Mostofi³

¹ M.Sc., Faculty of Electrical, Mechanical and Computer Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

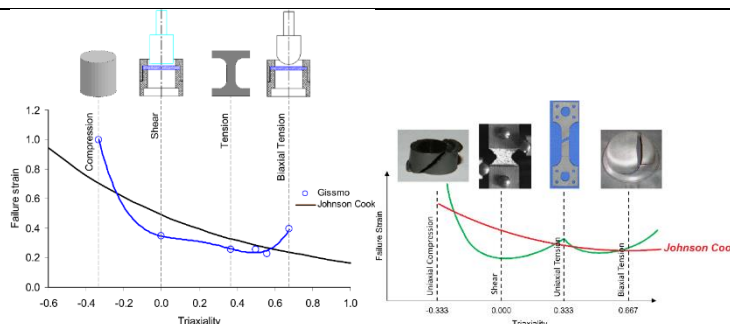
² Assistant Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Faculty of Electrical, Mechanical and Computer Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

HIGHLIGHTS

- Calibration of coefficients of the GISSMO damage model for Aluminum 2024
- More accurate prediction of the plastic and failure behavior of metallic material in different stress states in collisions

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 27 April 2024

Received in revised form: 20 May 2024

Accepted: 1 June 2024

Available online: 29 June 2024

*Correspondence:

mziash@ihu.ac.ir

How to cite this article:

H. Rokhy, M. Ziya-Shamami, S.M.V. Mousavi, T.M. Mostofi. Parameters calibration of GISSMO damage model to predict the plastic behavior and ductile fracture of Aluminum 2024. Journal of Aerospace Mechanics. 2025; 21(2):1-12.

Keywords:

Numerical simulation
Plastic behavior
Ductile fracture
GISSMO damage model
Stress state

ABSTRACT

Nowadays, damage models are widely used in order to simulate and predict the failure points of parts in production processes, as well as to examine the damage caused to complex parts during collision. The purpose of this research is to determine the constants of the material model and GISSMO damage model for aluminum 2024. For this purpose, the data of experimental tests conducted on six tested samples (standard tensile and uniaxial compression samples, notched samples and punch test) were used. Then, by estimating the value of the failure strain in each sample from the experimental data, the dependence of the failure plastic strain on the state of stress in the GISSMO damage model was determined. In the following, the proposed damage model was used to simulate the experimental tests performed in the LS-DYNA software. The accuracy of the obtained numerical results shows that the method presented in the present research can be used to express the fracture behavior of other metals in different stress states.