

## تعیین تجربی پارامترهای مدل آسیب نرم آلومینیوم ۵۰۸۳ و به‌کارگیری عددی مدل کالیبره‌شده

سجاد رسائی<sup>۱\*</sup>، داود الماسی<sup>۲</sup>، محمدرضا حیدری<sup>۳</sup>

استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

آمدرس مدعو، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

آدانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶

## چکیده

در این پژوهش رفتار مکانیکی و پدیده آسیب نرم آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ مطالعه شده و رابطه بین کرنش شکست و وضعیت تنش در محل گسیختگی، بر اساس مدل‌های آسیب کلاسیک جانسون-کوک، رایس-تریسی و هوپوترا ارائه گردیده‌است. بر اساس نتایج در محدوده تنش سه محوره مطالعه شده، تفاوت بین مدل‌ها ناچیز است و با دقت مناسب از هر کدام می‌توان استفاده کرد. کالیبره کردن مدل‌ها با استفاده از آزمون‌های تجربی روی نمونه‌های تخت و تخت شیاردار و با هدف ایجاد نسبت تنش سه محوره‌های مختلف در محل شیار، انجام شده است. با هدف بررسی نتایج مدل به‌دست آمده، مسئله در محیط نرم افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و نتایج آن با آزمون‌های تجربی مقایسه شده‌است. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و تجربی از همخوانی بسیار خوبی برخوردار بودند و بر اساس نتایج، مدل استخراج شده می‌تواند نیروی بیشینه را با حداکثر خطایی کمتر از ۲/۵٪ محاسبه کند.

**کلمات کلیدی:** آلومینیوم ۵۰۸۳؛ آسیب نرم؛ مدل جانسون-کوک؛ المان محدود.

## Experimental determination of the parameters of ductile damage model of aluminum 5083 and numerical application of the calibrated model

Sajjad Rasaei<sup>1,\*</sup>, Davoud Almasi<sup>2</sup>, Mohammad Reza Heidari<sup>3</sup><sup>1</sup> Asst. Prof., Mech. Eng., Kermanshah university of Technology., Kermanshah, Iran<sup>2</sup> Adjunct. Prof., Mech. Eng., Kermanshah university of Technology., Kermanshah, Iran<sup>3</sup> M.Sc. Student, Mech. Eng., Kermanshah university of Technology., Kermanshah, Iran

## Abstract

In this research, the mechanical behavior and the phenomenon of ductile damage of Al5083 are studied and the relationship between the fracture strain and the state of stress at the damage location is presented based on the classic damage models of Johnson-Cook, Rice-Tracy and Hooputra. Based on the results, in the studied stress triaxiality range, the difference between the models is insignificant and each of them can be used with reasonable accuracy. Calibrating of the models has been done using experimental results on the both smooth and notched flat specimens. In order to check the results of the obtained model, the process has been simulated in the Abaqus and its results have been compared with the experimental results. The results of the numerical and experimental simulations were in good agreement and based on them, the extracted model was able to predict the maximum force with the accuracy of  $\pm 2.5\%$ .

**Keywords:** Aluminum 5083; ductile Damage; Johnson-Cook Model; FEM analysis.

## ۱- مقدمه

فرآیند ساخت بخش عمده‌ای از تولیدات صنعتی در صنایع عظیم همچون خودروسازی، هوافضا و دریایی شامل فرآیند شکل‌دهی ورق‌های نازک فلزی است. این فرآیندهای شکل‌دهی همراه با تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگی هستند که تحلیل آن‌ها برای فهم میدان تغییر شکل دشوار و ضروری است. نازک شدن و گلوبی شدن موضعی، چین خوردگی و پارگی‌ها از جمله عیوب غیرقابل قبول حین شکل‌دهی ورق‌های نازک فلزی هستند که باید از ایجاد آن‌ها پرهیز کرد. در گذشته امکان ایجاد عیوب حین فرآیند شکل‌دهی، با انجام آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر بررسی می‌شد؛ درحالی‌که امروزه به کمک تحلیل‌های عددی بر اساس روش‌های مکانیک آسیب می‌توان امکان ایجاد این عیوب و محل‌های بحرانی برای شروع گسیختگی را پیش‌بینی کرد و به علت ایجاد آن‌ها نیز پی‌برد. دانستن آسیب حین تغییر شکل‌های پلاستیک در فرآیندهای شکل‌دهی برای اطمینان از عملکرد صحیح و امن تجهیزات و کاهش هزینه‌ها و زمان صرف‌شده برای انجام آزمایش‌ها ضروری است.

مدل‌های رفتاری بسیاری برای توصیف تنش سیلان و رفتار تغییر شکل مواد در شرایط مختلف بارگذاری پیشنهاد شده‌اند. به طور کلی ثابت‌های مدل رفتاری و یا مدل آسیب با انجام آزمون‌های مشخص و استاندارد مکانیکی تعیین می‌شوند. به دلیل ماهیت طبیعی مواد، پارامترهایی مانند ریزساختار اولیه (برای مثال جهت‌گیری دانه‌ها در جهت غلتک‌کاری)، دما و نرخ کرنش بر نتایج آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی تاثیر گذار هستند. اهمیت و کاربرد مدلهایی که بتوانند تنش سیلان و یا آسیب ایجاد شده را در محدوده وسیعی از کرنش‌ها، نرخ کرنش‌ها و دماهای بالا برای طراحی محصول نهایی به طور صحیح و قابل اعتماد پیش‌بینی کنند، انکار ناپذیر است. اگرچه مدل‌های رفتاری به انواع مختلفی، مانند فیزیکی، تجربی و نیمه تجربی، قابل تقسیم هستند هدف آن‌ها پیش‌بینی دقیق رفتار ماده است؛ بنابراین، ارائه مدل جدید و یا توسعه مدل‌های پیشین رفتار مواد برای فرآیند طراحی ضروری است تا رفتار تغییر شکل ماده در نرخ کرنش‌های بالا و دماهای مختلف به درستی تعیین شود. در بین این مدل‌ها، مدل جانسون-کوک که شامل متغیرهای کرنش سختی، نرخ کرنش سختی و نرم شوندگی دمایی است، به دلیل امکان کالیبره کردن مدل و

محاسبه پارامترهای ثابت آن با انجام آزمایش کمتر، به طور گسترده استفاده شده و در اکثر ابزارهای شبیه‌سازی المان محدود تجاری، به طور پیش‌فرض برای مدلسازی رفتاری مواد گنجانده شده است.

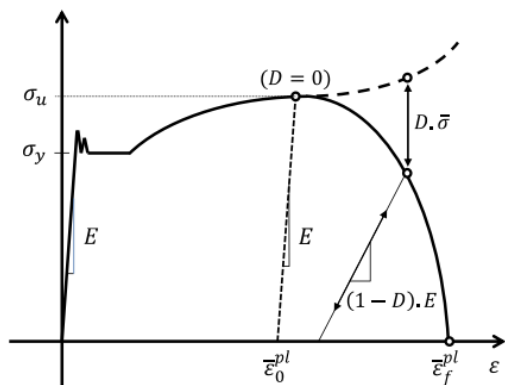
آویرال و همکاران [۱] روشی را با استفاده از الگوریتم جستجوی Levenberg-Marquardt برای شناسایی پارامترهای جانسون-کوک مواد به روش معکوس پیشنهاد کردند. آن‌ها مجموعه‌ای از پارامترهای جانسون-کوک را برای توسعه یک مدل المان محدود مناسب برای شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری ارائه کردند و سپس، از روش شناسایی معکوس برای محاسبه مقادیر ثابت‌های این مدل استفاده کردند. برای تخمین مقادیر ثابت‌ها از مورفولوژی براده‌ها و نیروی برش در طول فرآیند استفاده کردند و نتیجه گرفتند که امکان شناسایی مجدد پارامترهای مدل با روش‌های معکوس وجود دارد با این حال پارامترهای برآورد شده از نتایج شبیه‌سازی تقریباً با مدل کلاسیک اصلی یکسان بودند. گامبیراسیو و همکاران [۲] روش‌های مختلفی را برای کالیبراسیون پارامترهای مدل جانسون-کوک تحت پدیده نرخ کرنش بالا با بیان رفتار انحرافی مواد الاستو پلاستیک ارائه دادند. علاوه بر این، آن‌ها از داده‌های آزمون ضربه تیلور نیز برای ارزیابی پارامترهای مدل جانسون-کوک بهره گرفتند [۳]. ایشان همچنین یک مدل قدرتمند جدید دوبخشی بر اساس مدل جانسون-کوک، برای پیش‌بینی تنش جریان ماده معرفی کردند و نشان دادند که مدل جدید انسجام بیشتری در توصیف رفتار پلاستیک مواد دارد و به طور قابل توجهی بهتر از مدل استاندارد جانسون-کوک است.

شکست جامدات شکل پذیر اغلب ناشی از رشد و ادغام حفره‌های میکروسکوپی است و تحت فرآیند برهم نهی تنش‌های کششی هیدرواستاتیک در حوضه تغییر شکل پلاستیک تقویت می‌شود. رشد حفره‌ها همواره به عنوان یک مشکل در پلاستیسیته مطرح می‌شود. رایس و تریسی [۴] رشد حفره‌ها تحت بارگذاری هیدرواستاتیک را بررسی کرده‌اند. ایشان ابتدا میدان جریان در یک ماده غیرقابل تراکم را تعیین کردند که حاوی یک خلأ یا حفره داخلی است و تحت یک میدان تنش و کرنش کاملاً یکنواخت است؛ سپس با استفاده از روش رایلی-ریتز بزرگ شدن یک حفره‌ی کرووی مستقل در یک ماده سخت نشده را تحلیل کردند و در نهایت یک رابطه‌ی نمایی ساده برای کرنش شکست برحسب تنش سه محوره ارائه نمودند.

آلومینیوم ۷۰۱۷ استفاده کردند. بر اساس نتایج آن‌ها پیش‌بینی‌های مدل ANN با داده‌های تجربی نسبت به مدل جانسون-کوک، برای همه نرخ‌های کرنش و دماها سازگارتر است. میلانی و همکاران [۱۰] از یک استراتژی شناسایی چند منظوره وزنی برای تخمین پارامترهای مدل جانسون-کوک دو ماده سوپر آلیاژ Nitronic 33 و Ti-6Al-4V استفاده کردند که اغلب در مدل‌های المان محدود استفاده می‌شوند. روند پیشنهادی ایشان از نظر کاهش تعداد آزمایش‌های لازم برای شناسایی پارامترهای مدل قابل توجه بود. مجذوبی و همکاران [۱۱] به جای انجام آزمایش‌های معمولی که زمان و هزینه زیادی دارند، از رویکرد بهینه سازی استفاده کردند و مدل آسیب برآورد شده توسط آن‌ها تطابق خوبی با پیش‌بینی‌های تجربی و المان محدود داشت. بانرجی و همکاران [۱۲، ۱۳] رفتار معمول فولادهای زرهی در شرایط مختلف بارگذاری دینامیکی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل ساختاری و آسیب جانسون-کوک توسعه یافته آن‌ها با نتایج شبیه‌سازی آزمایش ضربه شاریپی و نتایج تجربی تطابق منطقی و خوبی داشتند. بوزیورکین و همکاران [۱۴] رفتار شکست آلیاژهای تیتانیوم را بر اساس داده‌های تجربی که از شرایط بارگذاری دینامیکی مختلف بدست آمده، بررسی کردند. ایشان پارامترهای مدل جانسون-کوک را تعیین کردند و در شبیه سازی المان محدود برای شبیه‌سازی مشکل فن موتور هواپیما گنجاندند. ژانگ و همکاران [۱۵] فرآیند خشن تراشی را برای پیش‌بینی اثرات پارامترهای برش و هندسه ابزار با استفاده از مدل آسیب جانسون-کوک مورد بررسی قرار دادند و به نتایج مناسبی دست یافتند. لیو و همکاران [۱۶] فرآیند برش فلز را با شش مدل شکست نرم برای شناسایی مدل شکست مناسب ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که بهترین نتایج مربوط به پیش‌بینی آسیب بر اساس مدل شکست Bao-Wierzbicki است که به نرخ کرنش، دما و رفتار تکاملی آسیب وابسته است. مشایخی و همکاران [۱۷] مدلی را برای پیش‌بینی فرآیند آسیب الاستوپلاستیک در آلیاژ فولاد A533 ارائه دادند و همچنین توانستند با استفاده از این مدل با دقت مناسبی شکست در نمونه دارای ترک را نیز تخمین بزنند. اگرچه مطالعات بسیار زیادی در زمینه استخراج مدل‌های رفتاری و آسیب انجام شده‌اند، اما نتایج آن‌ها به دلایل مختلفی با یکدیگر متفاوت بوده است. برخی از این دلایل به نحوه انجام و تحلیل

بای و همکاران [۵، ۶] با استفاده از مطالعات نظری و تجربی نشان دادند که تنش سه محوره یک پارامتر کلیدی در کنترل دامنه کرنش شکست است. ایشان [۵] از نمونه‌های گرد شیاردار با نسبت‌های تنش سه محوره مختلف برای مطالعه شکست استفاده کردند. بر اساس نتایج ایشان با استفاده از این نمونه‌ها تنها محدوده کوچکی از نسبت‌های تنش سه‌محوره در دسترس است. آن‌ها همچنین با شبیه‌سازی المان محدود دو گروه آزمایشی مختلف یک مدل سه‌بعدی از مکان هندسی شکست ارائه دادند [۶]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که علاوه بر نسبت تنش سه‌محوره، پارامتر اثر نامتغیر سوم تانسور تنش انحرافی نیز باید در توصیف شکست مواد شکل‌پذیر گنجانده شود. بر اساس نتایج ایشان محل شکست در شرایط بارگذاری مختلف توسط پارامترهای نسبت تنش سه‌محوره و پارامتر اثر نامتغیر سوم تانسور تنش انحرافی مشخص می‌شود و با استفاده همزمان قانون انباشت آسیب، مدل شکست نرم پیشنهادی ایشان توانست در شرایط بارگذاری مختلف شکست را با دقت مناسب پیش‌بینی کند. باو و همکاران [۷] با انجام آزمون‌های گسترده روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ حرارت دیده تلاش کردند تا مکان هندسی کرنش شکست را در حالت‌های مختلف نسبت تنش سه محوره به‌دست آورند. آن‌ها آزمون‌های برش، آزمون کشش ساده و آزمون فشار را مورد بررسی قرار داده و برای بازه‌های مختلف نسبت تنش سه محوره، رابطه‌ای برای ارتباط کرنش شکست و نسبت تنش سه‌محوره ارائه نمودند؛ نتایج آن‌ها نشان داد که سه تابع مختلف برای این ارتباط در بازه‌های مختلف وجود دارد. هوپوترا و همکاران [۸] یک رویکرد جامع برای پیش‌بینی شکست در یک جزء بر اساس تنش و کرنش-های ماکروسکوپی ارائه کردند که در آن از مکانیزم‌های شکست گلوبی شدن (به دلیل ناپایداری‌های موضعی)، شکست مواد شکل‌پذیر و شکست برشی استفاده می‌شد. همه معیارهای شکست به گونه‌ای توسعه داده شدند که تأثیر مسیرهای کرنش غیرخطی را نیز شامل شوند؛ سپس اثربخشی این رویکرد در پیش‌بینی شکست با مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی آزمایش خمش سه نقطه‌ای و فشار محوری مورد بحث قرار گرفت. بوبیلی و همکاران [۹] از یک مدل رفتاری بر اساس شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل جانسون-کوک برای پیش‌بینی رفتار مواد در شرایط نرخ کرنش بالا، بر اساس آزمایش‌های هاپکینسون در دماهای مختلف، برای آلیاژ

است. بر اساس روش مکانیک شکست سنتی، مدلسازی گسیختگی در سه مرحله انجام می‌شود. ابتدا بر اساس هندسه مساله، تاریخچه بارگذاری و شرایط اولیه، تحلیل تنش انجام می‌شود سپس با استفاده از معادلات سازگاری آسیب و تاریخچه تنش و کرنش‌ها نقاط بحرانی شناسایی می‌شوند و در نهایت سیر آغاز پیدایش ترک تا گسیختگی نهایی قطعه توسط مفاهیم مکانیک شکست تحلیل می‌شوند. روش‌های مکانیک شکست به تحلیل قطعات دارای ترک می‌پردازند و بر رفتار محلی رشد ترک متمرکز هستند، بنابراین برای تحلیل گسیختگی سازه‌ها در مقیاس بزرگ مناسب نیستند. درحالی‌که، مکانیک آسیب، هنگامیکه با تحلیل المان محدود همبسته می‌شود، می‌تواند الگویی تقریبی از شکست ارائه دهد که برای مقیاس سازه‌های بزرگ نیز مناسب باشد. شکل ۱ رفتار تنش-کرنش مشخصه یک ماده شکل‌پذیر با تخریب ناشی از تجمع آسیب را نشان می‌دهد. منحنی خط‌چین نشان دهنده واکنش کلی ماده بدون تعریف آسیب است، درحالی‌که خط ممتد مربوط به رابطه تنش-کرنش ماده آسیب دیده‌است. در این شکل،  $\sigma_u$  و  $\bar{\epsilon}_0^{pl}$  استحکام نهایی و کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب هستند، در حالی که  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$  کرنش پلاستیک معادل گسیختگی است.



شکل ۱- منحنی تنش-کرنش با آسیب پیش‌رونده [۱۸]

مکانیک آسیب ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی و مطالعه فرآیند شکست و گسیختگی در قطعات مختلف مکانیکی و به ویژه تحلیل علت شکل‌گیری عیوب در محصولات فرآیندهای شکل‌دهی فلزات است. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی آغاز و توسعه آسیب در فرآیندهای مختلف مکانیکی ارائه شده‌اند که یکی از پرکاربردترین آن‌ها، روش آسیب نرم است. در یک

آماری نتایج، مانند عدم تکرار کافی آزمایش‌ها برای اطمینان از ثبات نتایج بدست آمده، مربوط بوده است.

امروزه در صنایع مختلف مواد با استحکام بالا و وزن کم کاربردهای فراوانی یافته‌اند و در بین همه مواد فلزی آلیاژهای آلومینیوم به دلیل ویژگی‌ها و خواص مکانیکی یکی از پرکاربردترین‌ها هستند. آلیاژهای سری ۵۰۰۰ کرنش سختی پذیر بوده و به دلیل مقاومت به خوردگی مناسب، حتی در آب شور، چقرمگی بالا در دماهای پایین، استحکام و شکل‌پذیری بالا به طور گسترده در صنایع دریایی، شیمیایی و غذایی کاربرد دارند. در این پژوهش مدل آسیب جانسون-کوک برای آلیاژ ۵۰۸۳ آلومینیوم با استفاده از آزمون‌های استاندارد تجربی کالیبره شده و کارایی آن در شبیه‌سازی گسیختگی نمونه‌های استاندارد صحت سنجی شده‌است. علاوه بر این مدل استاندارد، ثابت‌های ماده مربوط به مدل‌های معروف رایس-تریسی و هوپوترا نیز استخراج شده و نتایج این مدل‌ها با مدل استاندارد جانسون-کوک مقایسه شده‌اند. به این منظور آزمون‌های کشش استاندارد با استفاده از نمونه‌های تخت و تخت-شیاردار، با شعاع شیارهای مختلف، برای تعیین کرنش شکست انجام شده و ثابت‌های مدل با استفاده از داده‌های آزمون تجربی تعیین و مدل کالیبره شده‌است. با شبیه‌سازی آزمون‌های انجام شده در محیط نرم‌افزار آباکوس با استفاده از مدل ارائه شده و تعیین نمودار نیرو-جابجایی با استفاده از نرم‌افزار و مقایسه آن‌ها با داده‌های تجربی، دقت و کارایی مدل ارائه شده سنجیده شده‌است.

## ۲- رفتار ماده

### مدلسازی رفتار ماده

آلومینیوم‌ها از جمله آشناترین مواد شکل‌پذیر هستند. رفتار معمول آن‌ها شامل یک پاسخ خطی اولیه تا رسیدن به تنش تسلیم و به دنبال آن، رفتاری غیرخطی همراه با کاهش سفتی است. انرژی کرنش انباشته شده در ماده با رسیدن به نقطه ناپایداری، جایی که تنش به مقدار بیشینه می‌رسد، آزاد می‌شود (شکل ۱). از این نقطه به بعد، ماده به تدریج استحکام و سفتی خود را تا زمان گسیختگی نهایی از دست می‌دهد.

امکان پیش‌بینی دقیق زمان و محل گسیختگی در سازه‌ها و قطعات تحت بار نکته مهمی است که موضوع تحقیقات بسیاری بوده و از روش‌های مختلفی برای آن استفاده شده

و محدوده  $\bar{\theta}$  به صورت  $-1 \leq \xi \leq 1$  است. کلیه حالات تنش را می توان با پارامترهای  $(\eta, \bar{\theta})$  تعیین وضعیت کرد. مشاهده می شود که  $\bar{\theta} = 1$  نشان دهنده وضعیت کشش متقارن محوری،  $\bar{\theta} = 0$  نشان دهنده وضعیت کرنش صفحه ای یا برش عمومی و  $\bar{\theta} = -1$  نشان دهنده فشار متقارن محوری است. وضعیت تنش صفحه ای مورد توجه ویژه ای قرار گرفته است و ویرزبیک [۱۹] نشان داده است که شرایط تنش صفحه ای به طور یگانه به وسیله یکی از پارامترهای  $\xi$  و  $\eta$  یا  $\bar{\theta}$  مطابق رابطه زیر قابل بیان است:

$$\xi = \cos \left[ \frac{\pi}{2} (1 - \bar{\theta}) \right] = -\frac{27}{2} \eta \left( \eta^2 - \frac{1}{3} \right) \quad (5)$$

بر اساس فرضیات اساسی در مدل آسیب نرم، نسبت تنش سه محوره مهمترین عامل کرنش شکست ماده است. بر این اساس مقدار کرنش ایجاد شده در ماده تا پیش از شکست، تابعی از نسبت تنش سه محوره ای وارد شده به ماده است و مقدار پارامتر آسیب در هر مرحله از بارگذاری محاسبه می شود. با تعیین مقدار لحظه ای پارامتر آسیب (D) و همچنین در صورت مشخص بودن مقدار پارامتر آسیب بحرانی برای ماده ای مورد نظر، زمان و محل پیدایش ترک ها و همچنین مکان احتمالی گسیختگی و شکست را می توان پیش بینی کرد. پارامتر آسیب با استفاده از تابع کرنش شکست بر حسب نسبت تنش سه محوره و همچنین برای  $\bar{\theta}$  مشخص، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$D = \int \frac{d\bar{\epsilon}_{pl}}{\bar{\epsilon}_{pl,D}(\eta, \bar{\theta}, \dot{\epsilon})} \quad (6)$$

در عبارت فوق  $\bar{\epsilon}_{pl,D}$  کرنش معادل پلاستیک در آغاز آسیب است که تابعی از نسبت تنش سه محوره، نرخ کرنش و پارامتر نامتغیر سوم تانسور تنش انحرافی است. برای بهره گرفتن از مکانیک آسیب ابتدا باید ارتباط نسبت تنش سه محوره و کرنش شکست مشخص شود که موضوع پژوهش های متعددی بوده است. پرکاربردترین روابط ارائه شده برای این موضوع معیارهای رایس-تریسی [۴]، جانسون-کوک [۲۰] و هوپوترا [۸] هستند. بر اساس معیارهای رایس-تریسی و جانسون-کوک به ترتیب از روابط زیر برای بیان ارتباط بین نسبت تنش سه محوره و کرنش شکست استفاده می شود:

فرآیند شکل دهی، رفتار شکست نرم تحت تأثیر کرنش قابل تحمل ماده است و اگر کرنش در ماده به کرنش شکست برسد آسیب ایجاد خواهد شد. کرنش در ماده تابع پارامترهای مختلفی از جمله حالت تنش است. برای ارزیابی حالت تنش از پارامتر نسبت تنش سه محوره مطابق رابطه زیر استفاده می شود:

$$\eta = \frac{-p}{q} = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (1)$$

که پارامترهای  $\sigma_m$  و  $\bar{\sigma}$  به ترتیب تنش میانگین و تنش معادل هستند و مطابق رابطه زیر تعریف می شوند:

$$p = -\sigma_m = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \\ q = \bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2)$$

که  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  تنش های اصلی هستند و فرض شده است که  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  باشد.

اگر ماده ایزوتروپیک فرض شود، آنگاه مدلسازی ماده می تواند بر اساس سه نامتغیر تانسور تنش فرموله شود که به صورت  $r = \left[ \frac{27}{2} (\sigma_1 - \sigma_m)(\sigma_2 - \sigma_m)(\sigma_3 - \sigma_m) \right]^{1/3}$  مشخص می شود:

دومین پارامتر مهم، پارامتر اثر نامتغیر سوم تانسور تنش انحرافی،  $\theta$  است که مطابق با رابطه زیر به سومین نامتغیر نرمالیزه شده تنش  $\xi$ ، مرتبط است:

$$\xi = \left( \frac{r}{q} \right)^3 = \cos(3\theta) \quad (3)$$

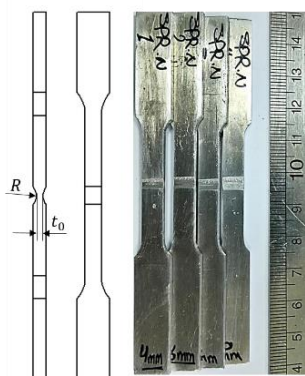
از آنجا که  $\theta$  در محدوده  $0 \leq \theta \leq \pi/3$  است، پارامتر  $\xi$  نیز در محدوده  $-1 \leq \xi \leq 1$  خواهد بود.

حالت تنش در یک نقطه از یک ماده همسانگرد را می توان در سه سیستم مختصات کارتزین، استوانه ای و کروی تعریف کرد، و تنش معادل  $\bar{\sigma}$ ، با رابطه کارسختی به کرنش معادل  $\bar{\epsilon}$ ، مرتبط است. علاوه بر این  $\theta$  مطابق رابطه زیر نرمالیزه می شود:

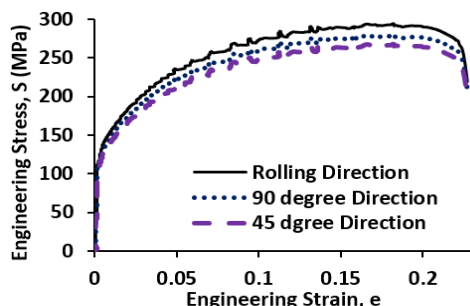
$$\bar{\theta} = 1 - \frac{6\theta}{\pi} = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos \xi \quad (4)$$

شده‌اند. همچنین برای مطالعه آماری صحیح و دقیق، هریک از آزمون‌ها سه مرتبه تکرار شده‌اند. آزمون‌های کشش با استفاده از دستگاه کشش سروالکتریکال سنتام مدل STM 150 به روش جابجایی کنترل و با سرعت کم 0.01 mm/s انجام شده‌اند. نمودار تنش-کرنش مهندسی نمونه‌ها در سه راستای تعیین شده در شکل ۳، و نمودار تنش-کرنش حقیقی ماده در شکل ۴ نشان داده شده‌است. مقادیر تنش-کرنش حقیقی با استفاده از مقادیر مهندسی و با فرض ثابت بودن حجم حین تغییر شکل پلاستیک بدست آمده‌اند که این مقادیر تا رسیدن نمونه به نقطه گلوبی شدن و خاتمه تغییر شکل یکنواخت معتبر خواهند بود. همچنین، برای بیان ارتباط تنش-کرنش پلاستیک حقیقی از رابطه‌ی نمایی مطابق با معادله ۱۱ استفاده شده‌است. خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم استفاده شده، به صورت جدول ۱ محاسبه شده‌اند.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (11)$$



شکل ۲- نمونه‌های آماده شده برای آزمایش، هندسه نمونه و نمونه‌های ساخته شده



شکل ۳- منحنی تنش-کرنش مهندسی آلیاژ ۵۰۸۳ آلومینیوم

$$\varepsilon_f = c_1 \exp(-c_2 \eta) \quad (7)$$

$$\varepsilon_f = d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta) \quad (8)$$

در روابط فوق c و d ها ثوابت ماده هستند که از آزمایش تعیین می‌شوند. در مدل هوپوترا نیز مطابق رابطه زیر، کرنش شکست پلاستیک با تابعی نمایی به نسبت تنش سه محوره مرتبط می‌شود.

$$\varepsilon_f = A e^{c\eta} + B e^{-c\eta} \quad (9)$$

که در این رابطه نیز A، B و c ثابت‌های معیار آسیب ماده هستند و بر اساس آزمون‌های تجربی تعیین می‌شوند. برای محاسبه مقادیر ثابت‌های ماده در مدل‌های آسیب از آزمون‌های متنوعی با نمونه‌های کشش مدور و تخت دارای شیار، در حالت‌های کشش متقارن، تخت دارای شیار در حالت کرنش صفحه‌ای، نمونه‌های پروانه‌ای برای حالت برش و نمونه‌های استوانه‌ای برای حالت فشار استفاده می‌شود. برای نمونه تخت شیاردار و در حالت کرنش صفحه‌ای، نسبت تنش سه محوره بر حسب پارامترهای هندسی شیار از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۵].

$$\eta = \frac{\sqrt{3}}{3} \left[ 1 + 2 \ln \left( 1 + \frac{t_0}{4R} \right) \right] \quad (10)$$

در این عبارت  $t_0$  ضخامت اولیه نمونه و R شعاع شیار ایجاد شده در نمونه است و نسبت تنش سه محوره در میانه نمونه تابعی از شعاع شیار است.

### مطالعه تجربی

در این مطالعه برای کالیبره کردن ثابت‌های مدل مجموعه‌ای از آزمون‌های کشش استاندارد استفاده شده‌است. آزمون‌ها مطابق با استاندارد ASTM E8 و روی ورق‌های تخت ساده برای تعیین خواص مکانیکی ماده، و تخت‌شیاردار با شعاع شیار مختلف در بخش میانی به شعاع‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر، برای تعیین ارتباط بین نسبت تنش سه محوره و کرنش شکست، انجام شده‌اند که در شکل ۲ هندسه و ابعاد نمونه‌ها نشان داده شده‌است. نمونه‌ها از ورقی به ابعاد ۱×۲ متر، با استفاده از روش وایرکات و در سه امتداد طولی ورق (راستای غلتک‌کاری)، راستای ۴۵ درجه و ۹۰ درجه بریده و آماده‌سازی

جدول آمده اند و بر اساس این مقادیر دقت نمودارهای انطباق یافته کاملاً مناسب بوده است.

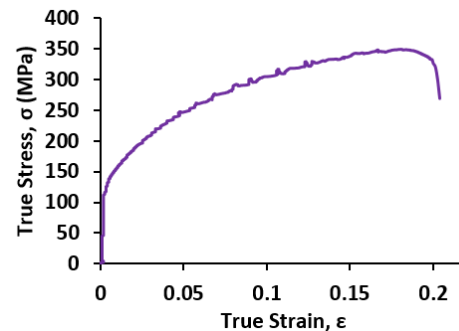
جدول ۲- مشخصه‌های ابعادی و نتایج آزمون نمونه‌های تخت ساده و شیاردار

Sample Number	Notch Radius (mm)	Thickness s (mm)	$t_d$ (mm)	$t_f$ (mm)	Width (mm)
SP.N 0	-	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۶۸	۶/۲۱
SPR.N 1	۲	۱/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۳	۶/۱۸
SPR.N 2	۳	۱/۹۸	۱/۱۸	۰/۹۹	۶/۲۵
SPR.N 3	۴	۱/۹۸	۱/۳۳	۱/۱۶	۶/۱۷
SPR.N 4	۵	۱/۹۸	۱/۲۳	۱/۰۸	۶/۳

جدول ۳- جزئیات مدل‌های آسیب، ثابت‌های ماده استخراج شده

Rice-Tracey Damage Model: $\epsilon_f = ae^{b\eta}$			
a	B	Correlation coefficient	
۱/۲۴۶	-۳/۱۶۵	۰/۹۳	
Johnson-Cook Damage Model: $\epsilon_f = ae^{b\eta} - c$			
a	b	C	Correlation coefficient
۱۸/۶۶	-۰/۰۴۶	۱۷/۹۴	۰/۹۶
Hooputra Damage Model: $\epsilon_f = ae^{c\eta} + be^{-c\eta}$			
a	b	C	Correlation coefficient
-۱/۷۹۳	۲/۵۱۱	۰/۱۹۸	۰/۹۵

از مقایسه نتایج بدست آمده برای مدل‌های مختلف با نتایج تجربی، نمودار شکل ۵، می‌توان دید که هر سه مدل تقریباً پیش‌بینی مشابه به هم دارند؛ بنابراین بدون اختلاف چشمگیر می‌توان از هر یک از این مدل‌ها در بازه نسبت تنش سه‌محوره‌ای استفاده کرد که در شکل ۵ نشان داده شده‌است.



شکل ۴- منحنی تنش- کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳

جدول ۱- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ استفاده شده

مقدار	خواص مکانیکی
۷۲ GPa	مدول الاستیک (E)
۰/۳۳	ضریب پواسون (ν)
۱۰۸ MPa	تنش تسلیم (σ <sub>0</sub> )
۵۴۱ MPa	ضریب کار سختی (K)
۰/۲۶	توان کار سختی (n)

از رابطه‌ای که توسط Bai و همکاران [۵] پیشنهاد شده برای محاسبه کرنش شکست نمونه تخت (رابطه ۱۲) و از رابطه ارائه شده توسط Lee و همکاران [۲۱] (رابطه ۱۳)، برای محاسبه کرنش شکست نمونه‌های تخت-شیاردار استفاده شده‌است که در این روابط  $t_0$  و  $t_f$  به ترتیب ضخامت ابتدایی و نهایی نمونه و  $n$  توان کار سختی ماده هستند. برای اندازه گیری مقادیر نهایی (ابعاد پس از شکست)، تصاویری با میکروسکوپ نوری و بزرگنمایی مناسب از مقطع تهیه شده و پس از کالیبره کردن تصویر مقادیر مورد نیاز اندازه‌گیری شده اند. نتایج بدست آمده در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

$$\epsilon_f = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left( \frac{t_0}{t_f} \right) + \frac{2n}{\sqrt{3}} (\sqrt{3} - 1) \quad (12)$$

$$\epsilon_f = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left( \frac{t_0}{t_f} \right) \quad (13)$$

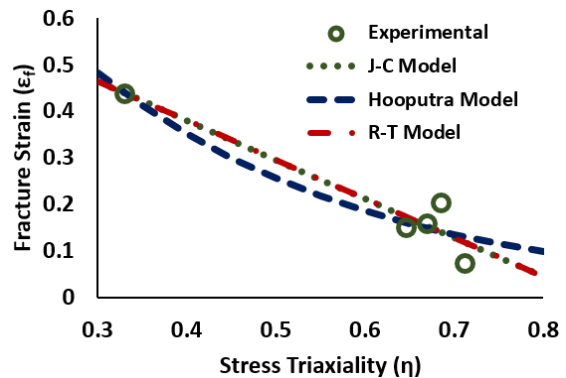
در نهایت ارتباط بین نسبت تنش سه‌محوره و کرنش شکست با استفاده از انطباق و برازش منحنی تعیین می‌شود، که مقادیر ثابت‌های معیارهای رایس-تریسی، جانسون-کوک و هوپوترا مطابق جدول ۳ محاسبه شده‌اند، همچنین مقادیر ضرایب همبستگی در برازش منحنی‌های مختلف نیز در این

دستگاه قرار دارند به این نقطه مرجع با قید Tie متصل شده اند، درحالیکه انتهای پایینی ثابت است. صحت‌سنجی و مقدار دقت شبیه سازی از مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمون های تجربی بدست آمده‌است. به این منظور پاسخ نیرو-جابجایی و مقدار جابجایی پیش از گسیختگی به عنوان پارامترهای کنترل صحت نتایج در نظر گرفته شده‌اند. در همه مدل‌ها دقت و همگرایی شبکه المان‌ها بررسی شده و پس از تایید، نتایج نهایی تعیین شده‌اند.

در شکل ۶ الف نمودار نیرو-جابجایی تجربی و عددی برای نمونه تخت نشان داده شده است. نمودارهای همگرایی نشان می‌دهند که مدل‌سازی با تعداد ۴۸۹۶ المان با دقت بسیار بالایی (خطایی کمتر از ۱٪) توانسته است نیروی بیشینه را پیش بینی کند، اگرچه در پیش‌بینی مقدار جابجایی در گسیختگی دارای دقت کمتری است (خطایی در حدود ۸.۶٪). در شکل ۶ ب نتایج تاثیر در نظر گرفتن مدل آسیب به همراه مقایسه ظاهری نمونه‌های تجربی و شبیه‌سازی شده، نشان داده شده‌اند؛ تاثیر اعمال مدل آسیب بر شبیه‌سازی چشمگیر بوده است و بدون اعمال آن نمی‌توان به درستی فرآیند را شبیه سازی کرد و همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، در حالتی که معیار آسیب لحاظ نشده نمودار نیرو-جابجایی دارای هیچ محدودیتی نیست و بارگذاری می‌تواند ادامه داشته باشد. همچنین همانطور که از شکل نیز مشخص است، محل و الگوی شکست کاملاً با نمونه تجربی همخوانی دارد.

شکل ۷ پاسخ نیرو-جابجایی نمونه با شیار به شعاع 2mm را در ازای تعداد المان‌های مختلف نشان داده شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که مدل‌سازی با تعداد 4080 المان دقت مناسبی خواهد داشت و مقدار نیروی بیشینه و جابجایی در شکست را به درستی پیش‌بینی کرده است. همچنین برای سایر نمونه‌ها با شیار به شعاع 3mm، 4mm و 5mm نیز تعداد مناسب المان تعیین گردیده و نمودار نیرو-جابجایی تجربی و عددی مقایسه شده‌اند که نتایج آن‌ها به ترتیب در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. با بررسی ظاهری نمونه‌های شکست، همانطور که در شکل‌ها مشخص است، انطباق محل و شکل گسیختگی نمونه‌ها کاملاً با نمونه های تجربی همخوانی دارد.

به طور کلی مدل ارائه شده توانسته است، مقادیر نیروی بیشینه را با دقت بهتری محاسبه کند، اما تعیین مقدار



شکل ۵- نتایج آزمون‌های تجربی و منحنی‌های بدست آمده از معادلات شکست بدست آمده از تئوری‌های مختلف

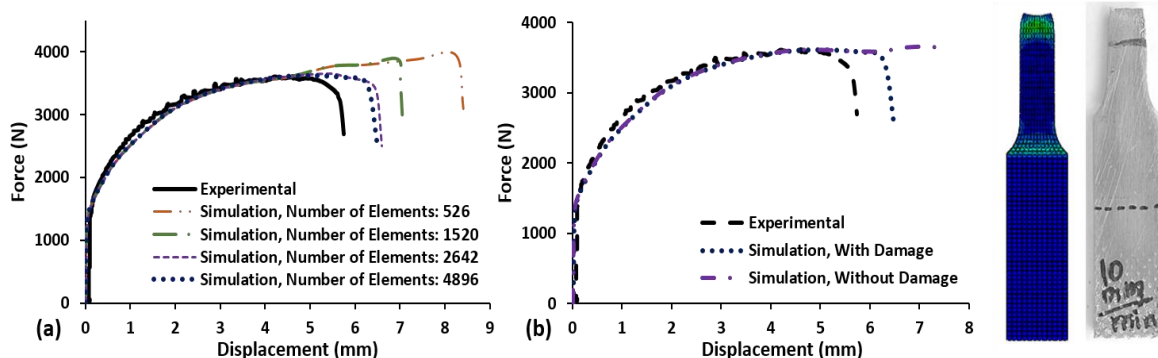
### مطالعه عددی

با شبیه‌سازی عددی آزمون‌های انجام شده در محیط نرم‌افزار المان محدود آباکوس که با استفاده از مدل‌های کالیبره شده انجام گرفته، صحت و مقدار دقت مدل بررسی شده‌است. در بخش قبل نشان داده شد که مدل‌ها در محدوده نسبت تنش سه محوره مورد بررسی، نتایج بسیار مشابهی را نشان داده‌اند، همچنین مدل آسیب جانسون-کوک نیز به طور پیش‌فرض در نرم‌افزار المان محدود آباکوس موجود است، به همین دلایل از این مدل در شبیه‌سازی‌ها بهره گرفته شده‌است. خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم استفاده شده مطابق با جدول ۱ و رفتار غیر خطی ماده حین تغییر شکل پلاستیک براساس نمودار تنش-کرنش حقیقی آن و به صورت شکل ۴ در نظر گرفته شده‌اند. در فرآیند شبیه‌سازی آسیب پیش‌رونده در محیط نرم‌افزار، با رسیدن پارامتر آسیب در هر المان به مقدار بحرانی آن المان حذف می‌گردد. در این مطالعه از پارامتر جابجایی در لحظه شکست به عنوان پارامتر بحرانی آسیب استفاده شده‌است. مقدار جابجایی در لحظه شکست به نتایج آزمون‌ها (کرنش در آغاز فرآیند آسیب و همچنین کرنش در لحظه شکست) و ابعاد المان‌های استفاده شده در شبکه وابسته است و مقدار 0.03mm برای آن تعیین شده‌است. به دلیل سادگی مدل، کل هندسه مدل‌سازی شده‌است. مدل‌ها با المان‌های ۸ گره‌ای مکعبی C3D8R شبکه‌بندی شده و برای تحلیل مسأله از حلگر صریح استفاده شده‌است. بار به صورت جابجایی یک نقطه مرجع در مرکز انتهای بالایی نمونه و در شرایط استاتیکی در نظر گرفته شده است؛ بخش‌هایی از نمونه که در داخل فک

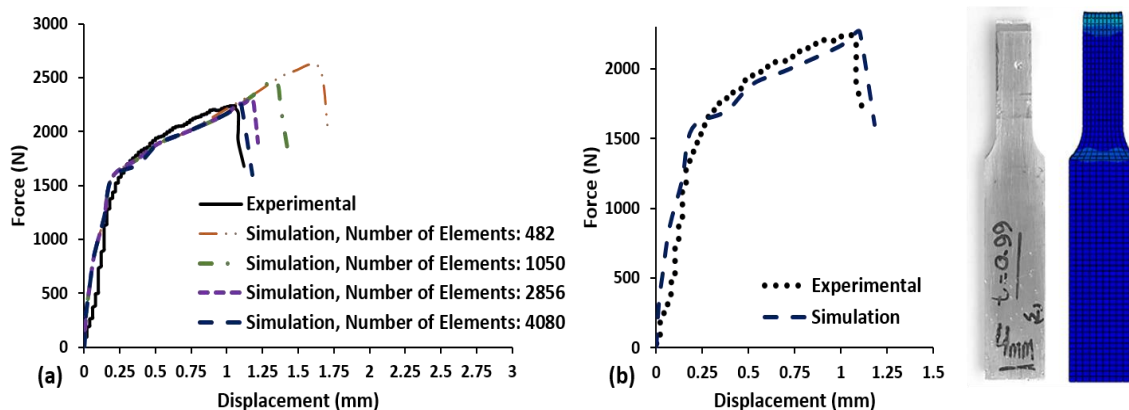


نمونه‌های تخت شیاردار که دارای شیار عرضی می‌باشند به عنوان نمونه‌های کرنش صفحه‌ای شناخته می‌شوند که معیار و معادلات ارائه شده در این پژوهش نیز بر مبنای همین نمونه‌ها استخراج شده است و حالت کرنش صفحه‌ای محافظه کارانه‌ترین حالت در شروع فرایند آسیب است، در حالیکه نمونه‌های مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها کم پهن بودند که به وضعیت تنش صفحه‌ای نزدیک است.

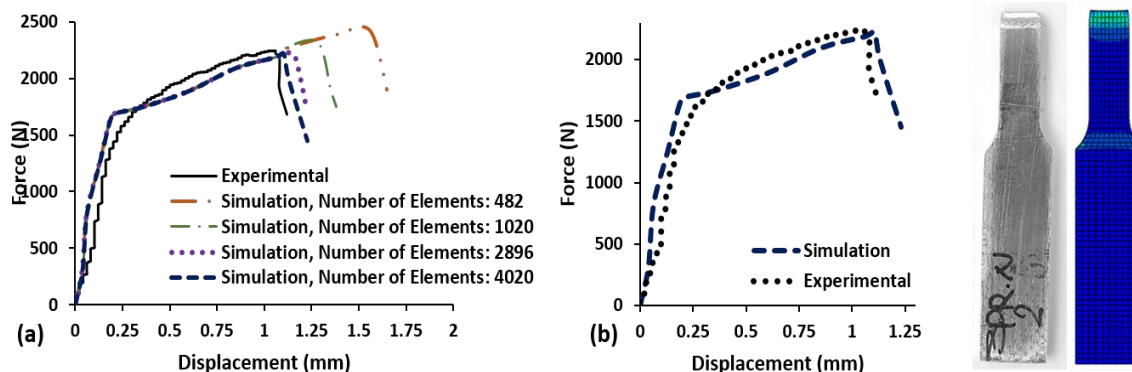
جابجایی در شکست به طور معناداری دارای دقت کمتری بوده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که درصد خطای نیروی بیشینه که به نمونه وارد می‌شود، کمتر از 0/1%، اما خطای مربوط به مقدار جابجایی انجام گرفته نمونه در لحظه از دست دادن ظرفیت تحمل بار 8/6% است. علت این مساله را می‌توان تفاوت در وضعیت تنش صفحه‌ای نمونه‌های تجربی و روابط به کار رفته برای محاسبه مقادیر کرنش شکست و نسبت تنش سهمحوره دانست که برای حالت کرنش صفحه‌ای هستند.



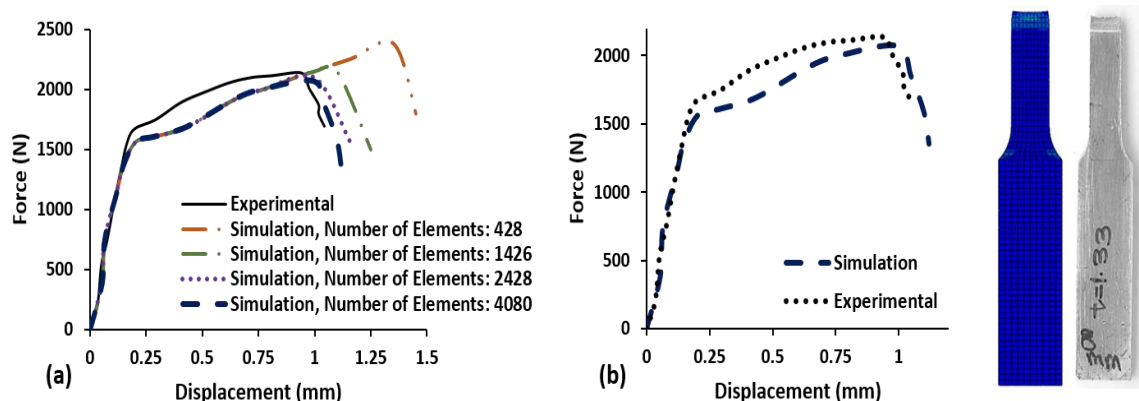
شکل ۶- نتایج آزمون‌های تجربی و منحنی‌های بدست آمده از معادلات شکست نمونه SP.N0



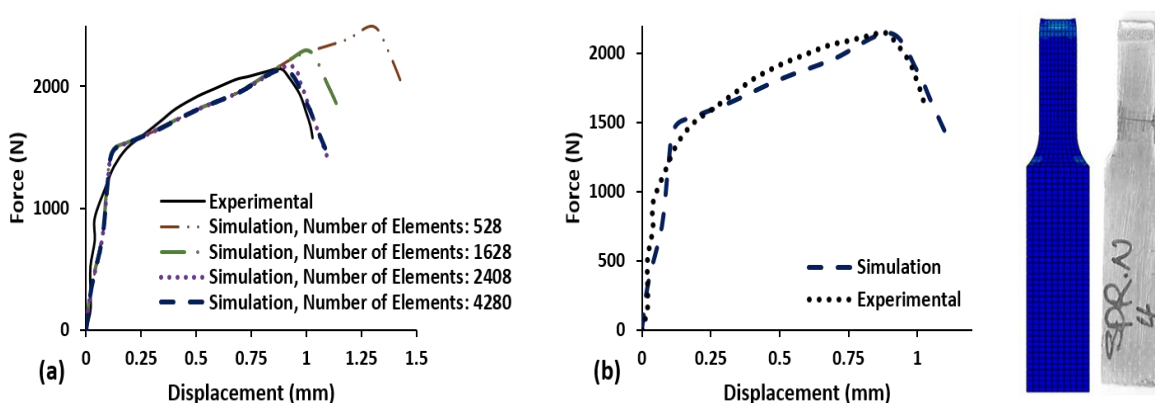
شکل ۷- نتایج آزمون‌های تجربی و منحنی‌های بدست آمده از معادلات شکست برای نمونه SP.N1



شکل ۸- نتایج آزمون‌های تجربی و منحنی‌های بدست آمده از معادلات شکست برای نمونه SPR.N2



شکل ۹- نتایج آزمون‌های تجربی و منحنی‌های بدست آمده از معادلات شکست برای نمونه SPR.N3



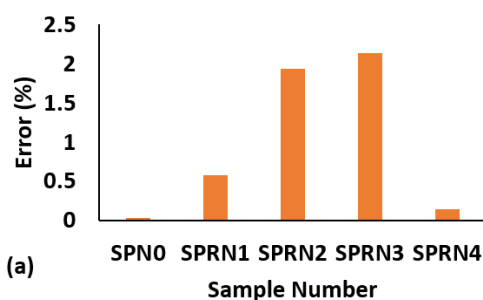
شکل ۱۰- نتایج آزمون‌های تجربی و منحنی‌های بدست آمده از معادلات شکست برای نمونه SPR.N4

تحمل می‌کند، یکی از اهداف مهم مدل‌های آسیب است. همچنین توانایی مدل برای تعیین میزان جابجایی نمونه‌ها در

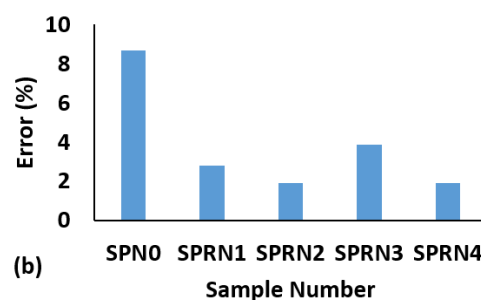
با شروع آسیب، ماده ظرفیت تحمل بار خود را از دست می‌دهد، بنابراین تعیین بیشینه نیرویی که ماده قبل از شکست

مولفه‌های هیدرواستاتیک تنش بر محدود کردن تغییر شکل در اطراف شیار باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده و خطاهای در حد قابل قبول می‌توان دریافت روش‌های ارائه شده در این پژوهش از همخوانی قابل قبولی با نتایج تجربی برای بررسی پدیده آسیب در تحلیل های مهندسی برای آلومینیوم ۵۰۸۳ برخوردار است و از این روابط می‌توان برای تعیین آسیب و گسیختگی در فرایندهای شکل‌دهی با هندسه پیچیده نیز استفاده کرد.



لحظه شکست نیز از دیگر ویژگی‌های مهم آن است. در این پژوهش دقت مدل در محاسبه این دو پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفته و سنجیده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده خطاهای ذکر شده برای نمونه‌های مختلف به صورت نمودارهای شکل ۱۱ ارائه شده است. به طور کلی مدل کالیبره شده توانسته است، مقدار نیروی بیشینه را برای نمونه بدون شیار بهتر پیش بینی کند، اما در نمونه‌های شیاردار دقت پیش بینی مقدار جابجایی شکست بهتر بوده است. علت این مساله شاید ایجاد حالت تنش سه محوره به دلیل وجود شیار و تاثیر



شکل ۱۱- گزارش خطای محاسبه شده در تعیین مقدار الف) نیروی بیشینه، ب) مقدار جابجایی در شکست

شرایط کرنش صفحه‌ای ارائه شده‌اند و آزمون‌های انجام شده برای استخراج ثابت‌های مواد در وضعیت تنش صفحه ای انجام گرفته اند، یکی از علت‌های خطا را می‌توان این نکته دانست. همچنین برای نمونه بدون شیار، معیار آسیب را زودتر پیش‌بینی کرده‌است و دلیل آن می‌تواند محافظه‌کارانه بودن وضعیت کرنش صفحه‌ای باشد.

### مراجع

- Shrot, A. and M. Bäker, Determination of Johnson–Cook parameters from machining simulations. *Computational Materials Science*, 2012. 52(1): p. 298-304.
- Gambirasio, L. and E. Rizzi, On the calibration strategies of the Johnson–Cook strength model: Discussion and applications to experimental data. *Materials Science and Engineering: A*, 2014. 610: p. 370-413.
- Gambirasio, L. and E. Rizzi, An enhanced Johnson–Cook strength model for splitting strain rate and temperature effects on lower yield stress and plastic flow. *Computational Materials Science*, 2016. 113: p. 231-265.

### ۳- جمع‌بندی

استخراج مدل آسیب نرم آلیاژ ۵۰۸۳ آلومینیوم بر اساس استاندارد و روش‌های مرسوم در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از روابط استخراج شده تجربی در این پژوهش که ارتباط بین کرنش شکست با نسبت تنش سه محوره را مشخص می‌کنند، مطالعه دقیق فرآیند گسیختگی و آسیب ورق های فلزی از این آلیاژ ممکن می‌شود. با هدف بررسی تاثیر مقادیر مختلف تنش سه محوره نمونه‌های تخت شیاردار با شعاع شیار مختلف استفاده شده و با برازش منحنی‌های مناسب ثابت‌های جنس برای تحلیل آسیب نرم تعیین شده‌اند. برای صحت‌سنجی و بررسی کارایی مدل به‌دست آمده در شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی ورق، آزمون‌های انجام‌شده در محیط نرم‌افزار آباکوس نیز شبیه‌سازی شده‌اند. مطالعه دقت نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های ارائه شده اگرچه در پیش‌بینی مقدار نیروی بیشینه دقت کاملا مطلوبی دارند و با خطایی کمتر از ۲/۵٪ آن را پیش‌بینی کرده‌اند، اما برای محاسبه مقدار جابجایی تا شروع شکست دقت کمتری داشته و در بدترین حالت دقتی کمتر از ۸٪ دارند. توجه به این مورد ضروری است که مدل‌های استفاده شده برای

13. Banerjee, A., et al., Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2015. 640: p. 200-209.
14. Buzyurkin, A.E., I.L. Gladky, and E.I. Kraus, Determination and verification of Johnson–Cook model parameters at high-speed deformation of titanium alloys. *Aerospace Science and Technology*, 2015. 45: p. 121-127.
15. Zhang, X., R. Shivpuri, and A.K. Srivastava. Microstructure Sensitive Flow Stress Based on Self Consistent Method. in *ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2016.
16. Liu, J., Y. Bai, and C. Xu, Evaluation of Ductile Fracture Models in Finite Element Simulation of Metal Cutting Processes. *J. Manufac. Sci. Eng.*, 2013. 136(1).
17. Mashayekhi, M. and S. Ziaei-Rad, Identification and validation of a ductile damage model for A533 steel. *J. Mater. Proc. Tech.*, 2006. 177(1): p. 291-295.
18. Ribeiro, J., A. Santiago, and C. Rigueiro, Damage model calibration and application for S355 steel. *Procedia Structural Integrity*, 2016. 2: p. 656-663.
19. Wierzbicki, T., et al., Calibration and evaluation of seven fracture models. *Int. J. Mech. Sci.*, 2005. 47(4): p. 719-743.
20. Hancock, J.W. and A.C. Mackenzie, On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states. *J. the Mech. Phys. Solids*, 1976. 24(2): p. 147-160.
21. Lee, Y.-W., Fracture prediction in metal sheets. 2006.
4. Rice, J.R. and D.M. Tracey, On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields\*. *J. the Mech. Phys. Solid.*, 1969. 17(3): p. 201-217.
5. Bai, Y., X. Teng, and T. Wierzbicki, On the Application of Stress Triaxiality Formula for Plane Strain Fracture Testing. *J. Eng. Mater. Tech.*, 2009. 131(2).
6. Bai, Y. and T. Wierzbicki, A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. *International J. Plastic.*, 2008. 24(6): p. 1071-1096.
7. Bao, Y. and T. Wierzbicki, On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *Int. J. Mech. Sci.*, 2004. 46(1): p. 81-98.
8. Hooputra, H., et al., A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminium extrusions. *Int. J. of Crashworthiness*, 2004. 9(5): p. 449-464.
9. Bobbili, R. and M. Vemuri, A Modified Johnson-Cook Model for FeCoNiCr high entropy alloy over a wide range of strain rates. *Materials Letters*, 2018. 218.
10. Milani, A.S., et al., An improved multi-objective identification of Johnson–Cook material parameters. *Int. J. Impact Eng.*, 2009. 36(2): p. 294-302.
11. Majzoobi, G.H. and F.R. Dehgolan, Determination of the constants of damage models. *Procedia Engineering*, 2011. 10: p. 764-773.
12. Banerjee, A., et al., An Experimental Determination of Johnson Cook Material and Failure Model Constants for Armour Steel. *Applied Mechanics and Materials*, 2014. 592-594: p. 990-995.