



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

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

Email Address: h.rokhy@eyc.ac.ir

²Assistant Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran (Correspondence). Email Address: mziash@ihu.ac.ir

³Assistant Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran. Email Address: m.v.mousavi@ihu.ac.ir

⁴Assistant Professor, Faculty of Electrical, Mechanical and Computer Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran. Email Address: t.m.mostofi@eyc.ac.ir

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

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 28 April 2025

Received in revised form: 21 May 2025

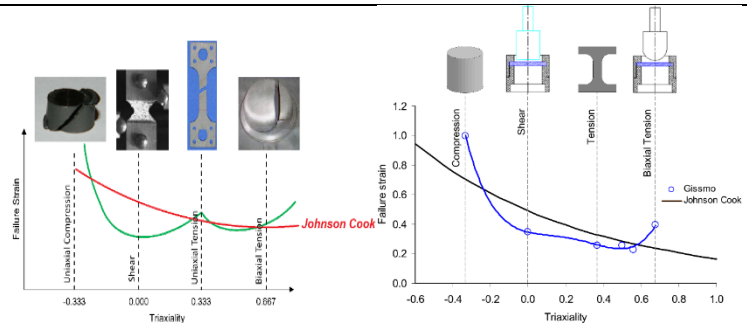
Accepted: 2 June 2025

Available online: 23 September 2025

Keywords:

Numerical Simulation
Plastic Behavior
Ductile Fracture
GISSMO Damage Model
Stress State

GRAPHICAL ABSTRACT



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.

Cite this article: Rokhy H, Ziya-Shamami M, Vahab Mousavi S.M, Mirzababaie Mostofi T. Parameters Calibration of GISSMO Damage Model to Predict the Plastic Behavior and Ductile Fracture of Aluminum 2024. Aerospace Mechanics. 2025; 21(3):47-55. DOI:<https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1426>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.



OPEN ACCESS

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

حمید رخی^۱، مجتبی ضیاءشمامی^{۲*}، سید محمد وهاب موسوی^۳، توحید میرزا بابای مستوفی^۴

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، ایران. رایانامه: h.rokhy@eyc.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: mziash@ihu.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران. رایانامه: m.v.mousavi@ihu.ac.ir

^۴ استادیار، دانشکده مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، ایران. رایانامه: t.m.mostofi@eyc.ac.ir

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 تغییرشکل‌های پلاستیک بزرگ

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

شبیه‌سازی عددی

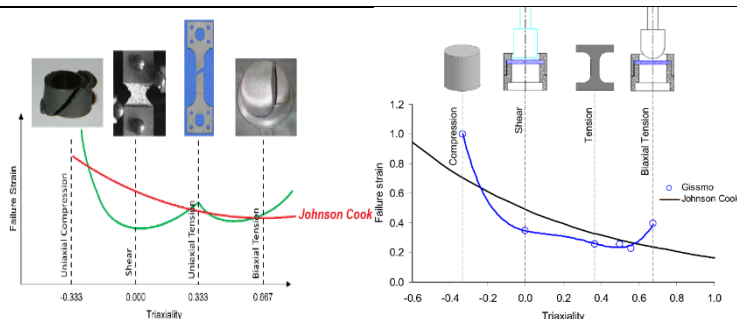
رفتار پلاستیک

شکست نرم

مدل آسیب گیسمو

حالت تنش

چکیده گرافیکی



چکیده

امروزه به‌منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی نقاط شکست قطعات در فرایندهای تولید و همچنین بررسی خسارت واردشده 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 است. بدین منظور از داده‌های آزمون‌های تجربی انجام‌گرفته روی شش نمونه مورد آزمایش (نمونه‌های استاندارد کشش و فشار تک‌محوره، نمونه‌های ناچ‌دار و آزمون 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 ال‌اس داینا 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.

استاد: رخی حمید، ضیاءشمامی مجتبی، وهاب موسوی سیدمحمد، میرزا بابای مستوفی، توحید. کالیبراسیون پارامترهای مدل آسیب گیسمو جهت پیش رفتار

پلاستیک و شکست نرم آلومینیوم ۲۰۲۴. هوا فضا، ۲۱(۳): ۴۷-۵۵. DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1426>

نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند. ©



ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).

OPEN ACCESS

۱- مقدمه

بیوک [۴]، رفتار شکست آلومینیوم ۲۰۲۴ با استفاده از مدل آسیب جانسون-کوک جدولی تعیین گردید. در این پروسه از آزمون‌های کشش روی نمونه‌های استاندارد و نمونه‌های ناچ‌دار با شعاع‌های شیار مختلف در شرایط کرنش و تنش صفحه‌ای تحت نرخ کرنش‌ها و دماهای مختلف استفاده شد. اعتبار سنجی پارامترهای کالیبره شده این مدل آسیب، با داده‌های آزمون بالستیک انجام شد. در پژوهش انجام‌شده توسط آندراده و همکاران [۵]، چگونگی بیان رفتار شکست فولاد DP800 با استفاده از مدل گیسمو با انجام آزمون کشش تک‌محوره روی نمونه‌های صاف و ناچ‌دار با شعاع‌های مختلف در شرایط تنش صفحه‌ای و همچنین آزمون پانچ در دمای محیط و شرایط استاتیکی شرح داده شد. ثابت‌های به‌دست‌آمده با شبیه‌سازی آزمایش بارگذاری استاتیکی روی ستون مرکزی یک خودرو اعتبار سنجی شد. در تحقیق انجام‌شده توسط پوپلاوسکی و همکاران [۶]، ثابت‌های مدل مادی و مدل آسیب گیسمو برای فولاد زرهی ArmoX 500T تعیین شد. آن‌ها از آزمایش کشش تک‌محوره با نمونه‌های استاندارد و نمونه‌های ناچ‌دار با شعاع‌های شیار مختلف در شرایط کرنش و تنش صفحه‌ای استفاده کردند. آزمایش‌ها در دماها و نرخ کرنش‌های متفاوت انجام شد. اعتبار سنجی مدل کالیبره شده با شبیه‌سازی آزمون نفوذ پرتابه صلب در زره انجام شد.

ژیانو و هو [۷] با استفاده از مدل آسیب گیسمو، رفتار شکست آلومینیوم ۷۰۰۳ را تعیین کردند. آن‌ها از آزمایش کشش تک‌محوره با نمونه‌های استاندارد و نمونه‌های ناچ‌دار با شعاع‌های شیار مختلف در شرایط تنش صفحه‌ای و همچنین آزمون پانچ استفاده کردند. مدل آسیب کالیبره شده با شبیه‌سازی آزمون خمش سه‌نقطه‌ای برای چند حالت اعتبار سنجی شد.

اگرچه رویکرد مقالات اخیر محققان، استفاده از مدل‌های آسیب مانند گیسمو و جانسون-کوک جدولی برای بیان رفتار شکست فلزات است ولی تاکنون روشی قاعده‌مندی برای استفاده از مدل آسیب گیسمو که به‌سادگی قابل‌استفاده برای طیف وسیعی از فلزات باشد، ارائه نشده است. در این تحقیق از داده‌های ارائه‌شده برای آلومینیوم ۲۰۲۴ برای تعیین ثابت‌های مدل آسیب گیسمو استفاده‌شده است [۸]. بدین منظور از داده‌های آزمون‌های تجربی انجام‌گرفته روی شش نمونه مورد آزمایش (نمونه‌های استاندارد کشش و فشار تک‌محوره، نمونه‌های ناچ‌دار و آزمون 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 شبیه‌سازی آزمون‌های تجربی انجام‌گرفته در نرم‌افزار ال‌اس‌داینما استفاده شد.

فرایندهای شکل دادن فلزات مانند کشش عمیق، پولک زنی، برشکاری و خم‌کاری ورق‌های فلزی همراه با تغییرشکل‌های پلاستیک قابل‌توجه می‌باشند که ممکن است به نقطه شکست فلز ختم شود. لذا باید در طی فرایند تولید از شکست اجتناب شود. همچنین به‌منظور تخمین مقدار صدمه واردشده به سرنشینان خودرو در طی تصادف‌های رانندگی، نیاز به فهم دقیق تغییرشکل‌های شدید بدنه خودرو که شامل لهیدگی و شکست قطعات بدنه و موتور است، است. جهت شبیه‌سازی پدیده‌های مرتبط به تغییرشکل‌های شدید فلزات ناشی از بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی نه‌تنها 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 می‌توان به دودسته کلی طبقه‌بندی کرد: شکست نرم و شکست ترد. در شکست نرم، مقدار قابل‌توجهی تغییر شکل پلاستیک قبل از مرحله پیشرفت ترک و در حین آن مشاهده می‌شود. درحالی‌که در شکست ترد، پیشرفت ترک بسیار سریع اتفاق می‌افتد و میزان تغییر شکل پلاستیک بسیار ناچیز است.

برای توصیف رفتار شکست نرم مواد در نرم‌افزار تجاری اجزاء محدود ال‌اس‌داینما از مدل‌های آسیب متفاوتی می‌توان استفاده کرد که از میان آن‌ها می‌توان به مدل‌های 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 مدل‌های آسیب کاکرافت و لاتهام، گرسون-تی و و گارد-نیدلمن و جانسون-کوک، رفتار شکست ماده بر اساس مشاهده‌های تجربی تعریف می‌شود که شامل توابع ریاضی با عدم پیش‌زمینه فیزیکی برای تطبیق با مشاهدات تجربی است. درحالی‌که در مدل‌های آسیب جانسون-کوک جدولی و گیسمو، مشاهدات تجربی رفتار شکست ماده به‌طور مستقیم در نظر گرفته‌شده و از توابع ریاضی برای بیان آن استفاده نمی‌شود. لذا این دو مدل اخیر با درصد موفقیت بالاتری همراه می‌باشند [۵]. در مدل‌های آسیب کاکرافت و لاتهام، گرسون-تی و و گارد-نیدلمن و جانسون-کوک، وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش، نرخ کرنش و نرم‌شدگی ماده که در اثر افزایش دمای آدیاباتیک ناشی از کار پلاستیک رخ می‌دهد در نظر گرفته می‌شود. درحالی‌که در مدل‌های آسیب جدولی جانسون-کوک و گیسمو علاوه بر موارد ذکرشده، وابستگی کرنش پلاستیک شکست به زاویه لود و اندازه المان هم در نظر گرفته می‌شود [۵]. در تحقیق انجام‌شده توسط

۲- مدل آسیب گیسمو

مطالعات انجام گرفته نشان می‌دهد که حد شکست برای یک ماده ثابت نبوده و وابسته به حالت تنش آن ماده است [۳]. به بیان دیگر، مقدار کرنش پلاستیک شکست برای یک ماده مفروض در حالت بارگذاری کششی تک‌محوره با حالت بارگذاری کششی دومحوره، 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:

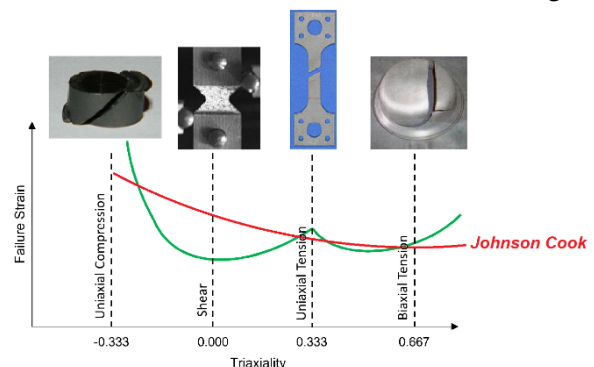
$$\epsilon_p^f = (D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*) \quad (1)$$

در رابطه بالا D_1 ، D_2 و D_3 پارامترهایی می‌باشند که از آزمون تجربی قابل محاسبه خواهند بود، σ^* حالت تنش و ϵ_f کرنش پلاستیک شکست است. حالت تنش که اصطلاحاً سه محوری نامیده می‌شود، به صورت زیر بیان می‌شود:

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

در رابطه بالا، σ_m تنش میانگین و σ_{eff} تنش فون-مایز است. با توجه به رابطه بالا، مقدار سه محوری برای حالت‌های کشش دومحوره، 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 [۵]. 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 [۸]. مفهوم وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش ماده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): مفهوم وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش.

در مدل شکست گیسمو، کرنش پلاستیک شکست وابسته به حالت تنش، نرخ کرنش و اندازه المان است. این مدل شکست، به صورت ریاضی با رابطه زیر بیان می‌شود:

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

در رابطه بالا، ϵ_p^f کرنش پلاستیک شکست، $f(\sigma^*)$ تابع وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش ماده، $g(\dot{\epsilon})$ تابع وابستگی کرنش پلاستیک شکست به نرخ کرنش و $i(l)$ تابع وابستگی کرنش پلاستیک شکست به اندازه المان است. هر کدام از این توابع، داده‌های حاصل از نتایج آزمایشگاهی می‌باشند. برای تعیین ثابت‌های مدل آسیب گیسمو باید مقدار کرنش پلاستیک شکست برای حالت‌های تنش مختلف معلوم باشد تا بتوان منحنی کرنش شکست برحسب حالت تنش ماده را تخمین زد. از آنجاکه برای تعیین منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی از نمونه استاندارد آزمون کشش استفاده می‌شود، تنها نیاز به داشتن حداقل نتایج سه آزمون دیگر با حالت‌های تنش متفاوت (کشش دومحوره، برش و فشار) خواهد بود.

۳- شبیه‌سازی اجزاء محدود

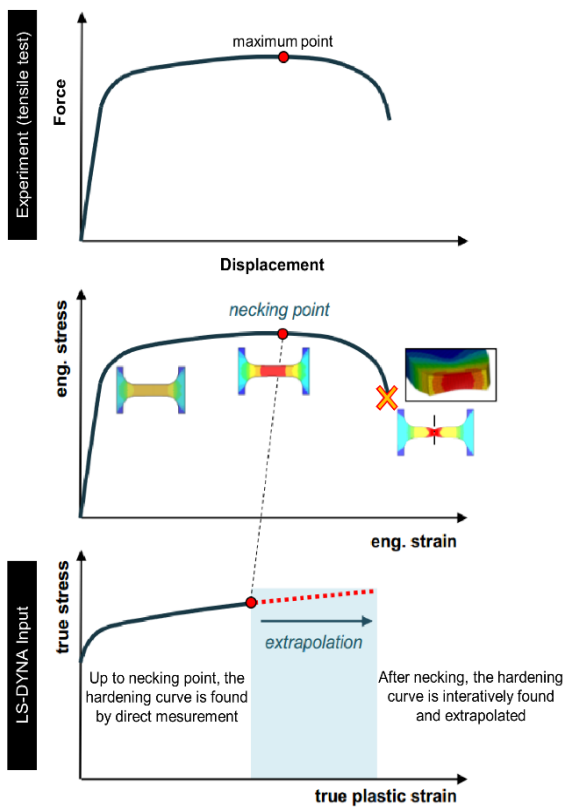
در این تحقیق از نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا برای تعیین ثابت‌های مدل آسیب گیسمو و میزان دقت این مدل در پیش‌بینی رفتار شکست ماده استفاده شد. آزمون‌های تجربی انجام گرفته روی شش نمونه مورد آزمایش با استفاده از مدل کالیبره شده آسیب گیسمو در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا شبیه‌سازی شد و نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی ارائه شده توسط سیت [۸] (نمودار نیرو-جابجایی) مقایسه گردید. ماده مورد آزمایش در آزمون تجربی انجام شده، آلومینیوم سری ۲۰۲۴ است. شش نمونه مورد آزمایش شامل نمونه‌های استاندارد کشش و فشار تک‌محوره، نمونه‌های ناچ‌دار و آزمون پانچ (کشش دومحوره و برش) می‌باشند. ابعاد نمونه‌های تجربی به همراه حالت تنش متناظرشان در شکل ۲، نشان داده شده است. در این شکل واحدها برحسب میلی‌متر می‌باشند. ضخامت نمونه‌های حالت تنش صفحه‌ای (نمونه استاندارد کشش تک‌محوره و نمونه‌های ناچ‌دار)، 0.762 میلی‌متر است. نمونه استاندارد فشار تک‌محوره به صورت یک استوانه با نسبت طول به قطر یک انتخاب شده است. قطر این استوانه، $3/0.48$ میلی‌متر است [۸].

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 داده‌های آزمون کشش بر روی یک نمونه استاندارد تعیین شود.

$$\epsilon_p = \epsilon - \frac{\sigma_y}{E} \quad (۸)$$

در این رابطه، σ_y تنش تسلیم و E مدول الاستیسته می‌باشد. با این وجود، مقادیر تنش-کرنش پلاستیک حقیقی محاسبه شده توسط روابط (۴) تا (۸)، تنها تا نقطه گلوبی 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 گلوبی شدن جایی است که شیب منحنی تنش-کرنش، برابر با صفر می‌شود. به عبارت دیگر در این نقطه، منحنی نیرو-جابجایی به صورت افقی در خواهد آمد (شکل ۳).

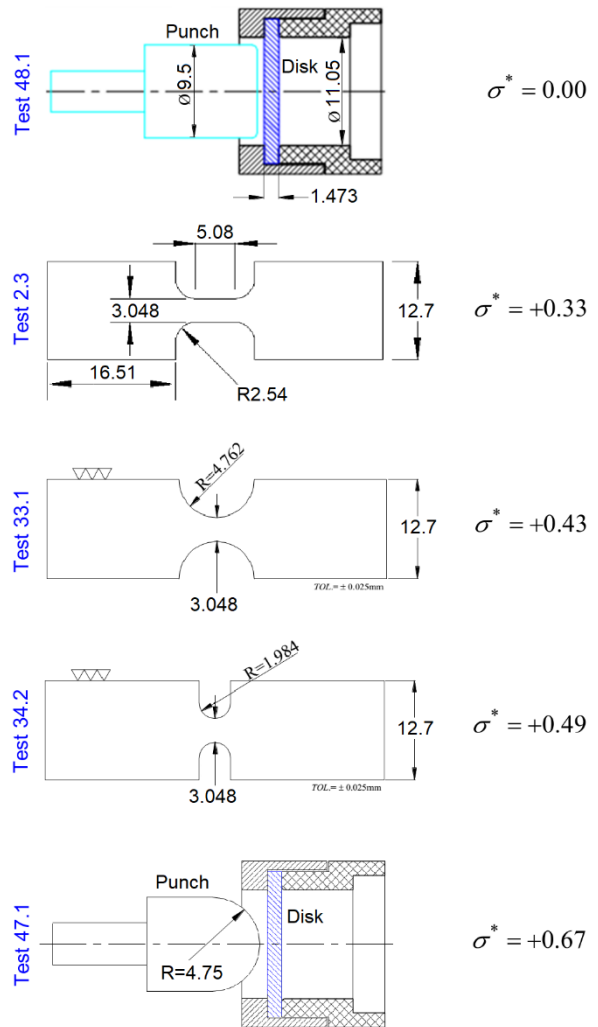


شکل (۳): روش تعیین منحنی تنش-کرنش پلاستیک ماده [۴].

ادامه منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی را بایستی با روش سعی و خطا تقریب زد. به این صورت که ادامه منحنی بعد از نقطه گلوبی شدن با چند منحنی دیگر، تقریب زده شده و شبیه سازی آزمون کشش به صورت شبه استاتیکی با منحنی‌های مفروض انجام می‌شود و از خروجی شبیه سازی، منحنی نیرو-جابجایی استخراج می‌شود. آن منحنی تقریبی که بتواند بهتر منحنی نیرو-جابجایی را پیش‌بینی کند، به عنوان ادامه منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی بعد از نقطه گلوبی شدن، انتخاب می‌شود [۴]. منحنی‌های تقریبی بعد از نقطه گلوبی شدن، به صورت زیر تقریب زده می‌شوند:

$$\sigma = K(\epsilon_e + \epsilon_p)^n \quad (۹)$$

$$K = A(n)^{-n} \quad (۱۰)$$



شکل (۲): ابعاد نمونه‌های آزمون پنج برش، استاندارد کشش

تک‌محوره، ناچ‌دار و آزمون پنج (کشش دومحوره) [۸].

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 می‌شوند:

$$\epsilon_0 = \frac{L - L_0}{L} \quad (۴)$$

$$\sigma_0 = \frac{F}{A} \quad (۵)$$

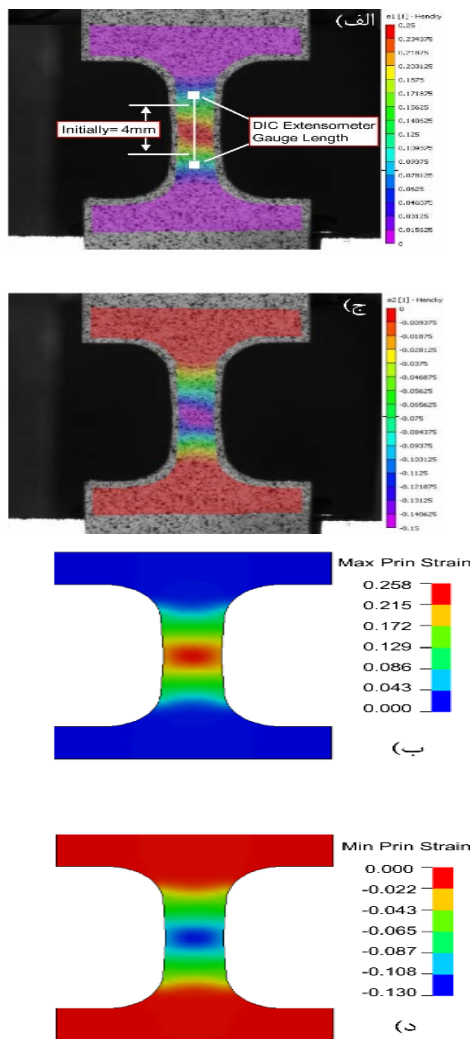
در روابط بالا، ϵ_0 کرنش مهندسی، σ_0 تنش مهندسی، L_0 طول اولیه گیج، F مقدار نیرو و A مساحت سطح مقطع نمونه است. با استفاده از مقادیر به دست آمده، تنش و کرنش حقیقی به صورت زیر محاسبه خواهند شد:

$$\sigma = \sigma_0(1 + \epsilon_0) \quad (۶)$$

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_0) \quad (۷)$$

کرنش حقیقی پلاستیک (ϵ_p) با استفاده از رابطه زیر به

دست می‌آید:



شکل (۵): (الف) کانتور بیشینه کرنش اصلی (تجربی)؛ (ب) کانتور بیشینه کرنش اصلی (شبیه‌سازی عددی)؛ (ج) کانتور کمینه کرنش اصلی (تجربی)؛ (د) کانتور کمینه کرنش اصلی (شبیه‌سازی عددی).

۳-۲- تخمین ثابت‌های مدل آسیب گیسمو

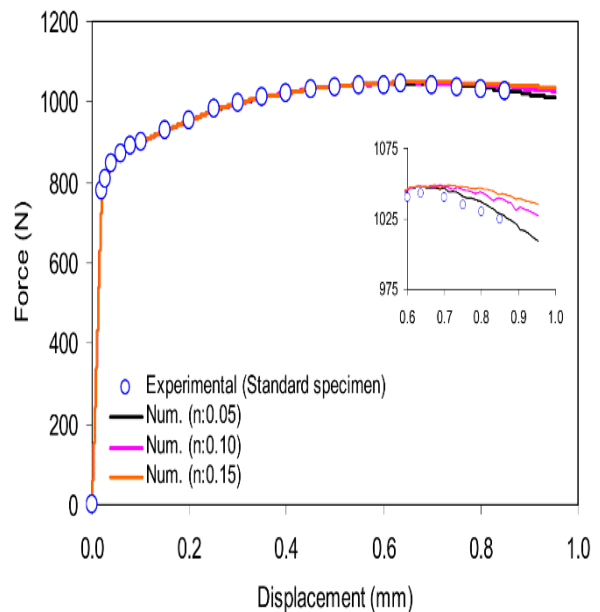
همان‌طور که اشاره شد برای تعیین ثابت‌های مدل آسیب گیسمو، ابتدا باید مقدار کرنش پلاستیک شکست برای حالت‌های تنش مختلف تخمین زده شود. کرنش پلاستیک شکست در لحظه‌ای که قطعه دچار شکست می‌شود، تعیین می‌شود. نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد کشش تک‌محوره، نمونه‌های ناچدار، استاندارد فشار تک‌محوره و پانچ (برش و کشش دو‌محوره) به همراه کانتور کرنش پلاستیک در لحظه شکست نمونه در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار کرنش پلاستیک شکست برای شش حالت بررسی شده یکسان نیست. همچنین از آنجا که برای آزمون فشار تک‌محوره، نقطه شکست مشخصی در آزمون تجربی مشاهده نشد، لذا مقدار کرنش پلاستیک شکست برای این آزمون برابر با ۱/۰ در نظر گرفته شده است. تغییرات کرنش پلاستیک شکست نسبت به حالت تنش

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

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

ابتدا منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی از نمونه استاندارد آزمون کشش (نمونه ۲-۳ نشان داده شده در شکل ۲) استخراج شد. تا نقطه گلوبی شدن، مقادیر تنش-کرنش پلاستیک حقیقی با استفاده از روابط (۴) تا (۸) محاسبه شد. درحالی‌که ادامه منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی بعد از نقطه گلوبی شدن با روش سعی و خطا تقریب زده شد. در این قسمت شبیه‌سازی آزمون کشش به صورت شبه استاتیکی با استفاده از حلگر غیرصریح نرم‌افزار برای چند منحنی تقریب زده شده بعد از نقطه گلوبی شدن انجام شد و از خروجی شبیه‌سازی، منحنی نیرو-جابجایی استخراج شد. مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد که منحنی تقریب زده شده بعد از نقطه گلوبی شدن توسط روابط (۹) تا (۱۱) با فرض $n = 0.05$ ، به خوبی می‌تواند نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد را پیش‌بینی کند (شکل ۴).

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 ۵). همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه مقدار کرنش اصلی به صورت تجربی برابر با ۰/۲۵ است، درحالی‌که نتایج عددی بیشینه مقدار کرنش اصلی را ۰/۲۵۸ پیش‌بینی می‌کنند که بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشند. همچنین نتایج عددی کمینه مقدار کرنش اصلی را ۰/۱۳ تخمین می‌زنند، درحالی‌که کمینه مقدار کرنش اصلی به صورت تجربی برابر با ۰/۱۵ است.



شکل (۴): نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد.

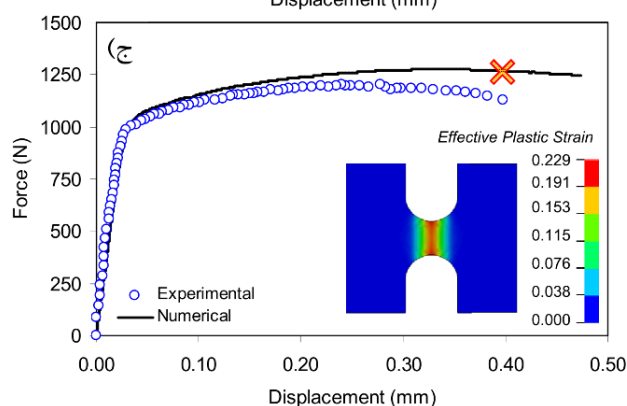
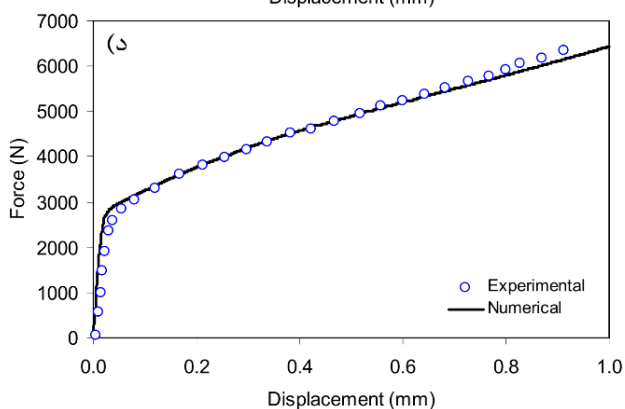
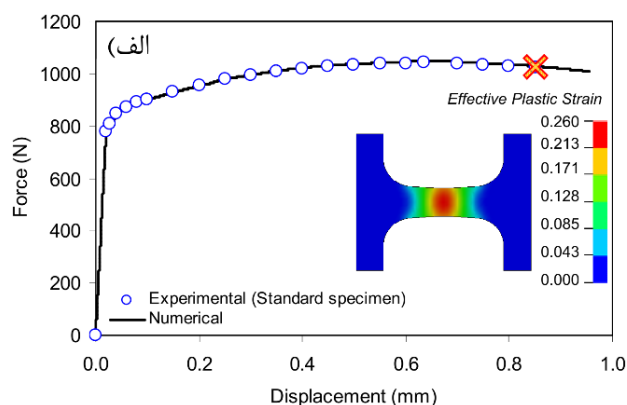
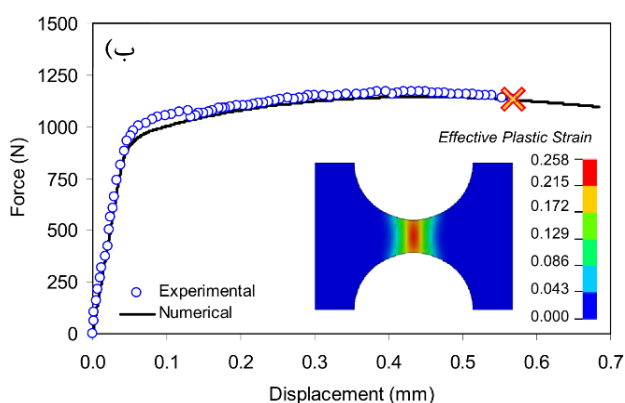
۴- نتیجه‌گیری

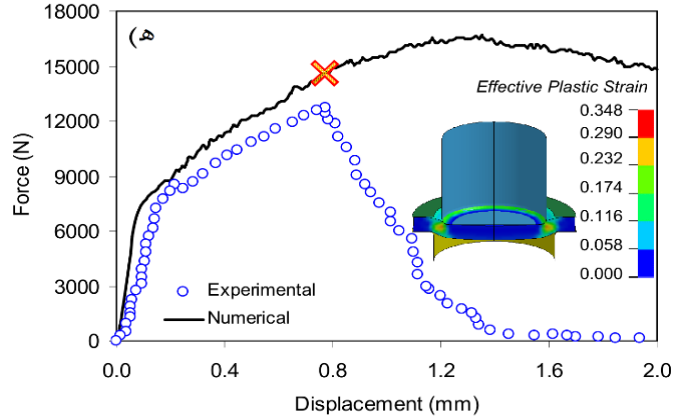
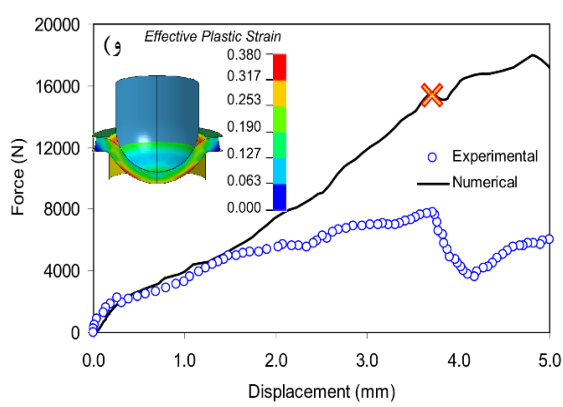
در این تحقیق از روش اجزاء محدود برای تخمین وابستگی کرنش پلاستیک شکست به حالت تنش در مدل آسیب گیسمو و میزان دقت این مدل در پیش‌بینی رفتار شکست ماده با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ال‌اس‌داینما استفاده شد. آزمون‌های تجربی انجام‌گرفته روی شش نمونه مورد آزمایش (نمونه‌های استاندارد کشش و فشار تک‌محوره، ناچ‌دار و آزمون پانچ) با استفاده از منحنی شکست کالیبره شده مدل آسیب گیسمو در نرم‌افزار ال‌اس‌داینما 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 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.

(سه محوری)، برای ماده مفروض در شکل ۷ نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رفتار این ماده را نمی‌توان با دقت مناسبی با استفاده از مدل جانسون-کوک (رابطه (۱)) بیان کرد. درحالی‌که مشاهدات تجربی رفتار شکست ماده به‌طور مستقیم در مدل گیسمو در نظر گرفته‌شده و از توابع ریاضی برای بیان آن استفاده نمی‌شود.

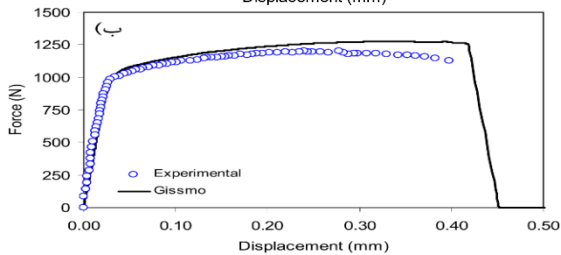
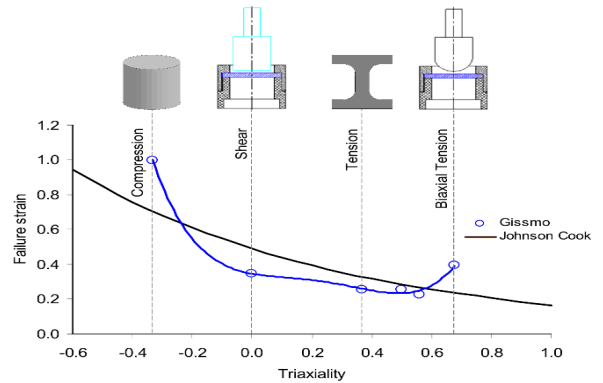
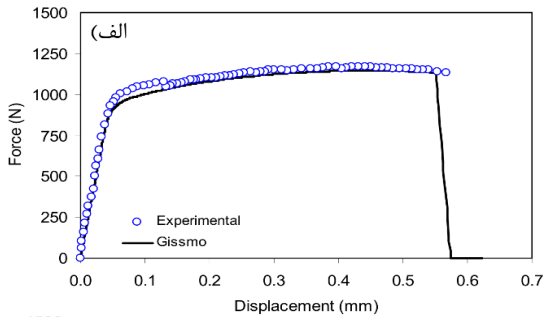
۳-۳- نتایج و بحث

نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد آزمون کشش تک‌محوره با در نظر گرفتن مدل آسیب گیسمو به همراه شکل شکست قطعه در شکل ۸ نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل آسیب گیسمو با دقت بسیار خوبی توانسته رفتار شکست ماده مفروض در حالت کشش تک‌محوره را پیش‌بینی کند. نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های ناچ‌دار و پانچ (برش و کشش دومحوره) با در نظر گرفتن مدل آسیب گیسمو در شکل ۹ نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودارهای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی به‌خوبی توانسته‌اند که رفتار شکست ماده را در حالت‌های تنش مختلف پیش‌بینی کنند.

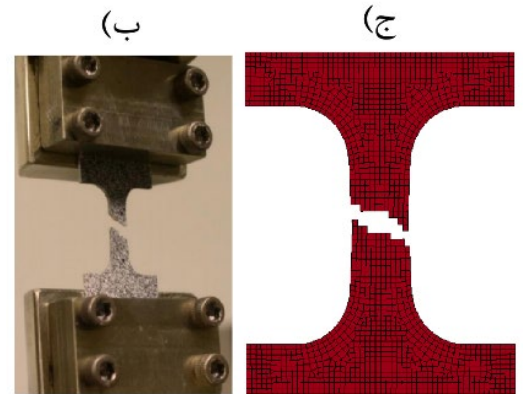
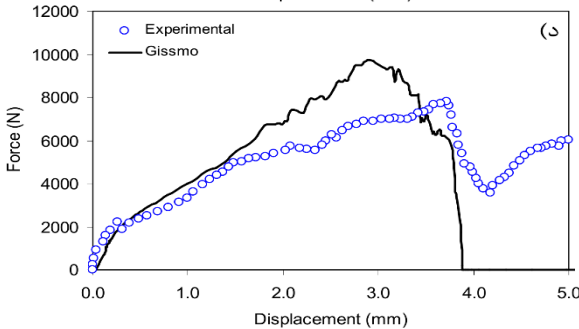
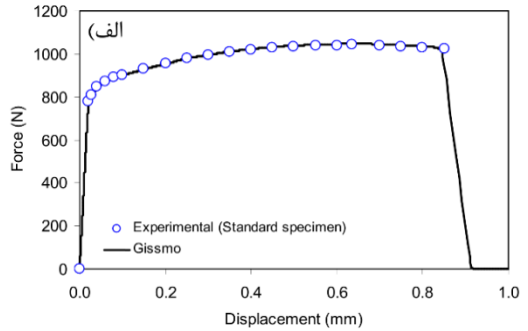
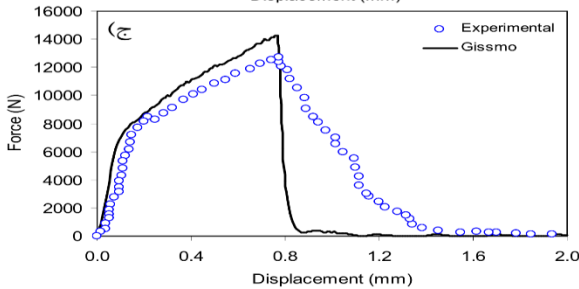




شکل (۶): نمودار نیرو-جابجایی به همراه کانتور کرنش پلاستیک در لحظه شکست قطعه: الف) کشش تک‌محوره؛ ب) ناچ‌دار (R:4.762)؛ ج) ناچ‌دار (R:1.984)؛ د) فشار تک‌محوره؛ ه) پانچ (برش)؛ و) پانچ (کشش دوماحوره).



شکل (۷): تغییرات کرنش پلاستیک شکست نسبت به حالت تنش.



شکل (۸): الف) نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد کشش تک‌محوره؛ ب) شکل شکست قطعه استاندارد در آزمون تجربی؛ ج) شبیه‌سازی با مدل شکست گیسمو.

شکل (۹): نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها با استفاده از مدل آسیب گیسمو: الف) نمونه ناچ‌دار (R:4.762)؛ ب) ناچ‌دار (R:1.984)؛ ج) پانچ (برش)؛ د) پانچ (کشش دوماحوره).

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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [7] Xiao Y, Hu Y. Numerical and experimental fracture study for 7003 aluminum alloy at different triaxialities. *Metals and Materials International*. 2021;27:2499-511.
- [8] Seidt JD. Plastic deformation and ductile fracture of 2024-T351 aluminum under various loading conditions. PhD Dissertation, The Ohio State University, 2010.