



## روش نوین محاسبه کرنش شکست قطعات برشی و ناچ‌دار در شرایط دمایی و سه‌محوره‌ی تنش مختلف

امیررضا استادی<sup>۱</sup>، مهدی گنجیانی<sup>\*۲</sup>

۱ مهندسی و ساخت شرکت خدمات بازرگانی معادن و فلزات غیرآهنی، تهران، ایران  
۲ دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۱۱

### کلمات کلیدی:

سه‌محوره تنش  
دما  
کرنش شکست  
اجزا محدود  
روش وی ام ام.

**خلاصه:** تعیین مشخصات پایدار رفتار ماده تحت تأثیرات تنش و دما به منظور طراحی مطلوب در صنعت فرم‌دهی فلزات به طرز قابل توجهی مهم می‌باشد. هدف این پژوهش ارائه یک روش نوین اندازه‌گیری کرنش شکست قطعات برشی و ناچ‌دار در سه‌محوره‌های مختلف تنش با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری وی ام ام می‌باشد. همچنین تأثیرات افزایش دما بر کرنش شکست نیز بررسی شده است. ماده مورد بررسی آلومینیوم ۵۰۸۳-اچ ۳۲۱ می‌باشد. برای این منظور ۲۴ نمونه مختلف تحت از جمله نمونه‌های برشی و ناچ‌دار برای ۴ نوع سه‌محوره‌ی ۰/۲ و ۰/۳۳ و ۰/۳۸ و ۰/۵۵ جهت تست در سه محدوده دمایی (۲۵، ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد) آماده‌سازی و تحت شرایط بارگذاری استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. کرنش شکست نمونه‌ها اندازه‌گیری و نتایج مرتبط بدست آمدند. نتایج بدست آمده با نتایج تجربی دیگران و همچنین نتایج شبیه‌سازی شده مدل رایس و تریسی مقایسه شدند. همچنین با انجام آزمایش‌های جدیدی که در این مقاله انجام شده است، نقطه قطع شدن منحنی در سه‌محوره ۰/۲ بدست آمده است. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود در دمای پایین (۲۵°C)، با افزایش سه‌محوره تنش، کرنش شکست روندی کاهشی دارد، در حالی که در دمای ۲۰۰°C این روند تقریباً ثابت است ولی در دمای ۴۰۰°C این روند افزایشی است.

### ۱- مقدمه

صورت نزولی تابعی از نسبت سه‌محوره‌ی تنش است. با و ویرزبیک [۴]، با انجام آزمون‌های گسترده بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴-تی ۳۵۱ تلاش کردند تا مکان هندسی کرنش شکست را در بازه‌های مختلف چند محوری تنش به دست آورند و برای بازه‌های مختلف تنش سه‌محوره، رابطه‌ی بین کرنش شکست و سه‌محوره‌ی تنش را بدست آوردند. با و ویرزبیک [۵]، با انجام آزمون‌های گسترده بر روی آلومینیوم ۲۰۲۴-تی ۳ توانستند به صورت هم‌زمان ارتباط کرنش شکست و پارامتر نامتغیر سوم تانسور تنش انحرافی و نسبت سه‌محوره‌ی تنش را بیان کردند. با و همکاران [۶]، در پژوهش دیگری به بررسی خواص آسیب و ارتباط نسبت سه‌محوره‌ی تنش با کرنش شکست پرداختند. آن‌ها برای دو نوع فولاد نمودارهای مرتبط با آسیب نرم را تدوین و نتایج را گزارش نمودند. پرادو و همکاران [۷]، با استفاده از معیار تسلیم ناهمسانگرد و انجام آزمایش‌های متنوع به بررسی معیارهای شکست آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداختند.

لی و همکاران [۸]، خصوصیات شکست نرم استیل کیو ۴۶۰ تحت شرایط شبه‌استاتیک به وسیله تست‌های مکانیکی بر روی چهار نوع نمونه ناچ‌دار مورد

تعیین پارامترهای آسیب و شکست مواد مختلف در تحلیل و ارزیابی گسیختگی ورق‌های نازک فلزی در حین شکل‌دهی دارای اهمیت بوده و پژوهشگران زیادی در تحقیقات سه‌محوره تنش به آن پرداخته‌اند. کمیت آسیب به طور عمده به کرنش‌های ایجاد شده در قطعه و وضعیت تنش و مسیر کرنش و نرخ کرنش وابسته است. وضعیت تنش در محل آسیب یک پارامتر مهم و مؤثر است که با استفاده از پارامترهایی نظیر نسبت سه‌محوره‌ی تنش (نسبت تنش میانگین به تنش معادل) توصیف می‌گردد. کاجانف، اساس روش مکانیک آسیب را پایه‌گذاری نمود. وی کاهش سفتی و زوال ماده را به ترک‌های ریز درون آن نسبت داد که می‌توان آن را توسط یک پارامتر آسیب ماکروسکوپی اندازه‌گیری کرد. کرجسینویک و لمیتره [۱]، مبنای مکانیک آسیب پیوسته را تدوین نمود و از آن زمان تاکنون، پیشرفت‌های زیادی در زمینه مکانیک آسیب به وجود آمده است. هنکوک و همکاران [۲] و [۳]، در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که کرنش در زمان شکست به

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ganjiani@ut.ac.ir

و نتایج تجربی در کل طیف تنش‌های آزمایش شده مشهود است. گاتی و همکاران [۱۶] از روش اندازه‌گیری همبستگی تصویر دیجیتال<sup>۲</sup> برای تجزیه و تحلیل کشیدگی ناحیه ناچ و تغییرشکل در امتداد نمونه کششی استفاده کردند. در ضمن آنها پی بردند تحقیق بیشتری برای بررسی اثر سه‌محوره‌ی تنش بر وقوع شکست مورد نیاز است و مدل برشی استفاده شده می‌تواند شکست را در سه‌محوره‌ی تنش کم پیش بینی کند. برای تعیین توانایی مدل اصلاح‌شده مورد بحث و همچنین برای پیش‌بینی آسیب تحت بارگذاری برشی، دو آزمایش تجربی (آزمایش کشش و برش) همراه با روش اندازه‌گیری همبستگی تصویر دیجیتال انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل اصلاح شده فوق، مدل‌سازی شکست را نسبت به مدل قبلی در شرایط بارگذاری برشی بهبود می‌بخشد و در ضمن برش تحت تنش کششی نقش مهمی را تا انتشار شکستگی تسریع می‌کند.

زیستل و همکاران [۱۷] به بررسی تجربی و عددی آسیب و رفتار شکست فلزات انعطاف‌پذیر پرداختند. برای این منظور آزمایش‌های تجربی دوماحوری بر روی نمونه‌های اچ-شکل انجام داده‌اند. آن‌ها بارگذاری‌های مختلف از جمله فشاری، کششی و برشی را بصورت تجربی تست کرده‌اند و شبیه‌سازی‌های عددی مربوطه جهت ارزیابی نیز انجام شده است. طبق تحقیق آنها، بارگذاری فشاری و برشی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه شکل‌پذیری مواد با شروع فرآیندهای شکست در محدوده کرنش آسیب کوچک شود. در تحقیق بارتی و همکاران [۱۸] مدل‌های آسیب برای کشش ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ را با روش مهندسی معکوس و با استفاده از آزمایش‌های کشش و در کنار آنها شبیه‌سازی المان محدود (آباکوس) کالیبره کرده‌اند. جهت ارزیابی مدل‌های آسیب، شکل‌پذیری ورق‌های فلزی موازی و جدا از هم، برای پیش‌بینی شکست در شکل‌دهی عمیق بررسی شده است. چن و همکارانش [۱۹]، از طریق آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی عددی رفتار آلیاژ آلومینیوم  $T6-6082$  را در خصوص تأثیر نرخ کرنش شکست بر سه‌محوره‌های مختلف تنش با استفاده از تست کشش و ضربه بررسی نمودند. تأثیر نرخ کرنش نیز توسط بشیری و همکاران [۲۰] با استفاده از آزمون سقوط آزاد بر روی  $St12$ ،  $CK45$  و  $Al3105$  انجام شده است. هوانگ و همکاران [۲۱] درباره شکست فولاد سازه‌ای  $Q235$  در بارگذاری تنش برشی که یکی از شرایط بارگذاری در هنگام زمین لرزه است، بحث کردند. موروگسان و جانگ [۲۲] با استفاده از مدل آسیب جانسون-کوک، پارامترهای مدل شکست را برای فولاد آلیاژی ۱۰۴۵ با استفاده از ساده

مطالعه قرار دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد که از نتایج بدست‌آمده می‌توان برای کالیبره کردن یک سری از مدل‌های شکست میکرومکانیکی برای فولاد کیو ۴۶۰ استفاده کرد. لو و همکاران [۹] با در نظر گرفتن جوانه‌زنی، رشد و به هم‌پیوستن حفره‌ها در شکست فلزات و آلیاژها، مدلی را ارائه و صحنه‌گذاری کردند. محققان، این مدل را با در نظر گرفتن اثر سه‌محوره‌ی تنش و تنش برشی پیشینه معرفی کرده‌اند که مورد توجه سایر محققان قرار گرفته است. چونگ و همکاران [۱۰] در مقاله‌ی خود به بررسی فرمول‌بندی کرنش خرابی طبق سه‌محوره‌های تنش متوسط فولاد  $EH36$  پرداختند. آن‌ها یک سری تست‌های کششی بر روی نمونه‌هایی با هندسه ناچ متفاوت انجام دادند. جابلوکوف و همکاران [۱۱] در مقاله خود به تأثیر دما و نرخ کرنش بر روی تغییرشکل و رفتار شکست فولاد  $HY-100$  به عنوان تابعی از حالت تنش با استفاده از نمونه‌های کششی محوری ناچ‌دار و بدون ناچ پرداخته‌اند. در طیف دمایی نشان می‌دهد که کاهش دمای تست با افزایش کرنش همراه است و با کاهش کرنش شکست، به سرعت سه‌محوره‌ی تنش نیز افزایش می‌یابد. یو و همکاران [۱۲] در مقاله خود نیز در خصوص تأثیر دما بر تغییرشکل و رفتار شکست، مقاومت در برابر شکست، میزان سختی و معادل اثرگذار تحت بارگذاری کششی برای فولاد ریلی با استحکام بالا پرداختند. درایمیر و همکاران [۱۳] از طریق آزمایشات تجربی، متوجه وابستگی رفتار آلومینیوم آلیاژی به سه‌محوره‌های مختلف تنش و نرخ کرنش شدند. چن و همکاران [۱۴] توضیح دادند که چگونه دمای بازپخت (آنیلینگ) بر روی خصوصیات مکانیکی و حساس‌شدگی آلیاژ آلومینیوم  $AL5083-H116$  تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان داد که خصوصیات مکانیکی در زمان بازپخت (آنیلینگ) نسبت به دمای بازپخت حساسیت بیشتری نشان می‌دهند. همچنین به این نتیجه رسیدند که خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم با ذوب شدن بین دمای ۱۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد به سرعت بدتر می‌شود.

ون و محمود [۱۵]، متوجه شده‌اند که شکست نرم فلزات به سه‌محوره‌ی تنش و پارامتر زاویه لود<sup>۱</sup> وابسته است و دو نوع آسیب ناشی از تنش هیدرواستاتیکی و تنش انحرافی به ترتیب از نظر سه‌محوره‌ی تنش و پارامتر زاویه لود (بدون توجه به دامنه‌های حالت تنش) به طور مداوم وجود دارند. از طرفی در حوزه سه‌محوره‌ی تنش کم، این دو اثر با هم رقابت می‌کنند و نمی‌توان از هیچ یک از آنها چشم‌پوشی کرد. آن‌ها مدلی را ارائه کردند که با یک سری نتایج تجربی برای فلزات مختلف (آلومینیوم ۵۰۸۳ و فولادهای ۱۰۴۵ و  $DH36$ ) ارزیابی شد و یک ارتباط سازنده بین مدل پیشنهادی

2 Digital Image Correlation (DIC)

1 Lode angle parameter

جدول ۱. نتایج ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۵۰۸۳.

Table 1. The chemical decomposition of Aluminium 5083.

Si	Fe	Cu	Mn	*Mg	Zn	Cr	Ni	Ti	Be
۰/۱۰	۰/۲۷	۰/۰۵	۰/۵۹	۶/۵±۰/۱	۰/۰۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۴	۰/۰۰۳

سانتیگراد برای نمونه‌های مختلف از جمله کشش، فشار و برش انجام شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که کرنش شکست در آلیاژ Mg-Gd-Y یک روند غیریکنواخت را با افزایش دما نشان می‌دهد. از طرفی رفتار ماده در ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه سانتیگراد بسیار مشابه است ولی هنگامی که دما بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتیگراد می‌رود، استحکام به سرعت کاهش می‌یابد.

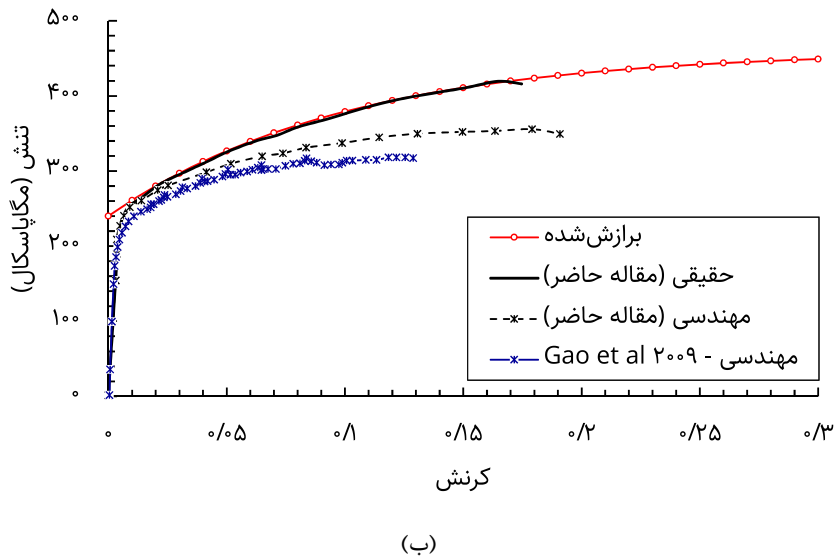
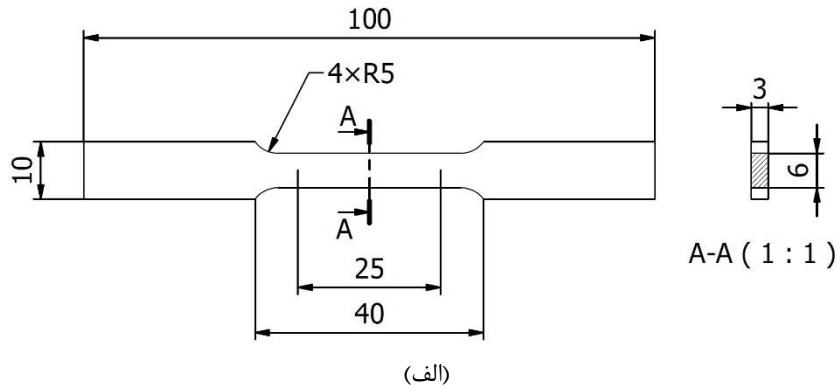
در این تحقیق ابتدا به بررسی روش نوین اندازه‌گیری کرنش شکست مؤثر نمونه قطعات برشی و ناچ‌دار با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری وی‌ام<sup>۱</sup> پرداخته و در ادامه به تحلیل تجربی و عددی تأثیر دما بر کرنش شکست در سه‌محوره‌های مختلف تنش برای آلومینیوم مورد نظر می‌پردازد. برای این منظور آزمون‌های کشش در دماهای ذکر شده بر روی نمونه‌های صاف و تخت ناچ‌دار و شیاردار با سه‌محوره‌های مختلف تنش انجام می‌گیرد. کرنش‌های شکست مؤثر هر یک از نمونه‌ها (برشی و ناچ‌دار) با روش وی‌ام ام اندازه‌گیری و نتایج مرتبط حاصل می‌گردد. در ادامه ارتباط کرنش شکست مؤثر و نسبت سه‌محوره‌ی تنش در دماهای مختلف برای فلز آلومینیوم مذکور ارائه می‌شود.

۲- شبیه‌سازی عددی

به منظور بدست آوردن آنالیز شیمیایی و همچنین خواص مکانیکی، نمونه‌ای مطابق با استاندارد ASTM-E۸M با ابعاد نشان داده شده در شکل ۱-الف آماده گردید. همچنین در این شکل، نتایج تنش-کرنش مهندسی مرجع [۲۷] جهت اعتبارسنجی آورده شده است. نتایج آنالیز شیمیایی و منحنی تنش-کرنش رفتار ماده مذکور به ترتیب در جدول ۱ و نمودار شکل ۱-ب آورده شده‌اند.

کردن معادله جانسون-کوک تخمین و در معادله نهایی آسیب جانسون-کوک استفاده کردند. آن‌ها تأثیر سه‌محوره‌های مختلف و دما را بر کرنش شکست شبیه‌سازی و برای کاربردهای شکل‌دهی فلز مذکور استفاده نمودند. سو و همکاران [۲۳] تحلیل تجربی و عددی تأثیر دما بر کرنش شکست در سه‌محوره‌های مختلف تنش بر روی آهن خالص DT۸ را بررسی نمودند. آن‌ها پاسخ رفتار پلاستیک جنس مذکور را در حالت‌های مختلف تنش، دما و نرخ کرنش بررسی نمودند. با بررسی مباحث فوق می‌توان فهمید که در خصوص تأثیر دما بر کرنش شکست در سه‌محوره‌های مختلف تنش فلزات بطور محدود تحقیق شده است. همچنین می‌توان برای اندازه‌گیری کرنش شکست از روش دشوار همبستگی تصاویر دیجیتال استفاده کرد که این روش بسیار حساس و پرهزینه می‌باشد. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری کرنش شکست نمونه‌های برشی و ناچ‌دار در سه‌محوره‌های مختلف تنش، یکی از چالش‌های پیش‌رو پژوهشگران بوده است. کورتیس و همکاران [۲۴] آزمایشات سه‌محوره‌ی تنش را برای بررسی اثرات نرخ کرنش و دما بر رفتار مکانیکی و شکست فولاد APIX۶۵ انجام داده‌اند. توسط آنها شبیه‌سازی‌های عددی برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی آزمایش‌ها انجام شده است. نتایج تجربی با مدل‌های پلاستیسیته جانسون-کوک و زریلی-آرمسترانگ ارزیابی شدند که منجر به یک تطابق تجربی-عددی خوب در این مقاله گردیده است. سو و همکاران [۲۵] آزمایش‌های تجربی کشش بر روی میله‌های صاف و ناچ‌دار از فولاد استیل ۳۰۴ انجام داده‌اند. هندسه نمونه‌ها به شکلی است که چهار حالت سه‌محوره‌ی تنش مختلف و شش شرایط نرخ کرنش متفاوت را پوشش داده است. داده‌های تجربی با استفاده از مدل کرنش شکست جانسون کوک مورد ارزیابی و شبیه‌سازی قرار گرفت. وو و همکاران [۲۶] تأثیر دما و حالت تنش را بر عملکرد شکست آلیاژ Mg-Gd-Y مدل‌سازی کردند. آزمایش‌ها در دمای ۲۵ تا ۳۰۰ درجه

1 Video Measuring Machine (VMM)



شکل ۱. آلومینیوم ۵۰۸۳ مورد آزمایش، (الف) نقشه و ابعاد به میلیمتر و (ب) نمودار تنش-کرنش ماده حاصل از تست کشش.

Fig. 1. The Al5083 (a) geometry and dimensions in mm and (b) the stress-strain curve after simple tension test.

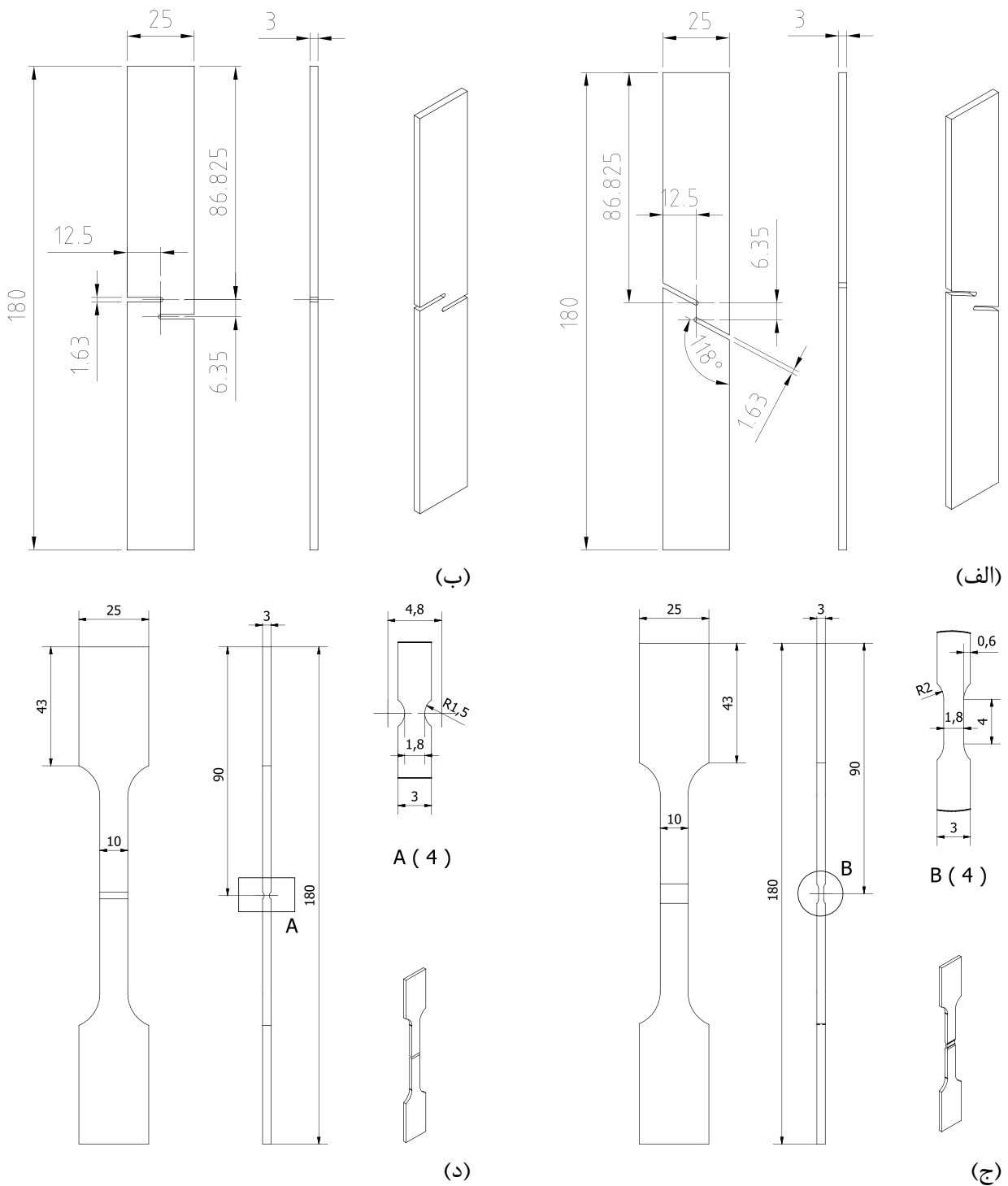
در رابطه فوق (۱)،  $\eta$  نسبت تنش میانگین  $\sigma_m$  به تنش معادل فون میزس  $\sigma_{eq}$  [۲۸] می‌باشد، که به صورت روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (3)$$

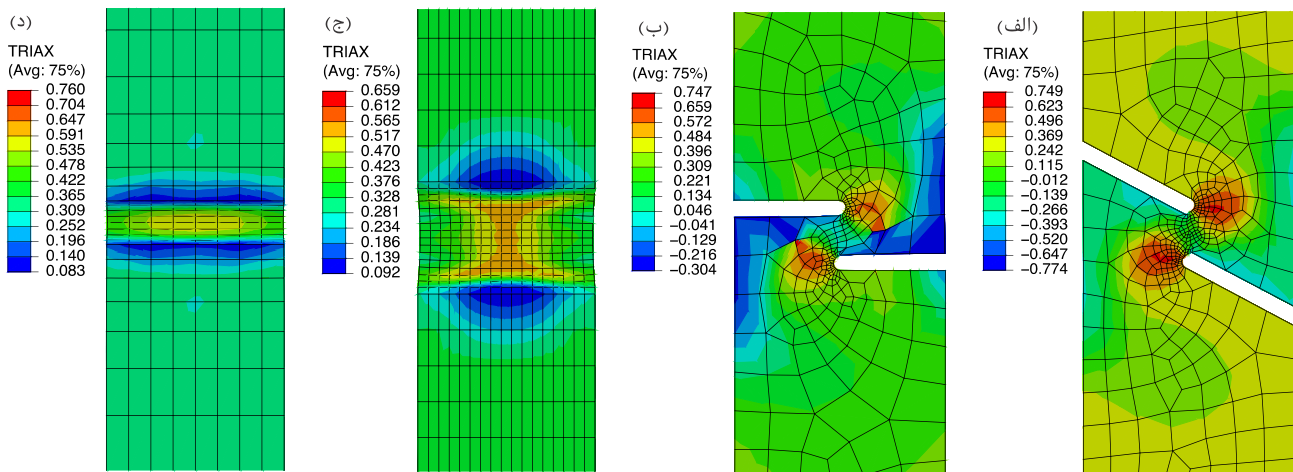
در این تحقیق از آزمون‌هایی با نمونه‌های تخت ناچ‌دار برای حالت کششی و نمونه‌های تخت شیاردار برای حالت برشی استفاده شده است. نمونه‌های ناچ‌دار و برشی به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM-E۸M و ASTM-B۸۳۱-۰۵ آماده و ساخته شده‌اند (مطابق شکل ۲). برای ارزیابی حالت تنش وارده، پارامتر نسبت سه‌محوره‌ی تنش ( $\eta$ ) به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \quad (1)$$



شکل ۲. نقشه و ابعاد نمونه‌های برشی و ناچ‌دار (الف) برشی (سه‌محوره ۰/۲)، (ب) برشی (سه‌محوره ۰/۳۳)، (ج) ناچ‌دار (سه‌محوره ۰/۳۸) و (د) ناچ‌دار (سه‌محوره ۰/۵۵). (کلیه اندازه‌ها به میلی‌متر می‌باشد).

Fig. 2. The geometry and dimensions (in mm) of shear and notched specimens; (a) shear (0.2 stress triaxiality), (b) shear shear (0.33 stress triaxiality), (c) notched (0.38 stress triaxiality) and (d) notched (0.55 stress triaxiality).



شکل ۳. کانتور سه محوره تنش حاصل از شبیه سازی نمونه ها (الف) برشی (سه محوره ۰/۲)، (ب) برشی (سه محوره ۰/۳۳)، (ج) ناچ دار (سه محوره ۰/۳۸) و (د) ناچ دار (سه محوره ۰/۵۵).

Fig. 3. The stress triaxiality contour from the numerical simulation; (a) shear (0.2 stress triaxiality), (b) shear (0.33 stress triaxiality), (c) notched (0.38 stress triaxiality) and (d) notched (0.55 stress triaxiality).

نتایج عددی با تغییر اندازه‌ی مش تغییر خواهد کرد و هنگامی که مقادیر یک کمیت مثل تنش همگرا شد، نشانگر این است که مش بندی به درستی انجام شده و دیگر نیاز به تغییر اندازه‌ی مش نیست. برای هر کدام از سه محوره‌های تنش (۰/۲، ۰/۳۳، ۰/۳۸ و ۰/۵۵) تحلیل استقلال از مش انجام شده است. نتایج این تحلیل در جدول ۲ جمع بندی و ارائه شده است.

### ۳- آزمایش های تجربی

با توجه به جمع بندی و نتایج حاصل از بخش ۲ که منجر به ۴ نوع سه محوره‌ی تنش (۰/۲، ۰/۳۳، ۰/۳۸ و ۰/۵۵) شد. به دلیل اینکه این ۴ نوع سه محوره باید در سه محدوده دمایی آزمایش شوند (۱۲ مورد آزمایش) و برای اطمینان از صحت نتایج هر آزمایش تجربی، دو تکرار مشابه در نظر گرفته شد که در نتیجه منجر به ۲۴ مورد آزمایش تجربی گردید. این ۲۴ عدد نمونه (۱۲ عدد نمونه برشی و ۱۲ عدد نمونه ناچ دار) جهت تست در ۴ نوع سه محوره‌ی تنش و سه شرایط دمایی متفاوت ۲۵، ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد ساخته شده‌اند. همچنین نمونه‌ها پس از برش کاری با لیزر، تکمیل ماشین کاری و تمیزکاری نهایی، جهت انجام آزمایشات تجربی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴، نمونه‌ها را پس از انجام تست کشش، شکست و گسیختگی نشان می‌دهد.

در روابط فوق  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  تنش‌های اصلی بوده و پس از بررسی‌های متعدد، ابعاد هندسی نمونه‌های ناچ دار و برشی مطابق شکل ۲ طراحی و مدل سازی شد و با شبیه سازی در نرم افزار آباکوس، سه محوره‌های تنش مورد نظر بدست آمد.

برای بدست آوردن سه محوره‌ی تنش، کلیه نمونه‌های فوق در محیط آباکوس شبیه سازی شده است. از حلگر دینامیکی صریح<sup>۱</sup> با پله زمانی  $2 \times 10^{-8}$  ثانیه و نوع المان C3D48 استفاده شده است. نتیجه‌ی سه محوره‌ی تنش ناشی از این شبیه سازی‌ها در شکل ۳ مشاهده می‌گردد. لازم بذکر است جهت بررسی نمودارهای استقلال از مش، حداقل از سه مش بندی دیگر با تعداد مش‌های متفاوت نیز استفاده شده است. نتایج سه محوره‌ی تنش نیز از لحاظ همگرایی (کاهش خطا) بررسی شدند. با بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق، از چهار مدل سه محوره‌ی تنش، دو مدل برشی (سه محوره‌های تنش ۰/۲ و ۰/۳۳) و دو مدل ناچ دار (سه محوره‌های تنش ۰/۳۸ و ۰/۵۵) استفاده می‌گردد. سه محوره‌های تنش از میانگین داده‌های چندین المان در منطقه ناچ دار بدست آمده‌اند.

لازم است نتایج مش بندی از لحاظ استقلال از مش مورد بررسی قرار گیرد. این کار کمک می‌کند تا از درستی نتایج عددی اطمینان حاصل شود.

جدول ۲. نتایج تحلیل استقلال از مش.

Table 2. The results of mesh sensitivity analysis.

سه‌محوره‌ی تنش	تعداد المان (تنش بر حسب مگاپاسکال)		
۰/۲	۲۹۵۶ (۲۷۰/۷۲)	۵۲۲۰ (۲۶۸/۸۹)	۶۲۳۷ (۲۶۴/۱۷)
۰/۳۳	۳۸۳۰ (۸۵/۸۵)	۴۴۷۷ (۹۲/۴۸)	۵۳۴۰ (۹۰/۷۴)
۰/۳۸	۲۰۴۰ (۲۶۴/۲۴)	۶۷۷۶ (۲۲۵/۵۱)	۷۸۵۶ (۲۱۱/۱۶)
۰/۵۵	۲۴۸۴ (۳۵۷/۴۵)	۶۲۱۶ (۳۴۸/۲)	۷۶۵۶ (۳۴۵/۰۶)



شکل ۴. نمونه‌های برشی و ناچ‌دار پس از انجام تست کشش و شکست ایجاد شده.

Fig. 4. The fracture state of shear and notched specimens after simple tension test.

#### ۴- تحلیل نتایج

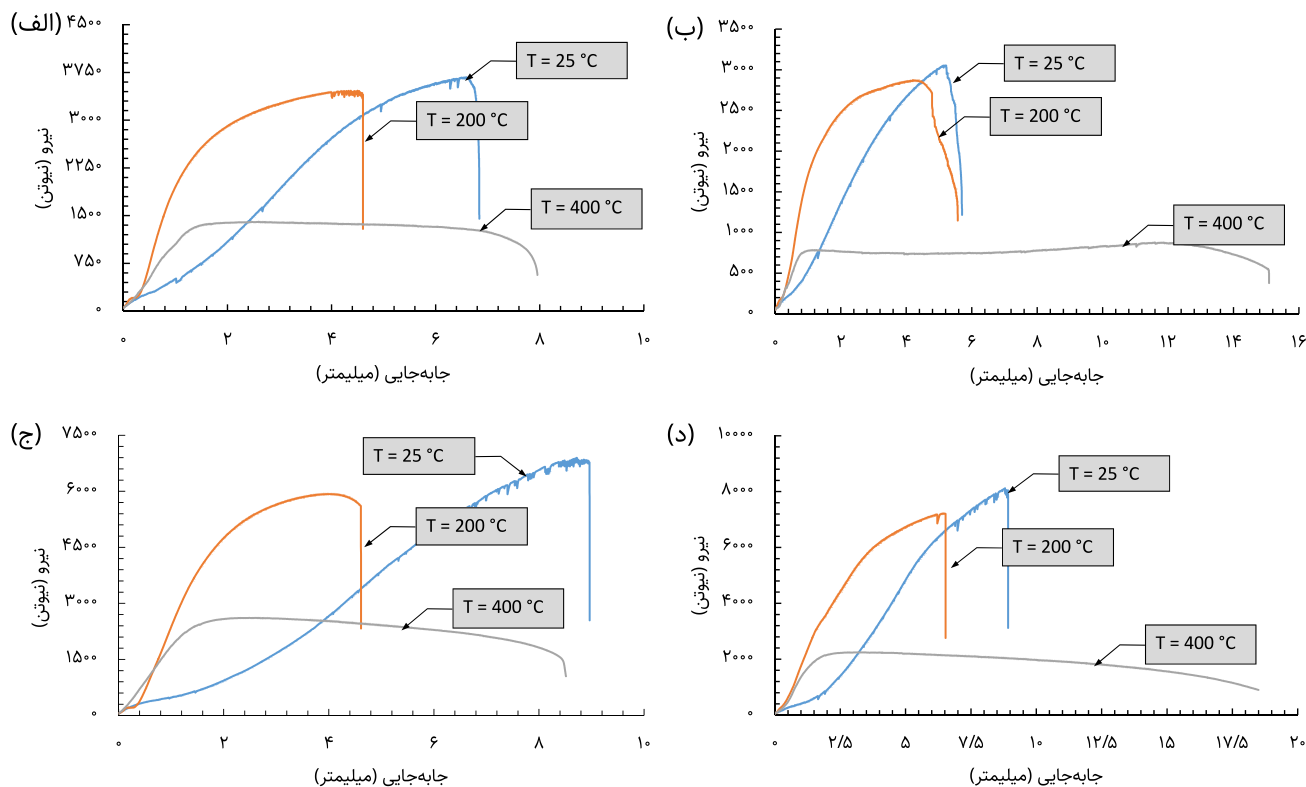
در این قسمت نتایج حاصل از روش جدید اندازه‌گیری کرنش شکست مؤثر بررسی، و نتایج عددی و تجربی تأثیر دما بر کرنش شکست مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در ابتدا به پدیده حساس‌شدگی پرداخته شده و در نهایت نحوه‌ی اندازه‌گیری کرنش شکست مؤثر با استفاده از دستگاه وی‌ام‌ام توضیح داده و نتایج تجزیه و تحلیل می‌گردند.

#### ۴-۱- حساس‌شدگی

در نمودارهای شکل ۵، موردی که استثنا بوده و مشترک بین همه می‌باشد ثابت بودن کرنش شکست در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد است. این

با توجه به توضیحات فوق، ۲۴ نمودار نیرو-جابجایی برای چهار مدل سه‌محوره‌ی تنش در سه شرایط دمایی بدست می‌آید. از این تعداد با توجه به میانگین‌گیری هر دو تست مشابه، ۱۲ نمودار نیرو-جابجایی حاصل می‌توان با تجمیع ۱۲ نمودار برای هر نوع سه‌محوره‌ی تنش در سه نقطه دمایی بصورت مجزا، در نهایت به چهار نمودار نهایی نیرو-جابجایی رسید. نمودارهای نهایی تست‌های کشش برای نمونه‌ها در دماهای مختلف (درجه سانتیگراد) در شکل ۵ رسم شده‌اند. این نمودارها نشان می‌دهند که پس از اعمال بار چه اندازه طول نمونه‌ها کشیده تا قطعه به حالت گسیختگی و شکست برسد.





شکل ۵. نمودار نیرو - جابجایی نمونه‌ها در دماهای مختلف برای سه‌محوره (الف) ۰/۲، (ب) ۰/۳۳، (ج) ۰/۳۸ و (د) ۰/۵۵.

Fig. 5. The force-displacement curve of specimens at different temperature state for stress triaxiality; (a) 0.2, (b) 0.33, (c) 0.38 and (d) 0.55.

استفاده شده است. در شکل ۷ طریقه‌ی عکس گرفتن مقاطع شکست نمونه‌ها با دستگاه وی‌ام ام نشان داده شده است. ابتدا دو نیمه شکسته‌شده قطعه برشی را زیر دستگاه وی‌ام ام مطابق شکل ۷ کنار هم قرار داده که شکل نهایی قبل از شکست تجسم گردد. لازم بذکر است در کلیه مقاطع برشی دو نقطه شکست تقریباً متقارن وجود دارد که بصورت دو لبه تیز دچار کشیدگی و گسیختگی نهایی می‌شوند. اندازه‌گیری روی یک بخش آسیب‌دیده انجام می‌گردد و نقطه‌ای که دچار کشیدگی و شکست شده، مشخص می‌شود (نقطه  $P_p$ ). در مرحله بعد تصویر این نقطه قبل از شروع کشیدگی بدست می‌آید (نقطه  $P_f$ ). کرنش برشی  $\gamma$  برحسب رادیان که زاویه‌ی خطوط گذرا از نقاط فوق به مرکز  $P_1$  می‌باشد (طبق شکل ۸)، طبق معادله (۴) کرنش شکست مؤثر قطعه برشی بدست می‌آید.

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

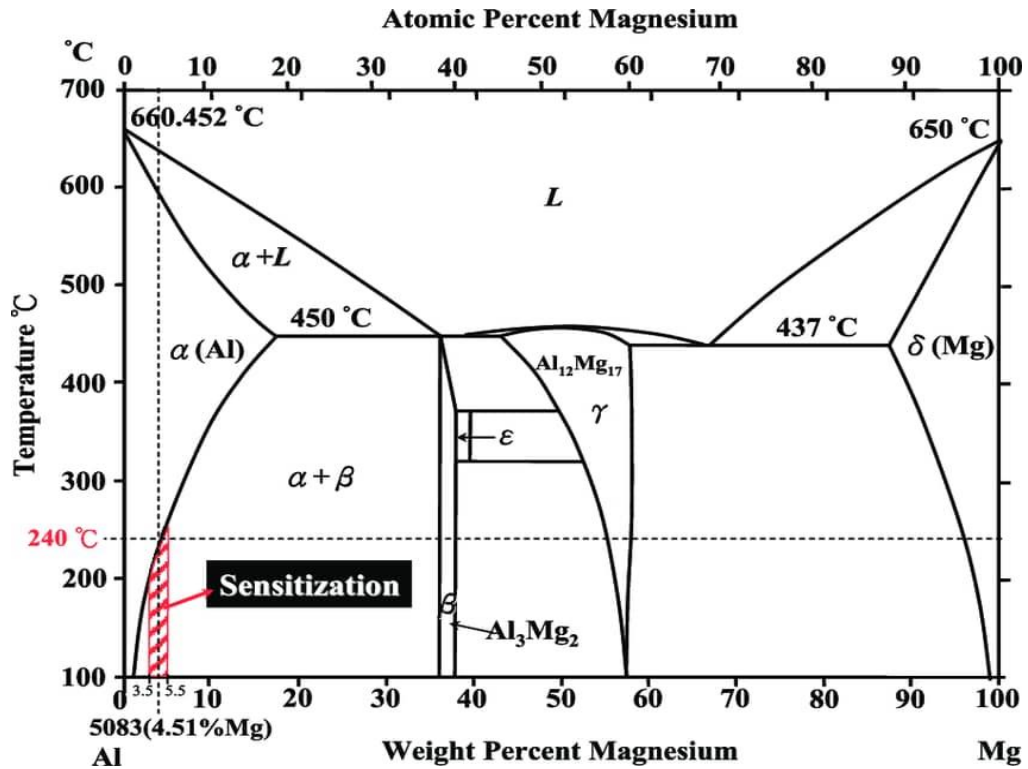
رفتار برای آلومینیوم در دیگر مراجع نیز مشاهده شده است [۱۴]، با مشاهده نمودار تغییر فاز آلومینیوم-منیزیم (طبق شکل ۶)، این گونه رفتار مربوط به مسئله حساس شدگی<sup>۱</sup> در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد است و به دلیل میزان ۶٫۵ درصد منیزیم<sup>۲</sup> در آلومینیوم فوق (مطابق جدول ۱)، باعث تشکیل رسوب سخت<sup>۳</sup> در مرز دانه‌ها شده و نمونه‌ها وارد فاز آلفا-بتا ( $\alpha + \beta$ ) طبق نمودار تغییر فاز آلومینیوم-منیزیم می‌شوند. در نتیجه خواص مکانیکی آلومینیوم مورد بحث تغییر پیدا می‌کند. در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد فلز مذکور مجدداً وارد فاز آلفا شده که رفتار طبیعی از خود نشان می‌دهد.

#### ۴-۲- اندازه‌گیری کرنش شکست در مقاطع برشی

برای اندازه‌گیری کرنش شکست مؤثر، مقاطع برشی طبق جدول ۳ از روش اندازه‌گیری جدیدی استفاده شده است. در این روش با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری وی‌ام ام که بسیار دقیق‌تر از روش‌های متداول بوده،

- 1 Sensitization
- 2 Mg
- 3  $Al_3Mg_2$





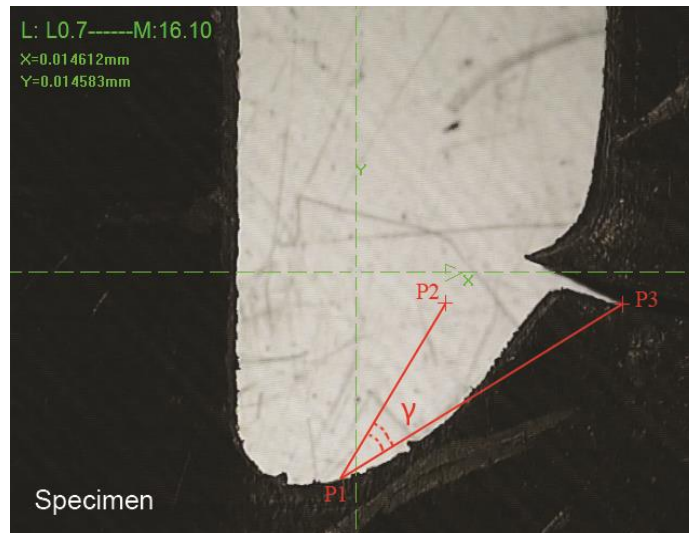
شکل ۶. نمودار تغییر فاز آلومینیوم-منیزیم.

Fig. 6. The phase diagram of aluminium-magnesium.



شکل ۷. دستگاه وی‌ام‌ام جهت عکس گرفتن از مقاطع شکست نمونه‌ها.

Fig. 7. The VMM apparatus for scanning the fracture section of the specimens.



شکل ۸. مقطع شکست نمونه برشی زیر دستگاه وی‌ام ام (بزرگنمایی ۷ برابر).

Fig. 8. The fracture section of shear specimens under VMM apparatus (7 magnification).

وابستگی وجود دارد. در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد تغییرات کرنش شکست بر حسب سهمحوره تنش نزولی و در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد کمترین تغییرات را داشته و تقریباً ثابت می‌ماند ولی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد، این وابستگی صعودی مشاهده می‌گردد.

برای ارزیابی بیشتر، نتایج این تحقیق در دمای محیط (۲۵ درجه سانتیگراد) با نتایج تجربی گالو و همکاران [۲۷] و همچنین مدل رایس و تریسی [۱۵] در شکل ۱۱ مقایسه گردید. با انجام آزمایش‌های جدیدی که در این مقاله انجام شده، نقطه قطع شدن منحنی در سهمحوره ۰/۲ قابل بدست آمده است. با مشاهده این نتایج، همپوشانی قابل قبولی بین نتایج تجربی این مقاله با نتایج دیگران مشاهده می‌شود. این همپوشانی دلیلی بر صحت و درستی نحوه اندازه‌گیری کرنش از روش جدید می‌باشد.

سهمحوره‌ی تنش کمیته است که نوع بارگذاری وارد بر ماده را نشان می‌دهد و به شدت تحت تاثیرهندسه نمونه بارگذاری شده می‌باشد. سهمحوره‌ی تنش یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر کرنش شکست است و با انجام آزمایشات تجربی وابستگی کرنش شکست به سهمحوره‌ی تنش بدست می‌آید و بصورت یک نمودار قابل ترسیم است. این نمودار یکی از مشخصات شکست ماده می‌باشد. حال با تغییر هندسه ماده، سهمحوره‌ی تنش نیز تغییر می‌کند و با وجود این تغییر، کرنش شکست روی همان نمودار قرار می‌گیرد.

۴-۳- اندازه‌گیری کرنش شکست در قطعات ناچ‌دار

برای اندازه‌گیری کرنش شکست مؤثر قطعات ناچ‌دار از روش تغییر ضخامت به شرح ذیل استفاده می‌شود. قطعات ناچ‌دار پس از آزمون‌های کشش در دماهای مختلف، دچار گسیختگی و شکست در ناحیه ناچ می‌شوند. مقاطع شکست بررسی و با استفاده از دستگاه وی‌ام ام، ضخامت ناحیه شکست در دو حالت اندازه‌گیری از بالا و از پهلو مطابق شکل ۹ انجام و میانگین این اندازه‌ها در معادله (۵) استفاده می‌شود [۶ و ۸].

$$\varepsilon_{eff} = 2 \ln \left( \frac{t_1}{t_2} \right) \quad (5)$$

که در آن  $t_1$  ضخامت نهایی پس از شکست و  $t_2$  ضخامت اولیه محل ناچ برای کلیه نمونه‌های ناچ‌دار (۱/۸ mm) است. نتایج این تحلیل‌ها در جدول ۴ گزارش شده است.

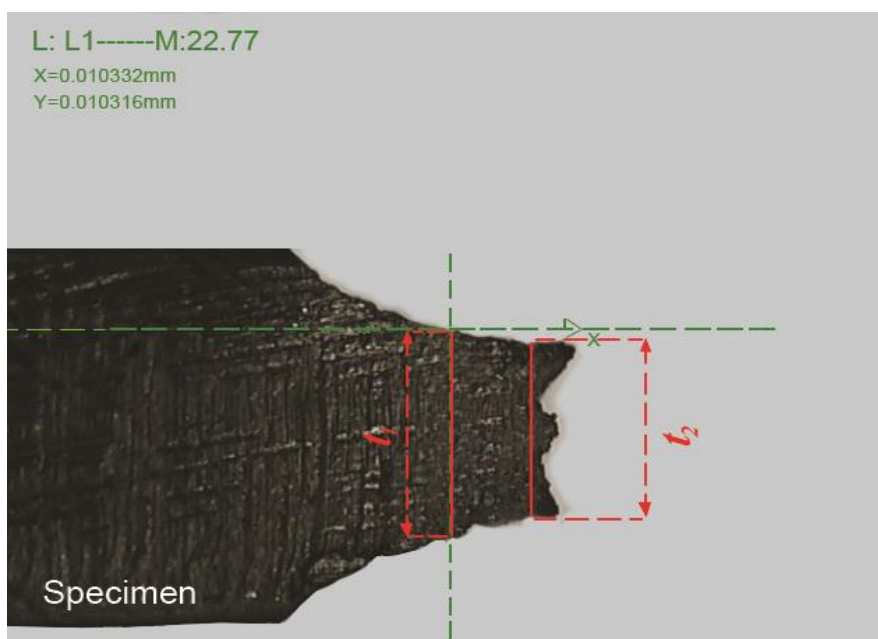
۴-۴- وابستگی کرنش شکست به سهمحوره‌ی تنش در دماهای مختلف

با توجه به نتایج حاصل از جداول ۳ و ۴، تغییرات کرنش شکست بر حسب سهمحوره‌ی تنش در دماهای مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با بررسی شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در سهمحوره‌ی ۰/۲، تغییرات کرنش شکست خیلی وابسته به دما نبوده و در سهمحوره‌های ۰/۳۸ و ۰/۵۵ بیشترین

جدول ۳. اندازه‌گیری کرنش شکست مؤثر قطعات برشی.

Table 3. The measured effective fracure strain of shear specimens.

کرنش شکست مؤثر	زاویه بعد از شکست (رادیان)	نام قطعات	دمای تست (درجه سانتیگراد)	تنش سه‌محوره
۰/۶۲	۱/۰۷	قطعات ۱ و ۲- برشی ۶۲ درجه	۲۵	۰/۲
۰/۴۱	۰/۷۰	قطعات ۳ و ۴- برشی ۹۰ درجه	۲۵	۰/۳۳
۰/۵۳	۰/۹۲	قطعات ۹ و ۱۰- برشی ۶۲ درجه	۲۰۰	۰/۲
۰/۴۳	۰/۷۵	قطعات ۱۱ و ۱۲- برشی ۹۰ درجه	۲۰۰	۰/۳۳
۰/۸۱	۱/۴۱	قطعات ۱۷ و ۱۸- برشی ۶۲ درجه	۴۰۰	۰/۲
۰/۸۹	۱/۵۴	قطعات ۱۹ و ۲۰- برشی ۹۰ درجه	۴۰۰	۰/۳۳



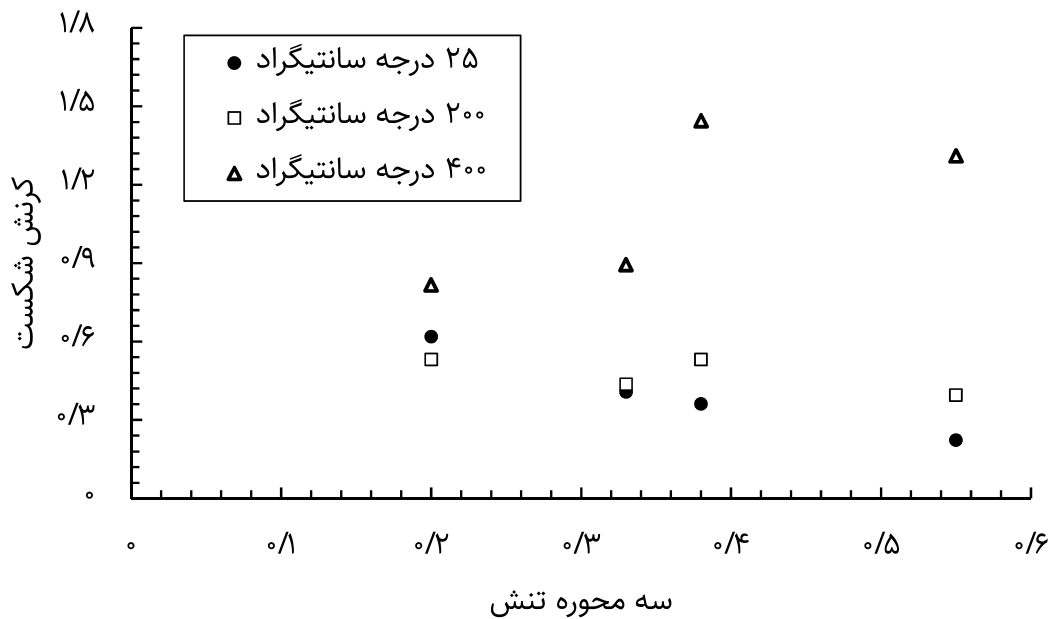
شکل ۹. طریقه اندازه‌گیری و مقطع شکست نمونه‌های ناچ‌دار با دستگاه وی‌ام‌ام (بزرگنمایی ۷ برابر).

Fig. 9. The method of measurement of notched specimens with VMM apparatus (7 magnification).

جدول ۴. اندازه‌گیری کرنش شکست مؤثر قطعات ناچ‌دار

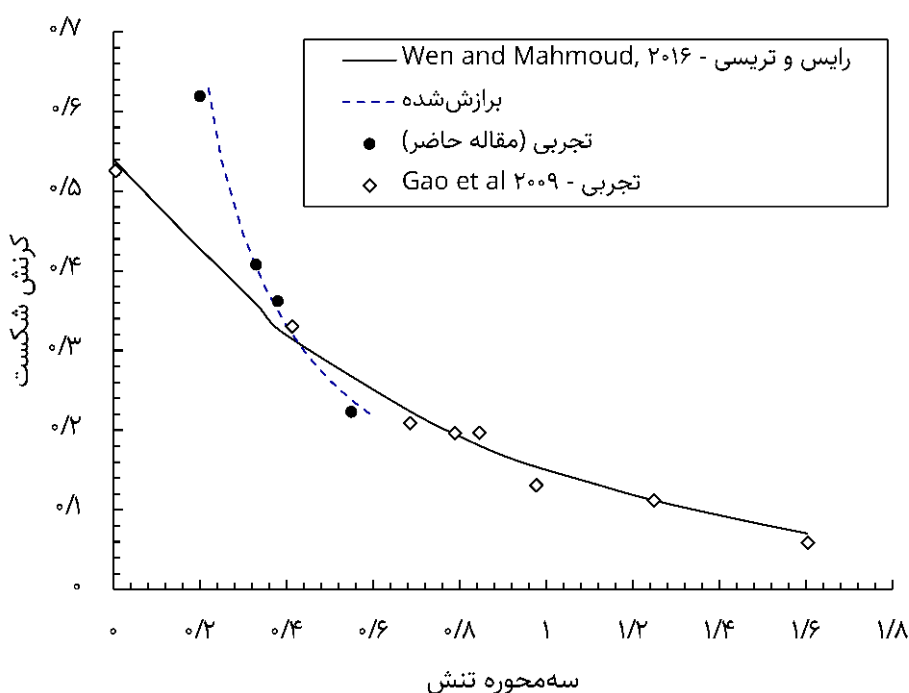
Table 4. The measured effective fracture strain of notched specimens.

کرنش شکست مؤثر	ضخامت اولیه (میلیمتر)	ضخامت نهایی (میلیمتر)	نام قطعات	دمای تست (درجه سانتیگراد)	تنش سه‌محوره
۰/۲۲	۱/۸	۱/۶۱	قطعات ۵ و ۶ - تخت ناچ‌دار	۲۵	۰/۵۵
۰/۳۶	۱/۸	۱/۵۰	قطعات ۷ و ۸ - تخت ناچ‌دار	۲۵	۰/۳۸
۰/۳۹	۱/۸	۱/۴۷	قطعات ۱۳ و ۱۴ - تخت ناچ‌دار	۲۰۰	۰/۵۵
۰/۵۳	۱/۸	۱/۳۸	قطعات ۱۵ و ۱۶ - تخت ناچ‌دار	۲۰۰	۰/۳۸
۱/۳۱	۱/۸	۰/۹۳	قطعات ۲۱ و ۲۲ - تخت ناچ‌دار	۴۰۰	۰/۵۵
۱/۴۴	۱/۸	۰/۸۷	قطعات ۲۳ و ۲۴ - تخت ناچ‌دار	۴۰۰	۰/۳۸



شکل ۱۰. نمودار نتایج نهایی تأثیر دما بر کرنش شکست در سه‌محوره‌های مختلف تنش برای آلومینیوم ۵۰۸۳.

Fig. 10. The effect of temperature on fracture strain at various stress triaxiality for Al5083.



شکل ۱۱. نمودار مقایسه نتایج آلومینیوم ۵۰۸۳ با داده‌های تجربی [۲۷] و مدل رایس و تریسی [۱۵] در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد.

Fig. 11. Comparison between the numerical results with experimental data [27] and also with the results of Rice and Tracy model [15] for Al5083 at 25°C.

## ۵- تفسیر نتایج

۲. با افزایش دما، اثر سه محوره‌ی تنش در کرنش شکست تقریباً افزایش می‌یابد. یعنی اختلاف کرنش شکست نمونه‌های متفاوت، با افزایش دما، به ازای سه محوره‌های مختلف افزایشی است (تغییرات کرنش شکست در سه محوره‌های تنش مختلف در برابر تغییرات دما (طبق نمودار شکل ۱۰). در دمای محیط، اختلاف کرنش شکست میان سه محوره‌های ۰/۲ و ۰/۵۵، ۶۴٪ می‌باشد. در حالیکه این اختلاف در دمای ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه، به ترتیب ۲۶٪ و ۶۲٪ است. همچنین برای دماهای محیط و ۴۰۰ درجه سانتیگراد برای سه محوره‌ی ۰/۲ میزان افزایش ۳۲٪، برای سه محوره‌ی ۰/۳۳ افزایش ۲۱۹٪، برای سه محوره‌ی ۰/۳۸ افزایش ۴۰۰٪ و برای سه محوره‌ی ۰/۵۵ میزان افزایش ۵۸۰٪ در مقدار کرنش شکست مشاهده شده است.

۳. برای نمونه‌های با سه محوره‌ی ۰/۲ و ۰/۳۳ به سبب کم بودن مقطع بحرانی، نیروی بیشینه کمتر از نمونه‌های با سه محوره‌ی ۰/۳۸ و ۰/۵۵ است. همچنین نیروی بیشینه نمونه‌ی با سه محوره‌ی ۰/۳۸ به سبب کم بودن اثرات تمرکز تنش، از نمونه‌ی با سه محوره‌ی ۰/۵۵ بیشتر است.

۴. با بررسی نمودار کرنش شکست بر حسب سه محوره (طبق شکل

از اهداف مهم این مقاله، اندازه‌گیری کرنش شکست قطعات برشی و ناچ‌دار در سه محوره‌های مختلف تنش تحت شرایط دمایی متفاوت می‌باشد. کرنش شکست با روشی جدید و با دستگاه وی‌ام ام اندازه‌گیری شد. برای تفسیر نتایج، آزمایشات متعددی بر روی نمونه‌های مختلف انجام شد. خلاصه نتایج حاصله به شرح زیر می‌باشند.

۱. در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد، کمترین تغییر شکل رخ داده است، در حالی که در سه محوره‌ی ۰/۳۸، در همه‌ی دماها بیشترین مقدار تغییر شکل شکست اتفاق می‌افتد. با توجه به شکل نمونه، شرایط تشدید تنش در موضع بحرانی برای نمونه‌ی با سه محوره‌ی ۰/۳۸ تقریباً وجود ندارد. در نمونه‌های با سه محوره‌ی ۰/۲ و ۰/۳۳ به سبب شکل نمونه‌ها، مقطع بحرانی بسیار کوچک است و لذا در کمترین جابجایی نمونه‌ها، تنش در آن موضع به مقدار نهایی می‌رسد. در خصوص نمونه‌ی با سه محوره‌ی ۰/۵۵ نیز به سبب وجود تمرکز تنش شدید، وضعیت تنش به سرعت به مقدار نهایی رسیده و سبب گسیختگی می‌شود.

برای صحت‌سنجی، نتایج بدست‌آمده در دمای محیط با نتایج تجربی دیگران و همچنین نتایج شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل رایس و تریسی مقایسه شدند. با مقایسه این نتایج، تطابق خوبی میان آنها مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده اعتبار روش پیشنهادی برای اندازه‌گیری کرنش شکست در نمونه‌های برشی است. همچنین با انجام آزمایش‌های جدیدی که در این مقاله انجام شده است، نقطه قطع‌شدن منحنی در سه‌محوره ۰/۲ بدست آمده است. از نتایج آزمایش‌ها چنین بر می‌آید تأثیر دما بر در نمودار کرنش شکست-سه‌محوره تنش، بصورت یکنواخت نیست. در دمای محیط، نمودار نزولی با اختلاف ۶۴٪ در کرنش‌های ابتدایی و انتهایی، در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد این اختلاف کمتر می‌شود (۲۶٪) بطوریکه می‌توان آن را یکنواخت فرض کرد ولی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد، نمودار با اختلاف ۶۲٪ میان کرنش‌های ابتدایی و انتهایی، صعودی می‌شود.

### منابع

- [1] D. Krajcinovic, J. Lemaitre, Continuum damage mechanics: theory and applications, Springer, 1987.
- [2] J. Hancock, A. Mackenzie, On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 24(2-3) (1976) 147-160.
- [3] J. Hancock, D. Brown, On the role of strain and stress state in ductile failure, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 31(1) (1983) 1-24.
- [4] Y. Bao, T. Wierzbicki, On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space, International Journal of Mechanical Sciences, 46(1) (2004) 81-98.
- [5] Y. Bai, T. Wierzbicki, A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence, International journal of plasticity, 24(6) (2008) 1071-1096.
- [6] Y. Bai, X. Teng, T. Wierzbicki, On the application of stress triaxiality formula for plane strain fracture testing, Journal of Engineering Materials and technology, 131(2) (2009).
- [7] A. Pradeau, S. Thuillier, J.W. Yoon, Prediction of failure in bending of an aluminium sheet alloy, International

(۱۰)، مشاهده می‌شود در دمای پایین (۲۵ درجه سانتیگراد)، با افزایش سه‌محوره کرنش شکست کاهش می‌یابد، در حالی که در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد تقریباً می‌توان گفت که کرنش شکست روند یکنواختی دارد ولی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد با افزایش سه‌محوره تنش، کرنش شکست افزایش می‌یابد. طبیعی است با افزایش دما مقدار کرنش شکست افزایش می‌یابد. اما تغییرات سه‌محوره موجب می‌شود که با افزایش آن وضعیت تنش به حالت بارگذاری هیدرواستاتیکی نزدیک می‌شود. به تبع آن، شرایط تنش برشی در قطعه کم می‌شود. برای ماده نرم، هر چه شرایط بارگذاری به وضعیت برشی نزدیکتر باشد، شکست زودتر اتفاق می‌افتد، و برای ماده‌ی ترد، بارگذاری نزدیک به وضعیت محوری (هیدرواستاتیک) خواهد بود و شکست زودتر اتفاق می‌افتد. در این شرایط، به سبب این که در دمای پایین ماده تردتر است، در سه‌محوره‌ی پایین ماده سریعتر به شکست می‌رسد. این در حالی است که در دمای بالا با افزایش سه‌محوره، به سبب افزایش نرمی کرنش شکست افزایش می‌یابد. در دمای ۲۰۰ درجه نیز رفتار تقریباً یکنواختی نشان می‌دهد. از طرف دیگر به ازای سه‌محوره‌ی مشخص (بجز سه‌محوره‌ی ۰/۲)، با افزایش دما کرنش شکست افزایش می‌یابد. این تغییرات با افزایش سه‌محوره‌ی شدت بیشتری پیدا می‌کند. چرا که با افزایش دما، تغییرات نسبی ماده از تردی به نرمی، سبب تغییر مکانیزم شکست می‌شود.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش نوین اندازه‌گیری کرنش شکست قطعات برشی و ناچ‌دار تحت سه‌محوره‌های مختلف تنش ارائه شده است. در این روش از دستگاه اندازه‌گیری وی‌ام ام برای اندازه‌گیری کرنش استفاده شده است. ماده‌ی مورد آزمایش آلومینیوم ۵۰۸۳-اچ ۳۲۱ می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر دما و سه‌محوره تنش بر کرنش شکست ماده مذکور می‌باشد. برای این منظور بیست و چهار نمونه مختلف تخت از جمله نمونه‌های برشی و ناچ‌دار برای چهار نوع سه‌محوره‌ی ۰/۲ و ۰/۳۳ و ۰/۳۸ و ۰/۵۵ جهت تست در سه محدوده دمایی (۲۵، ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد) آماده‌سازی شدند و تحت شرایط بارگذاری استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. برای بدست آوردن سه‌محوره تنش، از شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها کمک گرفته شد. شکست در ناحیه‌های ناچ‌دار اتفاق می‌افتد و بر همین اساس، مقدار سه‌محوره‌های تنش گزارش شده از میانگین سه‌محوره‌های تنش چندین المان در منطقه ناچ‌دار بدست آمده‌اند. کرنش شکست نمونه‌ها در شرایط تنشی و دمایی مختلف اندازه‌گیری و نتایج مرتبط بدست آمدند.



- compression and shear preloading, *International Journal of Material Forming*, 15(4) (2022) 1-14.
- [18] S. Bharti, A. Gupta, H. Krishnaswamy, S. Panigrahi, M.-G. Lee, Evaluation of uncoupled ductile damage models for fracture prediction in incremental sheet metal forming, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37 (2022) 499-517.
- [19] X. Chen, Y. Peng, S. Peng, S. Yao, C. Chen, P. Xu, Flow and fracture behavior of aluminum alloy 6082-T6 at different tensile strain rates and triaxialities, *PloS one*, 12(7) (2017) e0181983.
- [20] A. Bashiri, M. Hosseini, H. Hatami, Experimental and Numerical investigation on CK45, St12, Al3105 with layers under drop test free loading, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 1) (2021).
- [21] X. Huang, Z. Zhou, Y. Zhu, D. Zhu, L. Lu, Tension–shear experimental analysis and fracture models calibration on Q235 steel, *International Journal of Steel Structures*, 18(5) (2018) 1784-1800.
- [22] M. Murugesan, D.W. Jung, Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applications, *Materials*, 12(4) (2019) 609.
- [23] G. Su, Y. Liu, X. Xiao, J. Du, P. Zhang, X. Shen, Influences of Stress State, Temperature, and Strain Rate on Ductility of Pure Iron, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(3) (2021) 2036-2046.
- [24] G. Cortis, F. Nalli, M. Sasso, L. Cortese, E. Mancini, Effects of Temperature and Strain Rate on the Ductility of an API X65 Grade Steel, *Applied Sciences*, 12(5) (2022) 2444.
- [25] J.-M. Seo, H.-T. Kim, Y.-J. Kim, H. Yamada, T. Kumagai, H. Tokunaga, N. Miura, Effect of strain rate and stress triaxiality on fracture strain of 304 stainless steels for canister impact simulation, *Nuclear Engineering and Technology*, 54(7) (2022) 2386-2394.
- [26] P. Wu, Y. Lou, Q. Chen, H. Ning, Modeling of temperature-and stress state-dependent yield and fracture *Journal of Mechanical Sciences*, 119 (2016) 23-35.
- [8] W. Li, F. Liao, T. Zhou, H. Askes, Ductile fracture of Q460 steel: Effects of stress triaxiality and Lode angle, *Journal of Constructional Steel Research*, 123 (2016) 1-17.
- [9] Y. Lou, H. Huh, S. Lim, K. Pack, New ductile fracture criterion for prediction of fracture forming limit diagrams of sheet metals, *International Journal of Solids and Structures*, 49(25) (2012) 3605-3615.
- [10] J. Choung, W. Nam, D. Lee, C.Y. Song, Failure strain formulation via average stress triaxiality of an EH36 high strength steel, *Ocean Engineering*, 91 (2014) 218-226.
- [11] V. Jablovkov, D. Goto, D. Koss, J. McKirgan, Temperature, strain rate, stress state and the failure of HY-100 steel, *Materials Science and Engineering: A*, 302(2) (2001) 197-205.
- [12] F. Yu, P.-Y.B. Jar, M. Hendry, Effect of temperature on deformation and fracture behaviour of high strength rail steel, *Engineering Fracture Mechanics*, 146 (2015) 41-55.
- [13] L. Driemeier, M. Brünig, G. Micheli, M. Alves, Experiments on stress-triaxiality dependence of material behavior of aluminum alloys, *Mechanics of Materials*, 42(2) (2010) 207-217.
- [14] R.-Y. Chen, H.-Y. Chu, C.-C. Lai, C.-T. Wu, Effects of annealing temperature on the mechanical properties and sensitization of 5083-H116 aluminum alloy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 229(4) (2015) 339-346.
- [15] H. Wen, H. Mahmoud, New model for ductile fracture of metal alloys. I: Monotonic loading, *Journal of engineering mechanics*, 142(2) (2016) 04015088.
- [16] S. Gatea, H. Ou, B. Lu, G. McCartney, Modelling of ductile fracture in single point incremental forming using a modified GTN model, *Engineering Fracture Mechanics*, 186 (2017) 59-79.
- [17] M. Zistl, M. Brünig, S. Gerke, Analysis of damage and fracture behavior in ductile metal sheets undergoing



- aluminum 5083 alloy, International Journal of Plasticity, 25(12) (2009) 2366-2382.
- [28] W.-F. Chen, D.-J. Han, Plasticity for structural engineers, J. Ross Publishing, 2007.
- behaviors for Mg-Gd-Y alloy, International Journal of Mechanical Sciences, (2022) 107506.
- [27] X. Gao, T. Zhang, M. Hayden, C. Roe, Effects of the stress state on plasticity and ductile failure of an

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Ostadi, M. Ganjani, A New Method for Calculating the Fracture Strain of Shear and Notched Specimens at Various Temperature and Stress Triaxialities, Amirkabir J. Mech Eng., 54(8) (2022) 1917-1932.

DOI: 10.22060/mej.2022.21081.7376

