

# تحلیل تجربی و عددی تأثیر فشار هیدرواستاتیک در شکست نرم آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶

محسن منصوری<sup>۱</sup>، سید مهدی گنجیانی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- mansouri.mohsen@ut.ac.ir

۲- ganjiani@ut.ac.ir

## چکیده:

در این مقاله از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی برای مطالعه سه محوره تنش، پارامتر زاویه لود و تأثیر آنها بر رفتار شکست نرم آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ استفاده شده است. برای مطالعه مقادیر سه محوره تنش منفی، به جای انجام آزمون دومحوره، از آزمون‌های تک‌محوره کششی و فشاری بر روی هندسه‌های خاص استفاده شد. این هندسه‌ها شامل نمونه دمبلی و نمونه‌های مستطیلی حاوی حفره بیضوی دارای انحنا می‌باشند. مقادیر سه محوره تنش منفی در بازه ۰/۳۵۵- تا ۰/۵۵۵- به دست آمدند. با مقایسه نتایج آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی، می‌توان نتیجه گرفت که هر دو روش مقادیر کرنش شکست مطابقت یکسان پیش‌بینی می‌کنند. بر اساس کانتورهای آسیب، ناحیه‌ای که شکست در آن آغاز می‌شود با نواحی دارای بیشترین کرنش پلاستیک همپوشانی دارد، هرچند مقدار این کرنش تحت تأثیر مقدار تنش سه‌محوره و زاویه لود می‌باشد. براساس داده‌های بدست آمده، مشاهده شد که در تنش سه‌محوره‌های مثبت، کرنش شکست ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، در حالی که در تنش سه‌محوره‌های منفی، این روند برعکس بوده و کرنش شکست ابتدا کاهش و سپس افزایش پیدا می‌کند.

## واژگان کلیدی:

سه محوره تنش منفی، کرنش شکست، زاویه لود نرمالیزه شده، شکست نرم

\* سید مهدی گنجیانی، دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک-دانشگاه تهران.

ایمیل: ganjiani@ut.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

# EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF HYDROSTATIC PRESSURE IN DUCTILE FRACTURE OF AL-6061T6

M. Mansouri<sup>1</sup>, M. Ganjiani<sup>2</sup>

1- Ph.D Student of Mechanical Engineering of Tehran University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran.

## Abstract:

In this paper, a combination of experimental tests and numerical simulations is used to investigate the effects of stress triaxiality and the Lode angle parameter on the ductile fracture behavior of 6061-T6 aluminum alloy. Ductile fracture is a critical failure mode in aluminum components, and its accurate characterization is essential for the safe and reliable design of engineering structures. Instead of performing conventional biaxial tests, uniaxial tensile and compression tests on specifically designed geometries are carried out to generate negative stress triaxiality conditions. To examine the influence of negative stress triaxiality on fracture strain, several specimen geometries are designed to achieve various levels of negative stress triaxiality. The introduction of curvatures and notches alters the local stress state from uniaxial to multiaxial conditions. A standard dog-bone specimen is tested under tension, while specimens M1, M2, M3, M4, and M5 are specifically developed to investigate the effect of different stress triaxialities under uniaxial loading. Since these geometries have not been previously reported in the literature, no standard testing procedure is available for them. Each test is repeated three times, and the average results are reported. Numerical analyses are conducted using the finite element software Abaqus/Explicit to evaluate the behavior of the designed geometries under negative stress triaxiality. To capture ductile damage evolution in the simulations, the built-in ductile damage model in Abaqus is employed. The obtained negative stress triaxiality values range from  $-0.355$  to  $-0.555$ , while for the standard dog-bone specimen under tension, the stress triaxiality remains approximately  $0.33$ , representing uniaxial loading. By comparing the results of experimental tests and simulations, a strong agreement is observed, confirming that both approaches predict similar fracture strain values. Based on the damage contours obtained from the numerical analysis, the fracture initiates in regions exhibiting the highest plastic strain, which are consistent with the experimentally observed failure locations. It is further observed that stress triaxiality has a significant influence on ductile fracture behavior, and the trend of fracture strain variation differs between positive and negative triaxiality regimes.

**Keywords:** Stress triaxiality, Fracture strain, Normalized Lode angle, Ductile fracture

## ۱- مقدمه

استفاده از فلزات با کیفیت بالا مانند انواع مختلف آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا طی دهه‌های اخیر به طرز چشمگیری افزایش یافته است. این منجر به بهبود خواص مواد برای جلوگیری از محلی شدن زودرس کرنش‌های غیر الاستیک و همچنین آسیب و شکست اجزای سازه‌ای در شرایط بارگذاری پیچیده می‌شود. آسیب با تغییر شکل پلاستیکی آغاز شده و با شکست قطعه خاتمه می‌یابد. آسیب نرم به تخریب مواد فلزی تحت شرایط بارگذاری یکنواخت اشاره دارد. مشکلات ناشی از آسیب نرم نقش کلیدی در صنعت دارند و باین‌حال، خرابی ناشی از شکست نرم اجتناب‌ناپذیر است [۱].

تلاش‌های قابل توجهی به مطالعه شکست شکل‌پذیر فلزات، با طیف گسترده‌ای از مدل‌های شکست شکل‌پذیر پیشنهاد شده است. مدل‌های موجود را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: مدل‌های شکست کوپل شده و مدل‌های شکست کوپل نشده. اولی تأثیر آسیب انباشته در طول تغییر شکل پلاستیک را بر روی استحکام فلز به حساب می‌آورد، درحالی‌که دومی تأثیر آسیب بر استحکام فلز را قبل از شکست نهایی نادیده می‌گیرد [۲]. مدل‌های کوپل شده آسیب‌های مرتبط با پلاستیسیته را دارند. سطح آسیب بر اساس تاریخچه بار و رابطه تنش-کرنش برآورد می‌شود که در نتیجه با افزایش آسیب کاهش می‌یابد. در مورد مدل‌های کوپل نشده به همین ترتیب آسیب وارد می‌شود اما پلاستیسیته تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد [۳].

اگرچه مدل‌های شکست کوپل شده دارای مزایایی در توضیح مکانیزم‌های فیزیکی زیربنایی شکست نرم هستند، اما همچنان در کاربردهای مهندسی محدودیت‌هایی دارند: اول آن‌که، آن‌ها معمولاً پارامترهای مهم فیزیکی زیادی دارند که به دست آوردن دقیق آن‌ها دشوار است [۴]. دوم آن‌که، شبیه‌سازی با مدل‌های شکست کوپل شده در مقایسه با مدل‌های شکست کوپل نشده زمان‌بر است [۵]. باین‌حال، مدل‌های کوپل نشده دارای نقاط ضعفی نیز هستند. عموماً بر اساس داده‌های تجربی و به صورت پدیدارشناختی توسعه داده می‌شوند. به همین دلیل، پارامترهای به کاررفته در این مدل‌ها اغلب فاقد معنای فیزیکی مشخص هستند و تفسیر مستقیم فیزیکی آن‌ها دشوار است. این موضوع باعث می‌شود که کاربرد این پارامترها

در شرایط مختلف یا برای مواد متفاوت همراه با ابهام است [۶]. همچنین، این مدل‌ها فرض می‌کنند که ماده همواره در ناحیه سخت‌شوندگی باقی می‌ماند. علاوه بر این، فرض می‌شود که این مدل‌ها هیچ متغیر حالت داخلی وابسته نیستند و تنها از کرنش پلاستیک استفاده می‌کنند [۷].

به دلیل سادگی ساختاری، در سال‌های اخیر تعداد زیادی از مدل‌های کوپل نشده با فرضیات و روش‌های آزمایشگاهی مختلف توسعه یافته‌اند. مدل کوپل نشده مبتنی بر انرژی اولین بار توسط فرودنتال معرفی شد [۸]. او بیان کرد که شکست نرم زمانی رخ می‌دهد که کار پلاستیک در هر واحد حجم ماده از یک آستانه عبور کند. نتیجه‌گیری این بود که شکست نرم همیشه در ناحیه‌ای با اولین تنش اصلی رخ می‌دهد. در ادامه، کاکرافت و لاتام یک مدل شکست ارائه کردند که بر اساس اولین تنش اصلی استوار بود [۹].

در مقایسه با مدل‌های کوپل شده، نمونه‌های کوپل نشده به دلیل سادگی در ساختار و شناسایی نسبتاً آسان پارامترهای آن‌ها بیشتر برای کاربردهای صنعتی ترجیح داده می‌شوند [۱۰]. فرایند کالیبراسیون آسان‌تر یک مزیت اساسی مدل‌های کوپل نشده است، که برای آن می‌توان کالیبراسیون پاسخ پلاستیک و کالیبراسیون آسیب‌های نرم را جدا کرد. در صورت استفاده از مدل مواد کوپل نشده، کالیبراسیون به وضوح آسان‌تر است.

در بسیاری از آزمایش‌ها نشان داده شده است که وابستگی حالت تنش به فرآیندهای شکست برای مواد مختلف متفاوت است. بریچمن [۱۱] تغییر شکل و رفتار شکست میله‌های استوانه‌ای ۲۰ نوع مختلف فولاد نرم را در آزمایش‌هایی با فشار هیدرواستاتیک بین ۰ تا ۲۷۰۰ مگاپاسکال بررسی کرد. او مشاهده کرد که همه نمونه‌ها شکسته نشده‌اند و نتیجه گرفت که شکست بستگی زیادی به فشار هیدرواستاتیک دارد. نتایج تجربی بریچمن توسط بائو و ویرزیبکی [۱۲] مورد تجدیدنظر قرار گرفت. ایشان استوانه‌های کوتاه را با نسبت ابعاد مختلف فشرده کرده و مشاهده کردند که شکل محل شکست مستقل از مواد است. آن‌ها همچنین به صورت تجربی مقدار قطع ثابت سه محوره تنش  $0.33$  - را به دست آوردند. علاوه بر این، ژنگ و همکاران [۱۳] آزمایش‌های فشار را با نمونه‌های لوله نازک انجام داد که سه محوره تنش منفی کوچک را تا  $0.14$  - به دست آوردند تا معادله تکامل آسیبشان را تأیید کنند. علاوه بر این، خان و

لیو [۱۴] آلیاژ آلومینیوم را در آزمایش‌های فشار دوجوهری بررسی کردند. کمترین میزان سه محوره تنش ۰/۴۹۶- بود که هنوز شکست نرم در آن رخ می‌داد. کوپیک و همکاران [۳] نمونه‌های تازه طراحی شده برای آزمایش‌های فشار تک‌محوری را پیشنهاد کردند. سیلندرهای آن‌ها با فرورفتگی کروی اجازه می‌دهد تا برای آلیاژهای آلومینیوم تا سه محوره تنش منفی تا ۰/۴۷۳- برسند. علاوه بر این، لو و همکاران [۱۵] نتایج تجربی آزمایش‌ها فشار تک‌محوری و کرنش صفحه‌ای را با دو نمونه مختلف برای بررسی وابستگی پارامتر لود به مقدار قطع سه محوره تنش ارائه دادند. با این حال، این آزمایش‌ها فقط برای نمونه‌های گرفته شده از نمونه‌های مواد ضخیم امکان‌پذیر است در حالی که برای نمونه‌های مسطح که از ورقه‌های نازک گرفته شده است باید یک برنامه آزمایشی جایگزین تهیه می‌شد که برونینگ و همکاران [۱۶] به آن پرداختند.

کوپیک و همکاران [۳] به مقدار متوسط سه محوره تنش کمتر از ۰/۳۳- در محل شروع ترک رسیدند. پنگ و همکاران [۱] با بررسی وابستگی شکست نرم به پارامترهای ناوردای اول تانسور تنش و ناوردای دوم تانسور تنش انحرافی و زاویه لود و سه محوره تنش، یک مدل کوپل نشده جدید معرفی کردند تا بتوانند شکست نرم فلزات را در محدوده وسیعی از سه محوره تنش خصوصاً در سه محوره تنش بالا پیش‌بینی کنند. گنجیانی [۱۷] یک مدل شکست در چارچوب مکانیک آسیب پیوسته ارائه کرده است. این مدل، از سطح تسلیم پلاستیک فون میسز و یک سطح تسلیم آسیب بهره می‌گیرد که به تنش سه محوری و پارامتر زاویه لود بستگی دارد. وانگ و همکاران [۱۸] اثر سه محوره تنش و نرخ کرنش را روی کرنش شکست  $Ti6Al4V$  بررسی کرده‌اند. ایشان برای این منظور قطعاتی در ابعاد مختلف طراحی کردند. سپس بارگذاری با نرخ کم به صورت متعارف و بارگذاری با نرخ بالا به کمک میله فشار هاپکینسون انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داده است که کرنش شکست با افزایش سه محوره تنش و یا افزایش نرخ کرنش، کاهش می‌یابد. هونگ و همکاران، بر روی رفتار شکست لوله‌های اکستروژده از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ با سه محوره‌های تنش مختلف مطالعه انجام دادند. مشاهده شد که سه محوره‌ی تنش به تدریج با افزایش شعاع بریدگی نمونه بریدگی آلیاژ آلومینیوم کاهش یافت و سه محوری تنش در مرکز شکاف بیشتر از سه

محوری تنش در ریشه شکاف بود [۱۹]. لیو و همکاران، تغییر شکل و رفتار آلومینیوم تحت سه محوره تنش‌های مختلف توسط آزمون کشش مطالعه کردند. اثر ضخامت و شعاع انحنا در نمونه‌های دمبلی بررسی شدند. رفتار شکست در نمونه‌های ضخیم‌تر تردتر ولی تغییر شکل یکنواخت‌تر است. ضخامت بیشتر نمونه، تغییر شکل یکنواخت را در جهت ضخامت تضمین می‌کند. در این شرایط، کرنش سطحی اندازه‌گیری شده نمونه‌های ضخیم برای بیان خواص ماده استفاده می‌شود [۲۰]. گائو و همکاران، به صورت تجربی نشان دادند که سه محوره تنش و زاویه لود بر روی رفتار پلاستیک آلیاژهای آلومینیوم اکستروژده اثر قابل توجهی دارد. به همین دلیل، یک مدل ساختاری مناسب ارائه شد که شامل یک معیار تسلیم جدید بود. با مقایسه مدل آن‌ها با نتایج عددی، مشخص شد که مدل توانایی پیش‌بینی رفتار آلومینیوم در وضعیت تنش متفاوت را دارد [۲۱].

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی رفتار شکست در آلیاژهای مختلف اختصاص یافته است. اثر تنش سه‌محوره‌ی مثبت بر شکست نرم آلیاژهای آلومینیوم  $AW5754$  (با استحکام متوسط) و  $AW6082$  (با استحکام بالا) در نرخ‌های کرنش شبه‌استاتیکی مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۲]. شبیه‌سازی‌های عددی با نرم‌افزار ABAQUS انجام و نتایج حاصل با داده‌های تجربی نیرو-جابجایی اعتبارسنجی شد تا مقادیر تنش سه‌محوره و کرنش پلاستیک معادل در لحظه‌ی شکست تعیین گردد. برای برازش بهینه‌ی منحنی تنش سه‌محوره از تابع نمایی استفاده شد و نتایج نشان دادند که آلیاژ  $AW5754$  حساسیت بیشتری نسبت به نرخ کرنش در محدوده‌های کرنش پایین از خود نشان می‌دهد.

گونزالس و همکاران [۲۳] تأثیر تنش سه‌محوره را بر تکامل آسیب در نمونه‌های کششی استوانه‌ای آلیاژ آلومینیوم  $Al-2024$  بررسی کردند. در این پژوهش مدل‌های آسیب کوپل شده و غیرکوپل شده که وابسته به تنش سه‌محوره هستند با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج عددی نشان داد که مدل‌های غیرکوپل شده در شرایط مختلف تنش سه‌محوره، کرنش شکست بالاتری را نسبت به مدل‌های کوپل شده پیش‌بینی می‌کنند. همچنین تکامل تنش سه‌محوره تحلیل شد تا تأثیر آن بر انباشتگی آسیب مورد ارزیابی قرار گیرد. در ادامه، برای بهبود انطباق مدل، یک توسعه‌ی دوخطی

شد که شامل تابع وزن دهی وابسته به تنش سه محوره است تا دقت پیش بینی شکست بهبود یابد.

در این مطالعه، آزمون های کشش و فشار بر روی آلومینیوم در سه محوره تنش مختلف انجام گرفت. در این پژوهش، با طراحی هندسه های خاص (شامل نمونه های مستطیلی با انحنای و حفره های بیضی با شعاع های انحنای متفاوت)، امکان دستیابی به مقادیر مختلفی از تنش سه محوره منفی تنها از طریق آزمون های تک محوره فشاری فراهم شده است. بنابراین، در روش ارائه شده نیازی به استفاده از آزمون های چند محوره پیچیده و پرهزینه وجود ندارد و می توان رفتار شکست نرم را با دقت بالا و در شرایط کنترل شده مورد ارزیابی قرار داد. مدل های هندسی مختلف مانند دمبل و نمونه های مستطیلی حاوی حفره بیضی طراحی شدند تا مقادیر مختلف سه محوره تنش به دست بیاید. آزمون های انجام شده توسط نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه سازی شدند. برای شبیه سازی نمونه ها، از مدل آسیب نرم استفاده شد. کرنش شکست به ازای سه محوره تنش و زاویه لود مختلف به روش تجربی و عددی محاسبه و رفتار شکست نرم آلومینیوم بررسی شد.

## ۲- تعریف حالت تنش

### ۲-۱- تحلیل تئوری:

حالت تنش را می توان با استفاده از سه محوره تنش و پارامتر زاویه لود توصیف کرد. مفهوم فضای تنش برای تعیین اثر حالت تنش بر کرنش شکست مواد معرفی شده است. برای مواد همسانگرد، رفتار مکانیکی مستقل از جهت مکانی است، بنابراین سه مقدار مشخصه تانسور تنش، یعنی تنش های اصلی  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  را می توان در فضای تنش اصلی سه بعدی در نظر گرفت. در همین حال، فضای تنش اصلی متعامد را می توان به طور معادل در مختصات لود، که یک سیستم مختصات استوانه ای است، که در آن تنش هیدرواستاتیکی محور تقارن است، دوباره تعریف کرد. مختصات لود را می توان از نسخه مقیاس شده سه متغیر تنش  $(p, q, r)$  که به صورت زیر تعریف می شوند ساخته می شوند:

$$p = -\sigma_m = -\frac{1}{3}tr(\sigma) = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1)$$

از مدل کوپل شده لمایتر پیشنهاد شد تا هم پیوستگی بین سخت شوندگی و آسیب به صورت دقیق تر باز نمایی گردد.

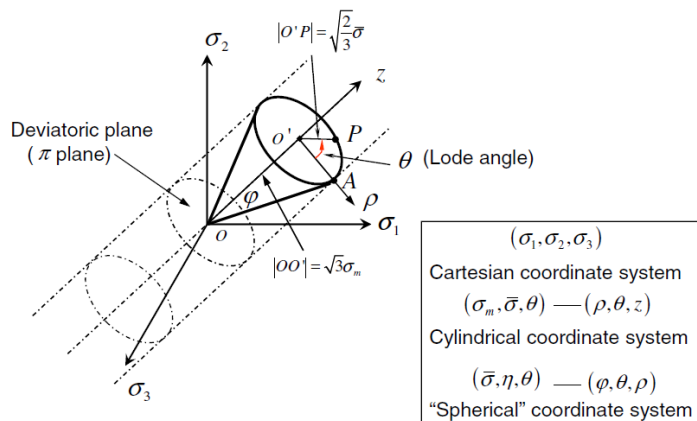
رفتار مکانیکی و مکانیسم های شکست نرم آلیاژ تیتانیوم TC۴ نیز در بازه ی گسترده ای از شرایط تنش سه محوره (از ۰/۲۳ تا ۰/۵۹) بررسی شده است [۲۴] ویژگی های شکست نرم نظیر جوانه زنی، رشد و هم جوشی حفرات میکروسکوپی بسته به حالت تنش تغییر یافته اند. در این مطالعه، مدل شکست DF۲۰۱۶ برای تحلیل پلاستیک و شبیه سازی عددی به کار گرفته شد تا پیش بینی دقیقی از شکست در مقادیر مختلف تنش سه محوره حاصل گردد. همچنین مدل شکست نرم DF۲۰۱۲ برای آلیاژ Ti۶Al۴V در نرخ های کرنش بالا مورد استفاده قرار گرفت [۲۵]. آزمون های کشش با سرعت بالا نشان دادند که پارامترهای مدل ثابت نبوده و با نرخ کرنش تغییر محسوسی دارند. به منظور توصیف این رفتار، توابع وابسته به نرخ کرنش جدیدی بر پایه ی تحلیل آماری مورفولوژی حفرات پیشنهاد گردید و مدل اصلاح شده ی DF۲۰۱۲ از طریق آزمون های ضربه ای هاپکینسون مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. این مدل توانست جابجایی شکست را با خطایی کمتر از ۱۰٪ در نرخ های کرنش بالا پیش بینی کند.

وانگ و همکاران [۲۶] روش آزمایشگاهی جدیدی را معرفی کردند که از یک نمونه ی پروانه ای شکل و دستگاه بارگذاری چند محوره برای ایجاد پیوسته ی حالت های مختلف تنش استفاده می کرد. با استفاده از این دستگاه و روش تصویربرداری همبستگی دیجیتال، اثر بازه ی گسترده ای از تنش های سه محوره (از ۰/۶۰۸ تا ۰/۵۹۴) بر رفتار شکست آلیاژ منیزیم AZ۳۱ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار تنش سه محوره، مکانیزم شکست از نوع برشی به نوع کششی تغییر می یابد.

چنگ و همکاران [۲۷] رفتار شکست فولاد ضد زنگ  $0.001\text{Cr}17\text{Ni}4\text{Cu}4\text{Nb}$  را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش مدل های غیر کوپل شده ی مختلف در چارچوبی ترکیبی از تحلیل تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که معیار Lou-Yoon بهترین عملکرد کلی را دارد، هرچند در بالاترین مقادیر تنش سه محوره کرنش شکست را بیش از مقدار واقعی پیش بینی می کند. در نتیجه، مدل لو-یوون اصلاح شده ای پیشنهاد

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

بنابراین، حالت تنش می‌تواند با  $\eta$  و  $\bar{\theta}$  نشان داده شود.



شکل ۱. سه نوع سیستم مختصات در فضای تنش‌های اصلی [۲۸]

Fig 1. Three types of coordinate systems in the space of principal stresses [28]

## ۲-۲- مدل‌های هندسی:

به‌منظور بررسی رفتار شکست نرم آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ تحت مقادیر مختلف سه محوری تنش و زاویه لود، آزمون‌های مکانیکی چهار نوع نمونه با هندسه‌های مختلف انجام شد. از آنجایی که سه محوری تنش منفی مورد مطالعه است، این هندسه‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که اطمینان حاصل شود که سه محوری تنش منفی تحت بارگذاری کششی و فشاری ایجاد شوند. آزمون کشش و فشار باعث ایجاد وضعیت تنش تک‌محوره در قطعه می‌شوند ولی با ایجاد انحنای یا شیار در قطعه، می‌توان وضعیت تنش را به چندمحوری تبدیل کرد. هندسه نمونه‌های M1 تا M5 به‌صورت مستطیل هستند که درون آن‌ها سوراخی بیضوی شکل ایجاد شده است. ابعاد مستطیل در نمونه‌های M1 تا M5 به طول ۲۰۴ و عرض ۴۵ میلی‌متر هستند. حفره بیضوی شکل با شعاع‌های ۲۱/۸۷۵ و ۱۳/۵ میلی‌متر ایجاد شده که در نمونه‌های M2، M3، M4 و M5 در راستای شعاع کوچک‌تر، دو انحنای با شعاع‌های متفاوت تشکیل شده است. ضخامت تمامی نمونه‌ها، ۵ میلی‌متر است. ابعاد نمونه‌های استفاده شده در شکل ۲ نمایش داده شده است.

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

$$= \sqrt{3 J_2}$$

$$r = \left[ \frac{27}{2} \det(S) \right]^{1/3} = \left[ \frac{27}{2} (\sigma_1 - \sigma_m)(\sigma_2 - \sigma_m)(\sigma_3 - \sigma_m) \right]^{1/3} = \left[ \frac{27}{2} J_3 \right]^{1/3} \quad (3)$$

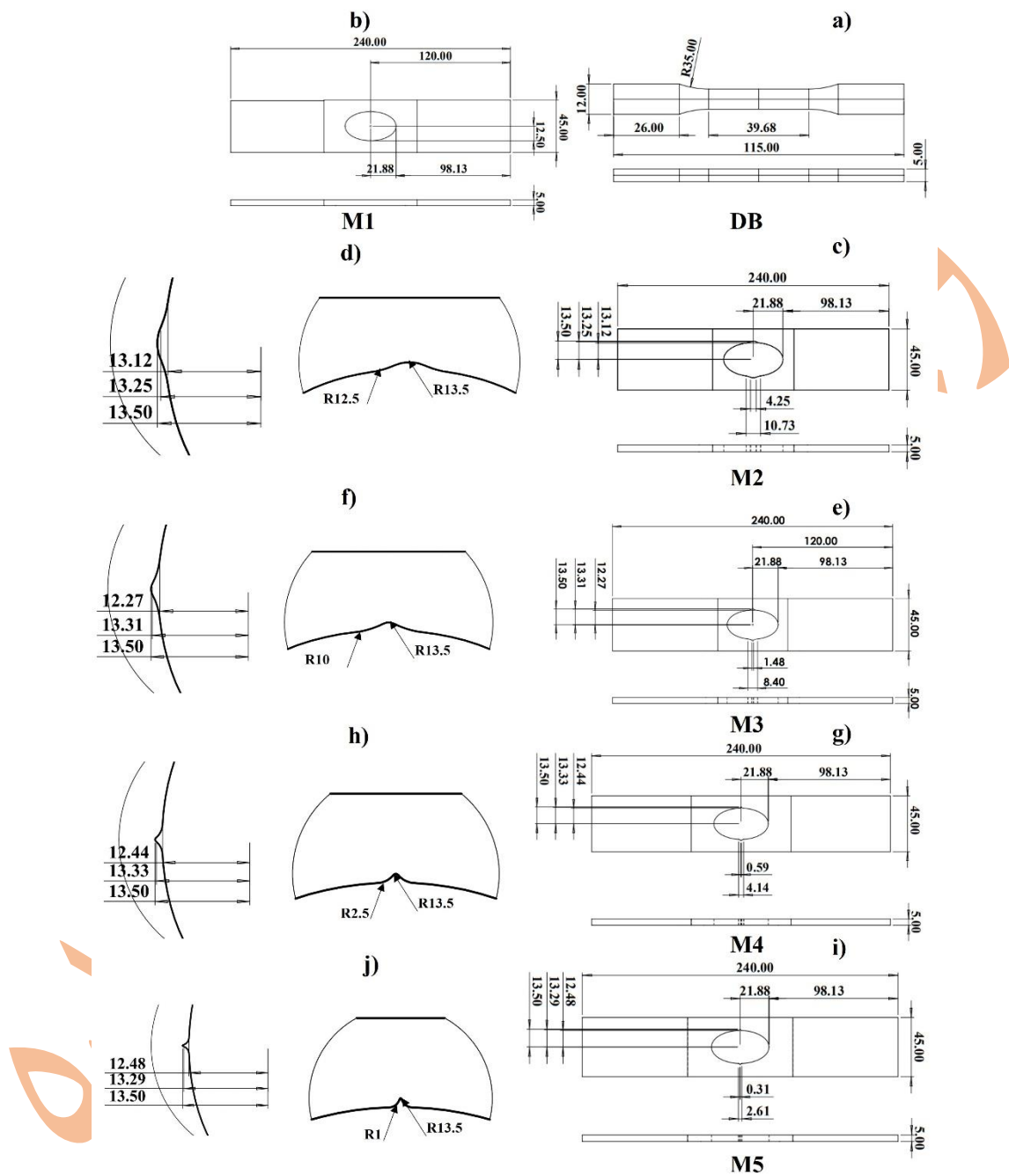
که در آن  $S$ ، تانسور تنش انحرافی و معادل  $S = \sigma - pI$ ، تانسور همانی،  $I$  تانسور تنش و  $\sigma_m$  و  $\bar{\sigma}$  به ترتیب تنش هیدرواستاتیک و تنش معادل فون میزس هستند.  $J_2$  و  $J_3$  نیز دومین و سومین ناوردای تنش انحرافی هستند. سه محوری تنش یک پارامتر مهم برای ارزیابی شکست پلاستیک و در مدل آسیب پلاستیک در نظر گرفته شده است، که به‌عنوان نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش معادل فون میزس در رابطه (۴) تعریف شده است:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (4)$$

بسیاری از مشاهدات تجربی و مطالعات عددی نشان دادند که اثر حالت تنش بر رفتار شکست نمی‌تواند به‌طور کامل توسط سه محوری تنش به‌تنهایی در ایجاد معادله سازنده آسیب مواد انعطاف‌پذیر منعکس شود. بنابراین، سه محوری تنش برای توصیف کامل حالت تنش کافی نیست و پارامتر زاویه لود مربوط به حالت تنش انحرافی باید به‌طور مشترک استفاده شود. زاویه لود  $\theta$  از طریق تنش انحرافی سوم نرمال شده  $\xi$  در معادله (۵) تعریف می‌شود:

$$\xi = \left( \frac{r}{q} \right)^3 = \cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} = \frac{27}{2} \frac{J_3}{q^3} \quad (5)$$

زاویه لود  $\theta$  را می‌توان با پارامتر  $\bar{\theta}$  نرمال کرد که به آن پارامتر زاویه لود گفته می‌شود که در شکل ۱ نشان داده شده است و از رابطه زیر به دست می‌آید:



شکل ۲. مدل هندسی نمونه‌ها: الف) دمبلی ب) نمونه M1، ج) نمونه M2، د) تصویر بزرگنمایی شده انحنا نمونه M2، ه) نمونه M3، و) تصویر بزرگنمایی شده انحنا نمونه

M3، ز) نمونه M4، ح) تصویر بزرگنمایی شده انحنا نمونه M4، ز) نمونه M5 و ح) تصویر بزرگنمایی شده انحنا نمونه M5

Fig. 2. Geometric model of samples: a) Dog-bone, b) Sample M1, c) Sample M2, d) Enlarged image of the curvature of sample M2, e) Sample M3, f) Enlarged image of the curvature of sample M3, g) Sample M4, h) Enlarged image of the curvature of sample M4, i) Sample M5 and j) Enlarged image of the curvature of sample M5



## ۲-۳- تحلیل تجربی:

که  $D$  شاخص آسیب و  $\bar{\epsilon}_f$  کرنش پلاستیک معادل هست. در این مدل هنگامی که پارامتر  $D$  به یک برسد، شکست شروع می‌شود. برای شبیه‌سازی آزمون‌های انجام شده، از خواص جدول ۱ و نیز از نمودار شکل ۳ برای خواص پلاستیک استفاده شده است. برای مدل آسیب نرم آباکوس از کرنش‌های به‌دست آمده از آزمون‌های تجربی به‌کار گرفته شده است. از حلگر Dynamic explicit برای اجرای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. شکل ۴ مدل اجزای محدود و مش را برای هر نمونه نشان می‌دهد، که در آن المان مکعبی هشت گره‌ای<sup>۲</sup> (C3D8R) برای شبکه زدن نمونه‌ها استفاده شد. نحوه شبکه‌بندی به‌نوعی انجام‌شده که تعداد المان بیشتری در مرکز قرار گرفتند تا دقت شبیه‌سازی افزایش یابد. اندازه مش ۰/۵ میلی‌متر انتخاب شد که دقت کافی با نتایج تجربی به دست بیاید. تعداد المان ایجادشده برای نمونه دمبلی ۱۸۸۰۰، M1 ۶۴۲۴۰، M2 ۵۶۲۷۰، M3 ۶۳۲۴۰، M4 ۷۴۲۲۰ و M5 ۷۲۰۲۰ است. شرایط مرزی و نوع بارگذاری برای هر نمونه با شرایط آزمایشی سازگار است. بدین منظور، نمونه‌ها در قسمت پایینی ثابت شده‌اند و بار به صورت جابه‌جایی به قسمت بالایی نمونه‌ها وارد می‌شوند. در نمونه‌ها قسمتی که در فک دستگاه قرار دارد به‌صورت جسم صلب مدل شدند تا هزینه محاسباتی کاهش یابد.

## ۲-۴- تفسیر نتایج

در این بخش، نتایج آزمون‌های مکانیکی انجام‌شده برای نمونه‌های به تفکیک ارائه خواهد شد. نتایج برای نمونه‌های دمبلی، M1، M2 و M3 به دو طریق شامل داده‌های خروجی دستگاه (بار و جابه‌جایی) و داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نمایش داده شدند. برای نمونه‌های M4 و M5 نیز نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی گزارش شده‌اند.

مطالعه تجربی بر روی رفتار شکست نرم آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ انجام‌شده است که جدول ۱ خواص مادی استفاده‌شده در شبیه‌سازی‌ها آن را ارائه می‌دهد. نمونه‌ها در دمای اتاق و شرایط بارگذاری شبه استاتیک آزمایش شدند. آزمون کشش بر روی نمونه‌های دمبلی و M1 و M2 و آزمون فشار بر روی نمونه‌های M1، M2 و M3 انجام شد. آزمون‌های کششی یکنواخت دستگاه کشش یونیورسال اینسترون ۸۵۰۲ با ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن و با سرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد.

در آزمایش‌های فشاری انجام‌شده بر روی نمونه‌های M1 تا M3 بر اساس پایش مستقیم نمونه‌ها در حین آزمایش و همچنین تحلیل نتایج جابه‌جایی-نیرو، اطمینان حاصل گردید که کمانش در هیچ‌یک از نمونه‌ها رخ نداده است. شکل شکست نمونه‌ها نیز با مکانیزم‌های فشاری مورد انتظار تطابق داشت و هیچ نشانه‌ای از ناپایداری یا تغییر شکل جانبی مشاهده نگردید.

جدول ۱. پارامترهای ماده برای آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ به‌کاررفته در شبیه‌سازی

| Density (kg/m <sup>3</sup> ) | E(GPa) | $\nu$ |
|------------------------------|--------|-------|
| 2700                         | 68.9   | 0.33  |

## ۲-۴- تحلیل عددی:

شبیه‌سازی‌های عددی برای همه نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. بار خارجی به‌صورت جابه‌جایی در راستای  $y$  اعمال می‌شود و در سایر جهات، جابه‌جایی مقید شده است. منحنی تنش-کرنش پلاستیک واقعی ماده مورد استفاده برای شبیه‌سازی از آزمایش کشش بر روی نمونه دمبلی به دست آمد (شکل ۳). پارامترهای سه محوره‌ی تنش  $\eta$ ، پارامتر زاویه لود  $\theta$  و کرنش شکست  $\bar{\epsilon}_f$  برای همه نمونه‌ها به دست آمدند. به‌منظور اضافه کردن آسیب در شبیه‌سازی، از مدل آسیب نرم در نرم افزار آباکوس استفاده‌شده است که رابطه آن به‌صورت زیر است [۲۸]:

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}_p} \frac{d\bar{\epsilon}_p}{\bar{\epsilon}_f(\eta, \theta)} \quad (7)$$

<sup>۲</sup> Eight-node brick element (C3D8R)

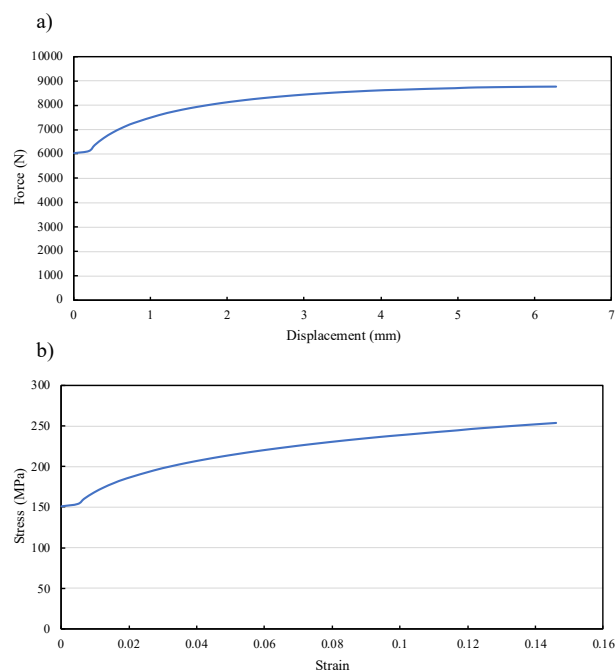
<sup>۱</sup> Instron 8502



### ۳-۱- تنش سه محوره منفی

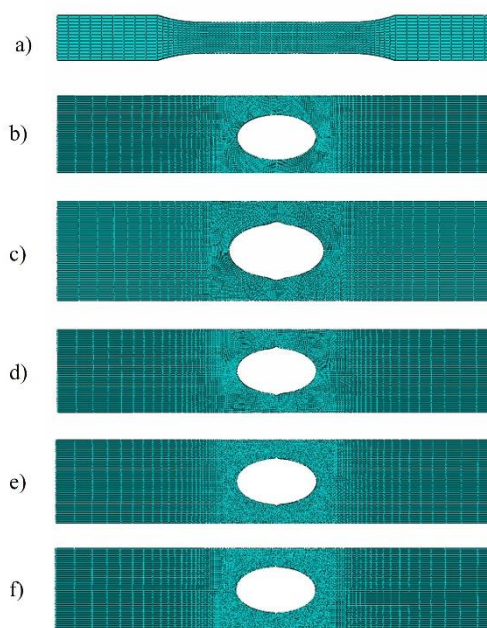
با توجه به اینکه تنش در نمونه دمبلی تحت آزمون کشش به صورت تک محوری باقی می ماند، طبق رابطه (۴)، مقدار تنش سه محوره برابر با  $0/33$  است. به منظور بررسی بازه وسیع تری از مقادیر سه محوره تنش، از آزمون های چند محوری استفاده می شود که نیازمند طراحی و تهیه تجهیزات خاص و همچنین در نظر گرفتن ملاحظات پیچیده حین انجام آزمون است. از دیگر پیچیدگی های آزمون های چند محوره می توان به آماده سازی نمونه، دقت در رعایت هم راستایی نمونه و فک ها و همچنین تفسیر نتایج و درک درست رفتار ماده اشاره کرد. وجود انحنای در هندسه نمونه باعث تغییر حالت تنش از تک محوری به چند محوری می شود. به همین دلیل، نمی توان از رابطه (۴) برای هندسه های منحنی استفاده کرد و از روش اجزای محدود<sup>۱</sup> برای محاسبه تنش سه محوره در هندسه های مختلف بهره گرفته شد.

البته باید به این نکته اشاره کرد که وجود انحنای در نمونه ها و محدودیت استفاده از روابط تئوری نه تنها به عنوان یک نقطه ضعف به شمار نمی آید، بلکه قابلیت جایگزین کردن آزمون دومحوره با آزمون تک محوره را در پی دارد. با توجه به توضیحات فوق، در این پژوهش، با بهره گیری از هندسه های مختلف و وجود انحنای بازه گسترده ای از سه محوره تنش با استفاده از آزمون های تک محوره کشش و فشار مورد بررسی قرار گرفتند. این هندسه ها به نوعی تعریف شده اند که هم امکان آزمون کشش و هم آزمون فشار بر روی آنها امکان پذیر است. در روش عددی، ابتدا خواص الاستیک و پلاستیک نمونه ها طبق بخش شبیه سازی عددی اعمال و بارگذاری انجام شد. سپس، تنش سه محوره با استفاده از خروجی میدان نرم افزار اندازه گیری شد. تغییرات تنش سه محوره در جابه جایی های مختلف محاسبه و در نقطه ای که این مقدار به عدد ثابتی رسید، به عنوان تنش سه محوره نمونه ها انتخاب شد. مقادیر تنش سه محوره در نواحی میانی نمونه و همچنین در بخش هایی از هندسه که دارای ناچ یا انحنای بوده اند استخراج گردید. به منظور اطمینان از صحت مقادیر گزارش شده، روند تغییرات تنش سه محوره در طول تحلیل بررسی شد و تنها مقادیری ارائه گردید که پس از نوسانات اولیه به مقدار پایدار رسیده بودند. بدین ترتیب، داده های گزارش شده بیانگر



شکل ۳. الف) نمودار نیرو جابه جایی ب) نمودار تنش کرنش استفاده شده در شبیه سازی

Fig. 3. a) Displacement force diagram b) Stress-strain diagram used in the simulation



شکل ۴. مدل المان محدود نمونه الف) دمبلی، ب) M1، ج) M2، د) M3، ه) M4 و و) M5

Fig. 4. Finite element model of sample a) Dog-bone, b) M1, c) M2, d) M3, e) M4 and f) M5

<sup>۱</sup> Finite Element Method (FEM)

شرایط واقعی تنش در نواحی بحرانی نمونه هستند. نتایج به دست آمده برای نمونه‌های مختلف در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲. مقادیر تنش سه محوره به دست آمده برای نمونه‌های مختلف

Table 2. Stress triaxiality values obtained for different samples

| sample       | stress triaxiality values |
|--------------|---------------------------|
| Dog-bone     | 0.33                      |
| M1(tensile)  | 0.353                     |
| M1(pressure) | -0.355                    |
| M2(tensile)  | 0.370                     |
| M2(pressure) | -0.381                    |
| M3(pressure) | -0.448                    |
| M4(pressure) | -0.497                    |
| M5(pressure) | -0.555                    |

### ۳-۲- نمونه دمبلی

تصویر نمونه تحت آزمایش پس از انجام آزمون کشش و نحوه شکست آن در شکل ۵-الف نمایش داده شده است. همچنین مقادیر ضریب افت سفتی<sup>۱</sup> که عبارت است از مقدار کاهنده ماتریس سفتی ماده پس از شروع آسیب و همچنین پارامتر شروع آسیب<sup>۲</sup> در شکل ۵-ب و شکل ۵-ج نشان داده شده است.

مطابق این کانتورها، با گذر مقادیر پارامتر شروع آسیب از مقدار ۱، المان‌های مربوطه دچار آسیب شده و ماده دچار افت خواص شده که تأثیر از طریق پارامتر ضریب افت سفتی بر ماتریس سفتی نمایان می‌شود. از دیگر نکات قابل ذکر، یکسان بودن نحوه شکست نمونه دمبلی در دو روش تجربی و عددی هست. کانتور کرنش در راستای y در شکل ۵-د، نمایش داده شده است. در شکل ۶-الف و شکل ۶-ب به ترتیب، نمودارهای بار-جابجایی و تنش-کرنش نمونه دمبلی به دو روش تجربی و عددی آورده شده است. در هر دو نمودار، نتایج به دست آمده از هر دو روش با یکدیگر تطابق دارند. با توجه به شکل نمودارها، رفتار شکست ماده به صورت شکست نرم است.

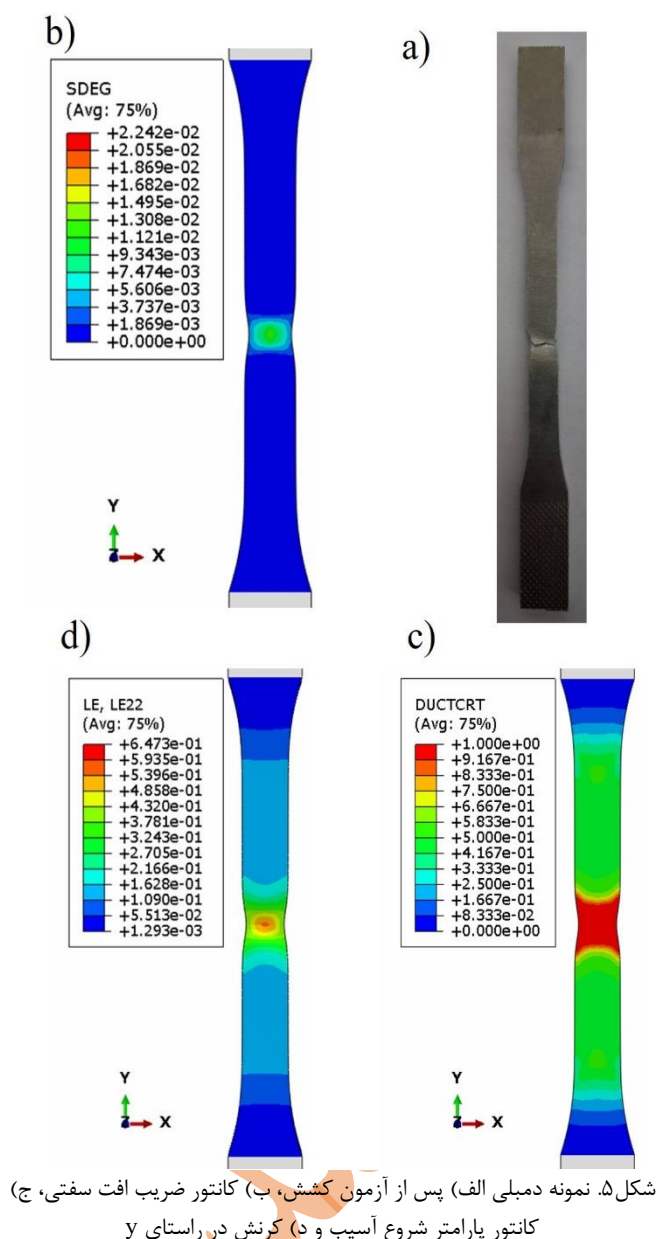
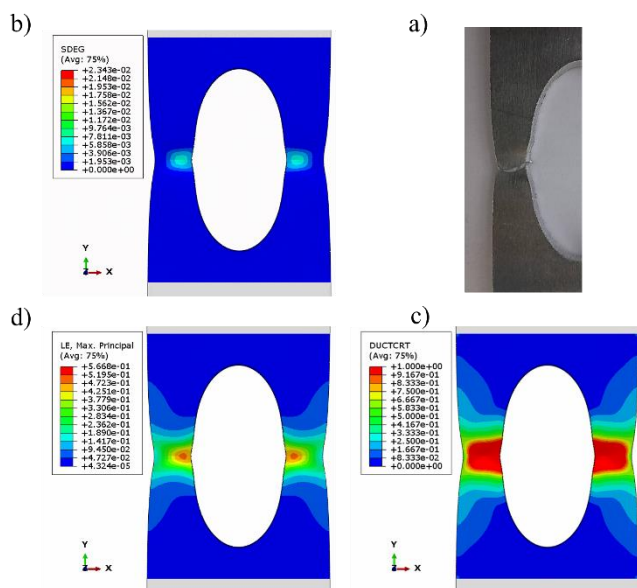


Fig. 5. Dog-bone specimen a) after tensile test, b) stiffness degradation parameter contour, c) damage onset parameter contour and d) strain in the y direction

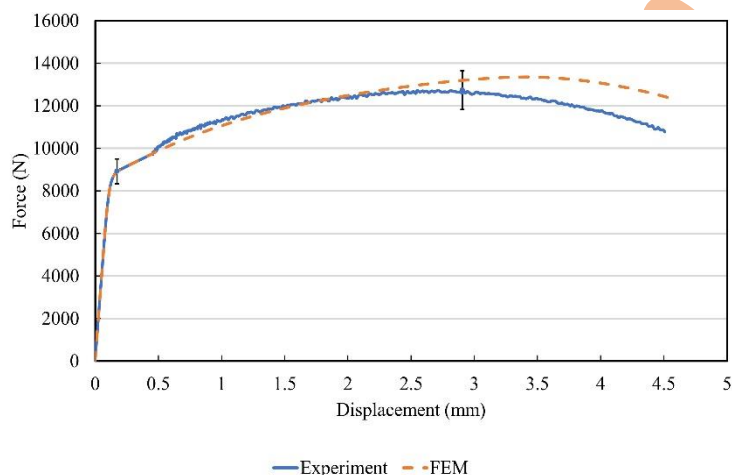
<sup>۱</sup> Stiffness Degradation Parameter (SDEG)

<sup>۲</sup> Ductile Damage Initiation Criterion (DUCTCRT)



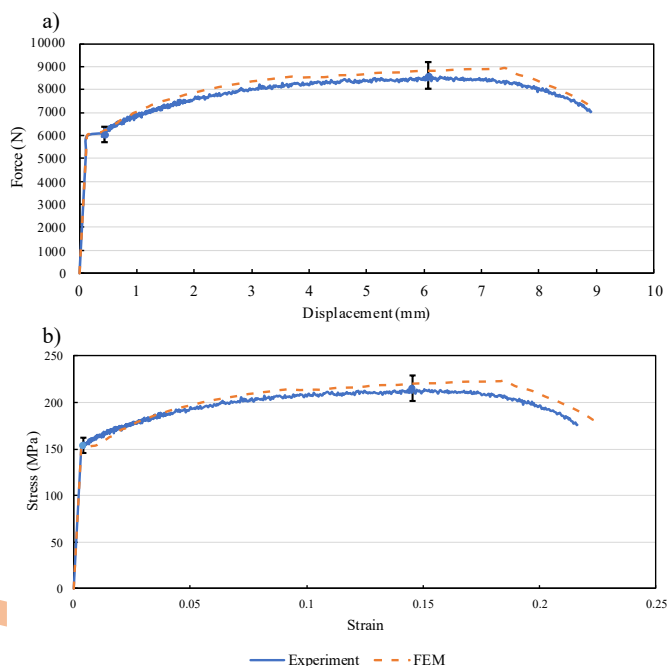
شکل ۷. نمونه M1 الف) پس از آزمون کشش، ب) کانتور ضریب افت سفتی، ج) کانتور پارامتر شروع آسیب و د) کرنش در راستای y

Fig. 7. Specimen M1 a) after tensile test, b) Stiffness degradation parameter contour, c) damage onset parameter contour and d) strain in the y direction



شکل ۸. نمودار بار-جابجایی نمونه M1 در آزمون کشش به دو روش تجربی و عددی

Fig. 8. Force-displacement diagram of sample M1 in tensile test using two experimental and numerical methods



شکل ۶. مقایسه نتایج به دست آمده به روش تجربی و FEM برای نمونه دمبلی الف) نمودار بار-جابجایی و ب) نمودار تنش-کرنش

Fig. 6. Comparison of results obtained by experimental and FEM methods for the dog-bone sample a) force-displacement diagram and b) stress-strain diagram

### ۳-۳-۳ نمونه M1

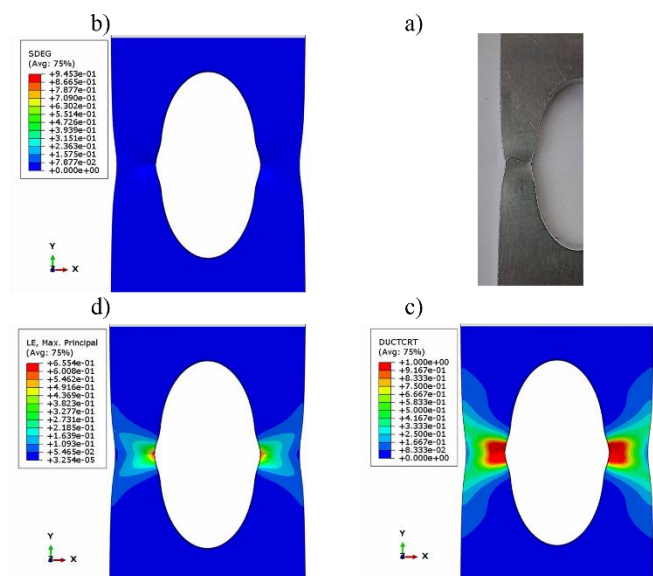
#### ۳-۱-۳ کشش

در شکل ۷-الف تا ۷-د، به ترتیب نحوه شکست نمونه M1 تحت بار کششی، کانتور ضریب افت سفتی، پارامتر شروع آسیب و کانتور کرنش در راستای y نمایش داده شده‌اند. علاوه بر این در شکل ۸ نمودار بار-جابجایی نمونه M1 تحت آزمون کشش به دو روش تجربی و عددی ارائه شده است که طبق آن، تطابق بین دو روش به خوبی مشاهده می‌شود.

#### ۳-۲-۳ فشار

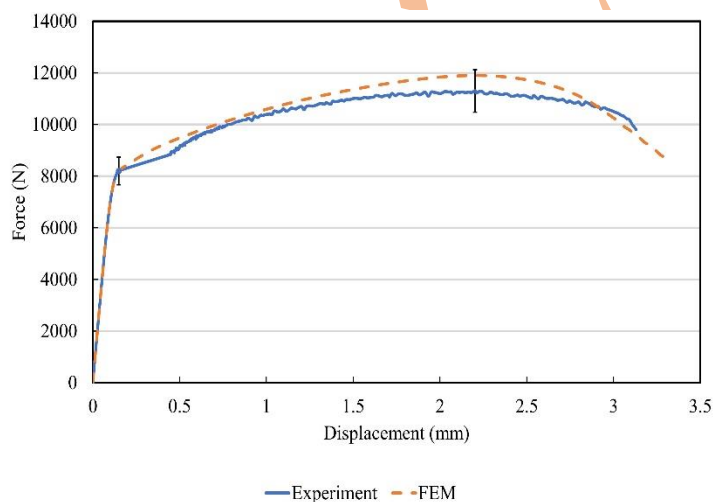
فرم شکست نمونه M1 تحت بار فشاری در شکل ۹-الف و مقادیر ضریب افت سفتی و پارامتر شروع آسیب در شکل ۹-ب و ج نشان داده شده‌اند. همچنین، کانتور کرنش در راستای y برای نمونه M1 تحت بار فشاری در شکل ۹-د قابل مشاهده است. در شکل ۱۰ نیز نمودار بار-جابجایی نمونه M1 حاصل از آزمون فشار و تطابق قابل قبول نتایج دو روش تجربی و عددی نمایش داده شده است.

کرنش در راستای  $y$  نمایش داده شده‌اند. علاوه بر این در شکل ۱۲ نمودار بار-جابجایی نمونه M2 تحت آزمون کشش به دو روش تجربی و عددی ارائه شده است که طبق آن، تطابق بین دو روش به خوبی مشاهده می‌شود.



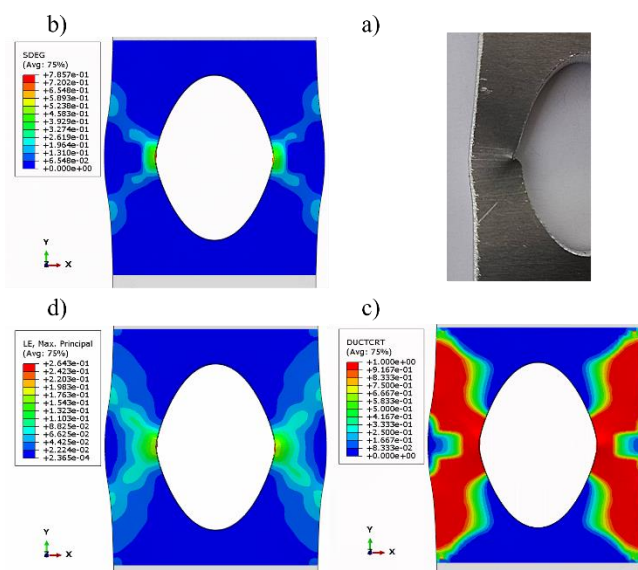
شکل ۱۱. نمونه M2 الف) پس از آزمون کشش، ب) کانتور ضریب افت سفتی، ج) کانتور پارامتر شروع آسیب و د) کرنش در راستای  $y$

Fig. 11. Specimen M2 a) after tensile test, b) stiffness degradation parameter contour, c) damage onset parameter contour, and d) strain in the  $y$  direction.



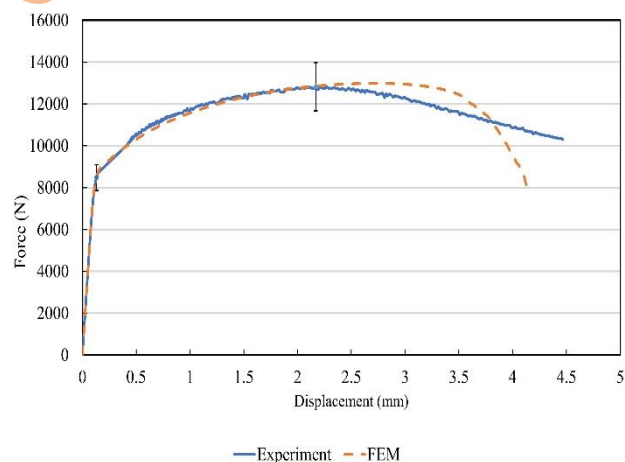
شکل ۱۲. نمودار بار-جابجایی نمونه M2 در آزمون کشش به دو روش تجربی و عددی

Fig. 12. Force-displacement diagram of sample M2 in tensile test using two experimental and numerical methods



شکل ۹. نمونه M1 الف) پس از آزمون فشار، ب) کانتور ضریب افت سفتی، ج) کانتور پارامتر شروع آسیب و د) کرنش در راستای  $y$

Fig. 9. Specimen M1 a) after compression test, b) stiffness degradation parameter contour, c) damage onset parameter contour, and d) strain in the  $y$  direction



شکل ۱۰. نمودار بار-جابجایی نمونه M1 در آزمون فشار به دو روش تجربی و عددی

Fig. 10. Force-displacement diagram of sample M1 in compression test by two experimental and numerical methods

### ۳-۴- نمونه M2

#### ۳-۴-۱- کشش

در شکل ۱۱-الف تا ۱۱-د، به ترتیب نحوه شکست نمونه M2 تحت بار کششی، کانتور ضریب افت سفتی، پارامتر شروع آسیب و کانتور

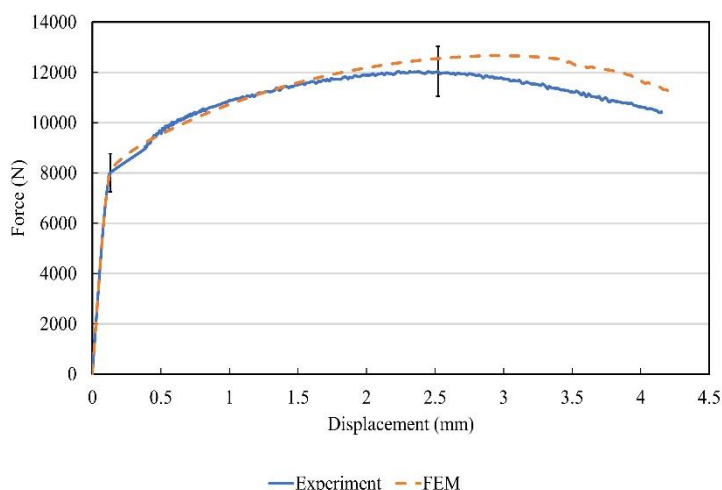


### ۳-۴-۱- فشار

فرم شکست نمونه M2 تحت بار فشاری در شکل ۱۳-الف و مقادیر ضریب افت سفتی و پارامتر شروع آسیب در شکل ۱۳-ب و ج نشان داده شده‌اند. همچنین، کانتور کرنش در راستای y برای نمونه M2 تحت بار فشاری در شکل ۱۳-د قابل مشاهده است. در شکل ۱۴ نیز نمودار بار-جابجایی نمونه M2 حاصل از آزمون فشار و تطابق قابل قبول نتایج دو روش تجربی و عددی نمایش داده شده است.

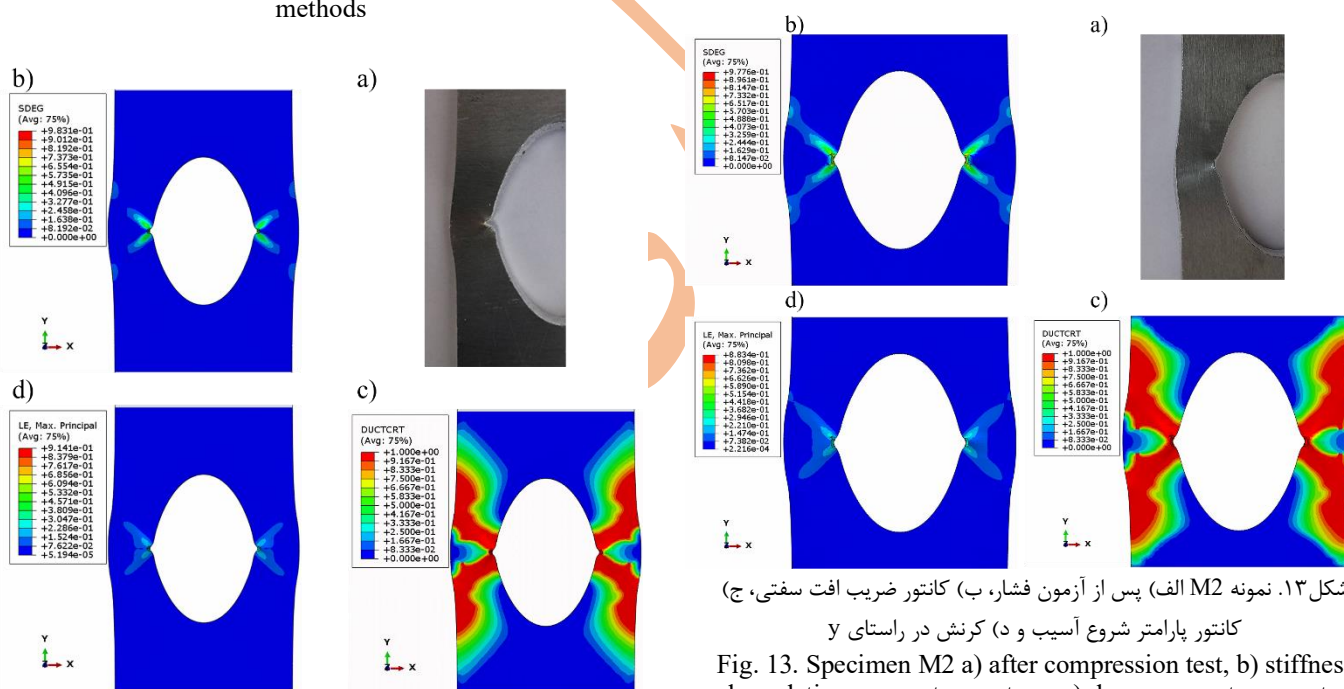
### ۳-۵- نمونه M3

فرم شکست نمونه M3 تحت بار فشاری در شکل ۱۵-الف و مقادیر ضریب افت سفتی و پارامتر شروع آسیب در شکل ۱۵-ب و ج نشان داده شده‌اند. همچنین، کانتور کرنش در راستای y برای نمونه M3 تحت بار فشاری در شکل ۱۵-د قابل مشاهده است. در شکل ۱۴ نیز نمودار بار-جابجایی نمونه M3 حاصل از آزمون فشار و تطابق قابل قبول نتایج دو روش تجربی و عددی نمایش داده شده است.



شکل ۱۴. نمودار بار-جابجایی نمونه M2 در آزمون فشار به دو روش تجربی و عددی

Fig. 14. Force-displacement diagram of sample M2 in compression test by two experimental and numerical methods

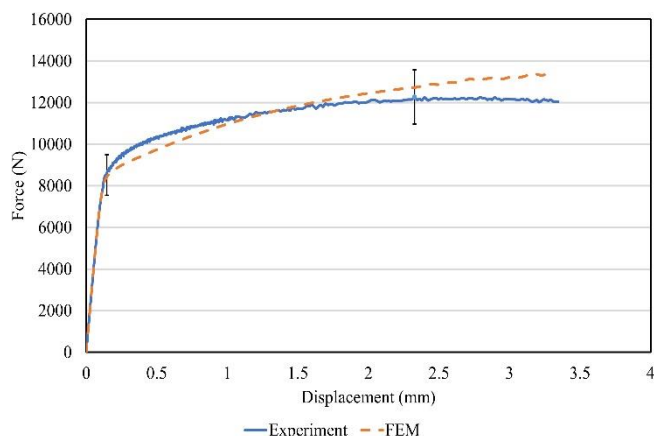


شکل ۱۳. نمونه M2 (الف) پس از آزمون فشار، (ب) کانتور ضریب افت سفتی، (ج) کانتور پارامتر شروع آسیب و (د) کرنش در راستای y

Fig. 13. Specimen M2 a) after compression test, b) stiffness degradation parameter contour, c) damage onset parameter contour, and d) strain in the y direction

شکل ۱۵. نمونه M3 (الف) پس از آزمون فشار، (ب) کانتور ضریب افت سفتی، (ج) کانتور پارامتر شروع آسیب و (د) کرنش در راستای y

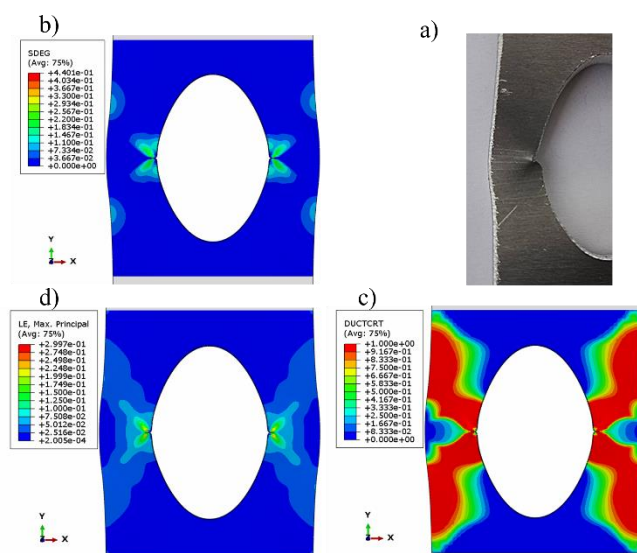
Fig. 15. Specimen M3 a) after compression test, b) stiffness degradation parameter contour, c) damage onset parameter contour, and d) strain in the y direction



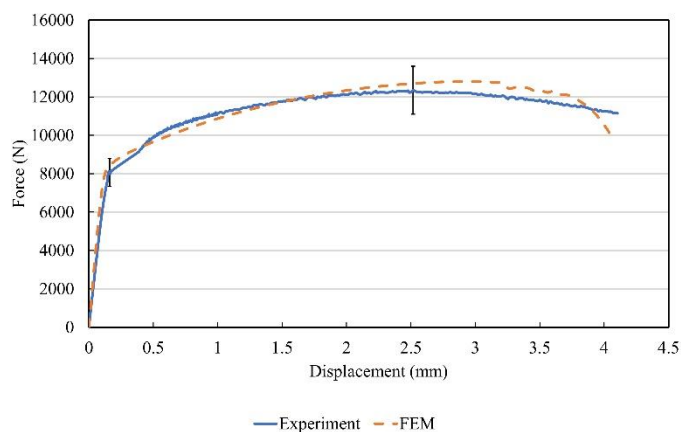
شکل ۱۸. نمودار بار-جابجایی نمونه M4 در آزمون فشار به روش تجربی و عددی  
Fig. 18. Force-displacement diagram of sample M4 in compression test by experimental and numerical methods

### ۳-۸- نمونه M5

فرم شکست نمونه M5 تحت بار فشاری در شکل ۱۹-الف آورده شده است. در شکل ۱۹-ب و ج، مقادیر ضریب افت سفتی و پارامتر شروع آسیب نشان داده شده‌اند. علاوه بر این، کانتور کرنش در راستای Y برای نمونه M4 تحت بار فشاری در شکل ۱۹-د و نمودار بار-جابجایی حاصل از روش تجربی و عددی در شکل ۲۰ نمایش داده شده‌اند.



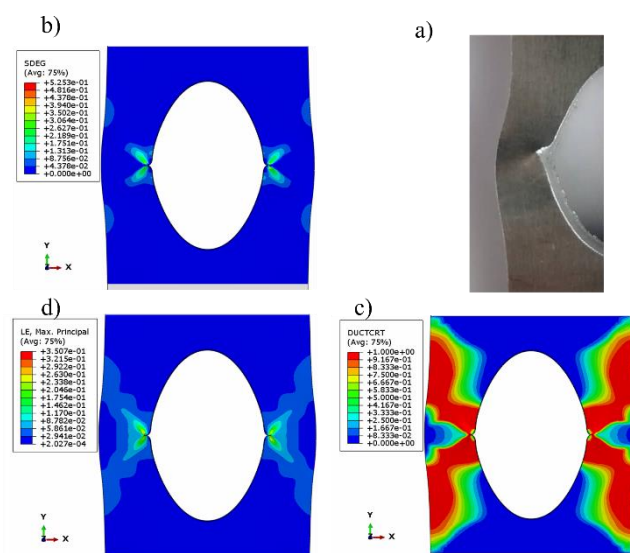
شکل ۱۹. نمونه M5 (الف) پس از آزمون فشار، (ب) کانتور ضریب افت سفتی، (ج) کانتور پارامتر شروع آسیب و (د) کرنش در راستای Y



شکل ۱۶. نمودار بار-جابجایی نمونه M3 در آزمون فشار به روش تجربی و عددی  
Fig. 16. Force-displacement diagram of sample M3 in compression test using two experimental and numerical methods

### ۳-۷- نمونه M4

فرم شکست نمونه M4 تحت بار فشاری در شکل ۱۷-الف آورده شده است. در شکل ۱۷-ب و ج، مقادیر ضریب افت سفتی و پارامتر شروع آسیب نشان داده شده‌اند. علاوه بر این، کانتور کرنش در راستای Y برای نمونه M4 تحت بار فشاری در شکل ۱۷-د و نمودار بار-جابجایی حاصل از روش تجربی و عددی در شکل ۱۸ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۷. نمونه M4 (الف) پس از آزمون فشار، (ب) کانتور ضریب افت سفتی، (ج) کانتور پارامتر شروع آسیب و (د) کرنش در راستای Y

Fig. 17. Specimen M4 a) after compression test, b) stiffness degradation parameter contour, c) damage onset parameter contour, and d) strain in the y direction.



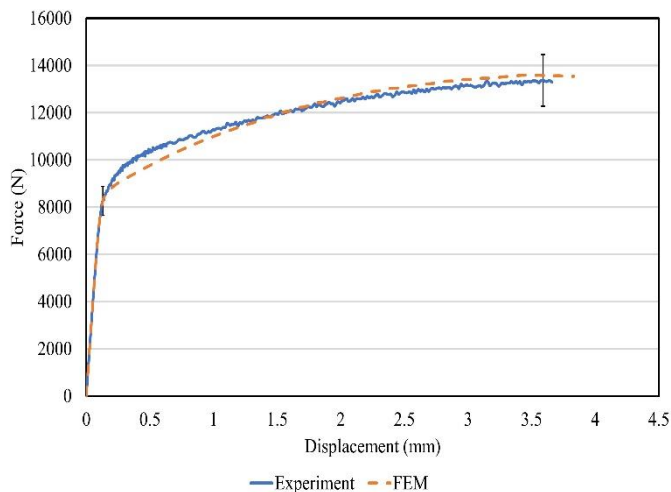
و پارامتر شروع آسیب نمونه‌ها نیز قابل مشاهده است. با مقایسه مقادیر جابجایی لحظه شکست نمونه‌های M1 و M2 در هر دو آزمون کشش و فشار می‌توان نتیجه گرفت که وجود انحنای سبب ایجاد تمرکز تنش در نمونه M2 و نهایتاً کاهش جابجایی لحظه شکست این نمونه نسبت به نمونه M1 می‌شود. این روند با نوک تیز شدن ناحیه انحنای در نمونه‌های M3، M4 و M5 نسبت به نمونه M1 نیز قابل مشاهده است.

سابقه شکست نمونه‌ها با سه محوره تنش‌های مختلف در شکل ۲۱-الف و سابقه شکست نمونه‌ها برای زاویه لودهای مختلف در شکل ۲۱-ب رسم شده‌اند. در نمونه دمبلی، با توجه به ساده بودن شکل هندسی نمونه، سه محوره تنش دچار تغییر خاصی نمی‌شوند. درحالی‌که سایر نمونه‌ها، پس از چند نوسان اولیه در کرنش‌های ابتدایی، به مقدار پایدار رسیده‌اند.

با افزایش مقدار سه محوره تنش مثبت، روند تغییرات کرنش شکست به صورت نزولی خواهد بود، به طوری که مقدار کرنش شکست به روش عددی در سه محوره تنش ۰/۳۳۳، برابر با ۰/۲۲ و در سه محوره تنش ۰/۳۷۰ برابر با ۰/۱۶ درحالی‌که این مقادیر به روش تجربی به ترتیب برابر با ۰/۲۲ و ۰/۱۵ هستند. روند تغییرات کرنش شکست در سه محوره تنش منفی متفاوت بوده، و به این صورت است که در نمونه‌های M1 تا M4 با کاهش مقدار سه محوره تنش از ۰/۳۵۵- تا ۰/۴۹۷-، کرنش شکست عددی از ۰/۲۳ تا ۰/۱۶ کاهش یافته و سپس در نمونه M5، مقدار کرنش شکست عددی با افزایش اندکی (۰/۱۸) روبه‌رو می‌شود. لازم به ذکر است که مقادیر کرنش شکست حاصل از روش تجربی برای نمونه‌های M1، M2 و M3، به ترتیب برابر با ۰/۲۲، ۰/۲۰ و ۰/۱۹ است که مؤید روند نزولی اشاره شده است. در مقادیر مثبت زاویه لود نرمالیزه شده، کرنش شکست با افزایش مقدار زاویه لود نرمالیزه شده، روند صعودی دارد. در مقابل و به ازای مقادیر منفی زاویه لود نرمالیزه شده، مقدار کرنش شکست با کاهش زاویه لود نرمالیزه شده افزایش می‌یابد.

در شکل‌های مرتبط با آزمون فشار با نمونه‌ها، مشاهده می‌شود که تغییر شکل و شکست عمدتاً در ناحیه میانی و اطراف انحنای بیضوی متمرکز شده است. بیشترین مقدار آسیب در نواحی اطراف حفره متمرکز شده است. این توزیع آسیب کاملاً با ماهیت تنش سه‌محوره منفی و شرایط بارگذاری فشاری سازگار است. علاوه بر این، در نواحی بالا و پایین حفره که تنش از حالت فشاری به حالت ترکیبی فشاری-برشی تغییر می‌کند، پارامتر آسیب افزایش می‌یابد. با مشاهده نمونه‌ها بعد از آزمون فشار می‌توان نتیجه گرفت که آسیب بیشتر در نواحی نزدیک انحنای رخ داده است. این تطابق میان نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهد که توزیع آسیب در این نمونه صحیح

Fig. 19. Specimen M5 a) after compression test, b) stiffness degradation parameter contour, c) damage onset parameter contour, and d) strain in the y direction.



شکل ۲۰. نمودار بار-جابجایی نمونه M5 در آزمون فشار به روش تجربی و عددی  
Fig. 20. Force-displacement diagram of sample M5 in compression test by experimental and numerical methods

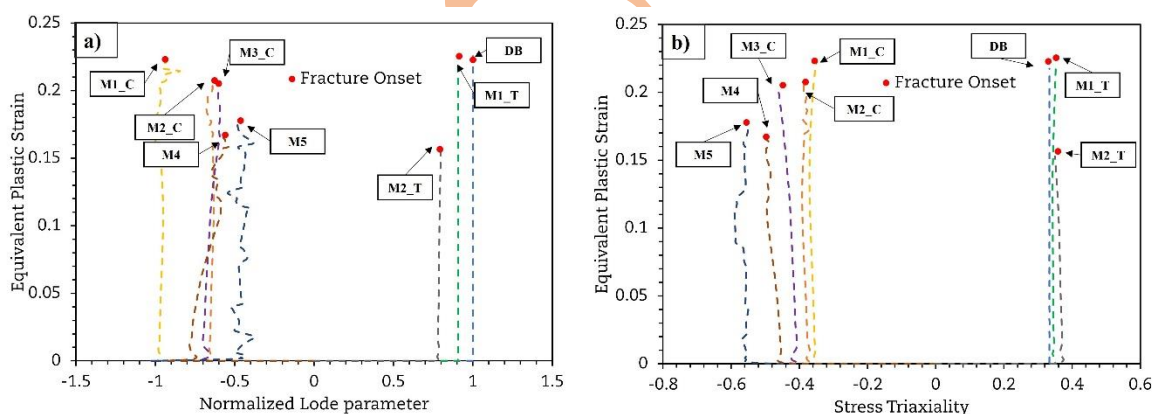
### ۹-۳- بحث

با مشاهده نمودارهای بار-جابجایی، می‌توان نتیجه گرفت که فرم کلی تمامی این نمودارها از نظر کیفی مشابه یکدیگر بوده و شامل یک رفتار الاستیک اولیه و به دنبال آن ناحیه تسلیم، ناحیه پلاستیک، گلوئی شدن و در انتها شکست نهایی می‌شوند. مطابق نتایج، تمام حالت‌های شکست نمونه‌ها، شکست نرم بودند. همچنین تطابق قابل‌قبولی میان نتایج حاصل از دو رویکرد تجربی و عددی مشاهده می‌گردد. تفاوت ناچیز میان نتایج تجربی و عددی ناشی از موارد مختلفی شامل تفاوت نادیده گرفتن برخی جزئیات نمونه در مدل المان محدود است که کارایی محاسباتی و دشواری همگرایی را افزایش می‌دهد. همچنین اجتناب‌ناپذیر بودن برخی از عیوب فنی، مانند عدم رعایت ابعاد هندسی و آسیب‌های در هنگام ساخت، می‌توانند در اختلاف میان نتایج تأثیرگذار باشند.

در تصاویر بخش ۳، برای نمونه‌های دمبلی، M1، M2 و M3 نحوه تغییر شکل و شکست به دو روش تجربی و عددی به نمایش درآمده‌اند. در هر دو روش تجربی و عددی، شکل شکست یکسان است. در آزمون‌های کشش، کاهش سطح مقطع نشان‌دهنده شکست نرم و بخش غالب تغییر شکل مربوط به نواحی مرکزی است. مشابه آزمون کشش، در آزمون فشار نیز بیشترین میزان تغییر شکل در قسمت مرکزی و به‌ویژه در ناحیه دارای انحنای افتاده است. این موضوع از مقادیر موجود در کانتورهای ضریب افت سفتی

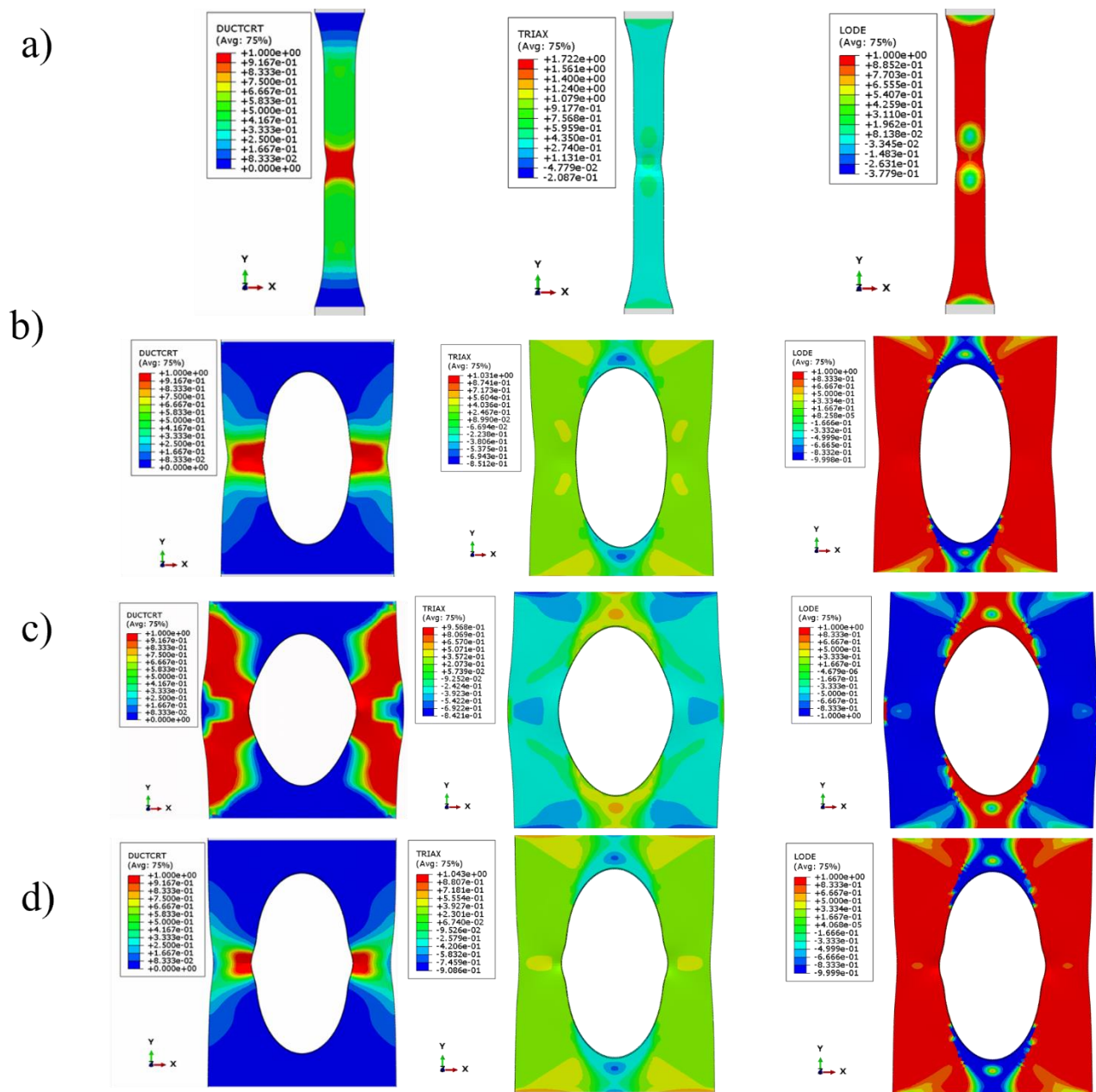
درک اثر تنش سه‌محوره بر کرنش شکست از دیدگاه مهندسی و صنعتی اهمیت بالایی دارد. در بسیاری از سازه‌های فلزی، به‌ویژه در صنایع خودروسازی و هوافضا، قطعات تحت ترکیبی از تنش‌های کششی، فشاری و برشی قرار دارند که میزان تنش سه‌محوره در این نواحی رفتار شکست را تعیین می‌کند. به عنوان مثال، در اجزای جذب‌کننده انرژی مانند قاب خودروها، سپرها و سازه‌های جذب ضربه، کنترل میزان تنش سه‌محوره در نواحی بحرانی می‌تواند به تأخیر در آغاز شکست و افزایش توان جذب انرژی منجر شود. در مقابل، در قطعات تحت فشار بالا مانند لوله‌ها، اتصالات و مخازن، افزایش بیش از حد فشار هیدرواستاتیکی می‌تواند کرنش شکست را کاهش داده و منجر به گسیختگی زود هنگام شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کنترل و تنظیم توزیع تنش سه‌محوره می‌تواند به افزایش چقرمگی، تأخیر در آغاز شکست و بهبود توان جذب انرژی سازه منجر شود. از این‌رو، یافته‌های حاضر می‌توانند در طراحی بهینه‌ی هندسه و مسیر بارگذاری قطعات فلزی مورد استفاده قرار گیرند تا احتمال وقوع شکست نرم کاهش یافته و دوام و ایمنی سازه افزایش یابد.

بوده و نقش هندسه ناچ به‌عنوان متمرکزکننده تنش در فرآیند آغاز و تکامل آسیب به‌درستی در مدل اجزای محدود بازتولید شده است. کانتورهای زاویه لود، تنش سه‌محوره و آسیب برای تمامی نمونه‌ها در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ رسم شده‌اند. بررسی این کانتورها نشان می‌دهد تنش سه‌محوره مثبت و منفی اثر متفاوتی بر روی نوع آسیب ایجاد شده دارند. در تنش سه‌محوره مثبت، آسیب در نواحی مرکزی و ناحیه نزدیک انحنا به وجود می‌آید. درحالی‌که در تنش سه‌محوره منفی قسمت‌های بالایی و پایینی انحنا نیز آسیب می‌بینند. نکته حائز اهمیت دیگر این است که نوع توزیع تنش سه‌محوره با افزایش شعاع انحنا تغییر می‌یابد. تغییر توزیع در این نواحی ممکن است منجر به افزایش سهم تنش هیدرواستاتیکی، تمرکز تنش و رشد حفرات ریز تسریع شده و منجر به تجمع کرنش پلاستیک و در نهایت آغاز شکست نرم می‌شود. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که رقابت بین اثر تنش سه‌محوره و زاویه لود نقش تعیین‌کننده‌ای در مکان و شدت ناحیه آسیب دارد؛ به‌گونه‌ای که در نواحی با تنش سه‌محوره مثبت و زاویه لود نزدیک به یک، شکست زودتر آغاز شده و ماهیت کششی دارد، در حالی‌که در نواحی با تنش سه‌محوره منفی و زاویه لود منفی، آسیب در نواحی بزرگتری از انحنا رخ می‌دهد.

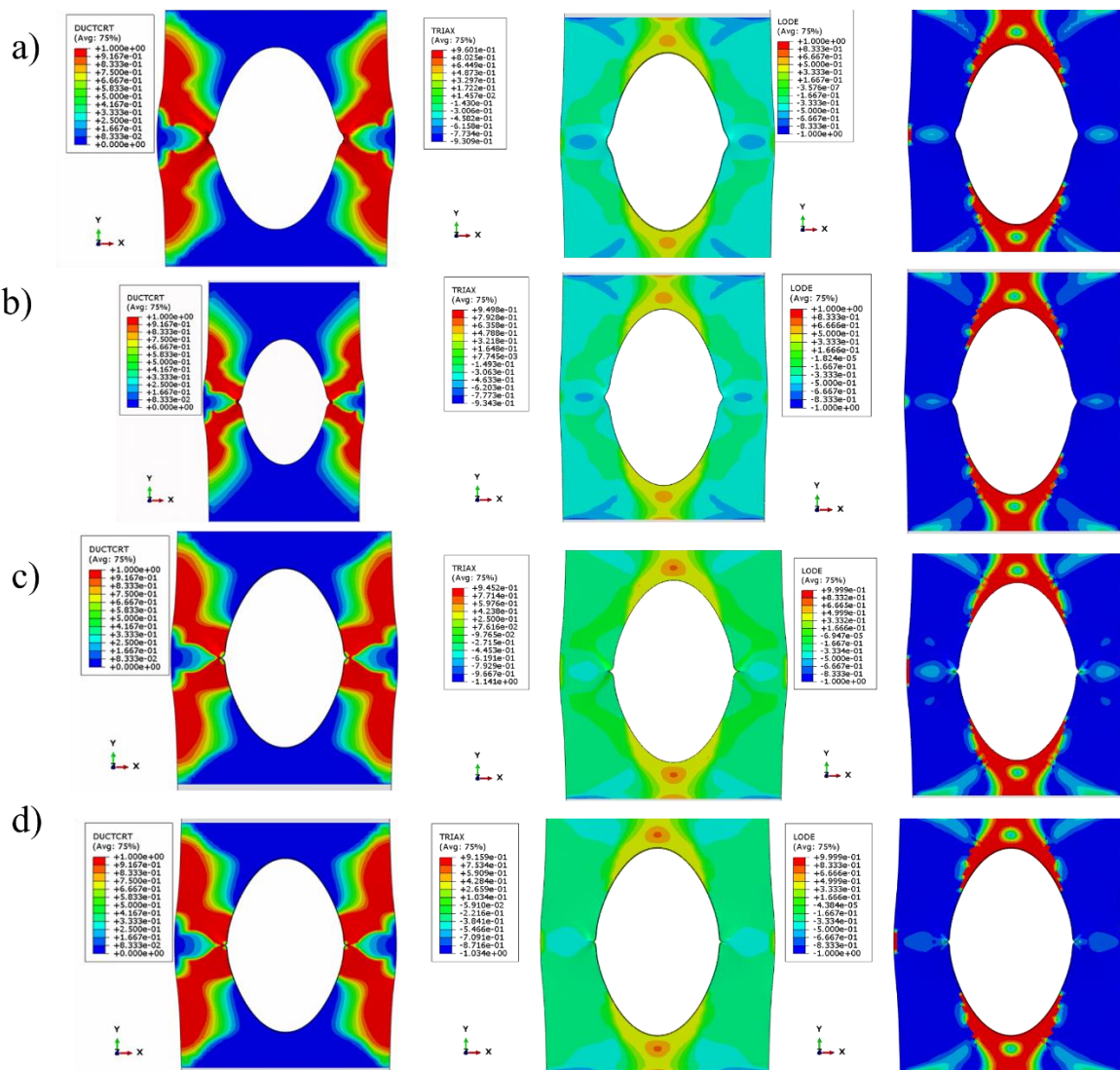


شکل ۲۱. نمودار کرنش در لحظه شکست برحسب الف) زاویه لود نرمالیزه‌شده، ب) سه‌محوره تنش منفی

Fig. 21. Strain diagram at the moment of failure in terms of a) normalized node angle, b) negative stress triaxiality



شکل ۲۲. کانتورهای زاویه لود، تنش سه‌محوره و آسیب برای نمونه‌های الف (دمبلی، ب) کششی، ج) فشاری و د) کشش M2  
 Fig. 22. Lode angle, stress triaxiality and damage contours for a) Dog-bone, b) M1 tensile, c) M1 compression and d) M2 tensile



شکل 3۲. کانتورهای زاویه لود، تنش سه محوره و آسیب برای نمونه های الف) M2 فشار، ب) M3، ج) M4 و د) M5  
 Fig. 23. Lode angle, stress triaxiality and damage contours for a) M12 compression, b) M3, b) M4 and d) M5

#### ۴ - نتیجه گیری

محوره تنش به دست بیایند. مقادیر سه محوره تنش منفی نمونه های طراحی شده در بازه  $0/۳۵۵$  تا  $-۰/۵۵۵$  به دست آمدند. نمونه ها از جنس آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ ساخته شدند. آزمون های کشش و فشار بر روی نمونه ها انجام و نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی مقایسه شده است. مقایسه منحنی های نیرو-جابجایی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده نشان می دهد که نتایج در پیش بینی مقادیر کرنش شکست و حداکثر نیرو مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. بیشترین مقدار کرنش شکست برای نمونه های دمبلی و M1 فشاری به دست آمده که برابر با  $۰/۲۳$  (به ازای سه محوره

در این مقاله، با استفاده از روش های تجربی و عددی برای مطالعه پارامترهای سه محوره تنش و زاویه لود بر روی شکست نرم بررسی شد. طراحی هندسه های مورد مطالعه به نحوی انجام شد که امکان بررسی سه محوره تنش منفی با به کارگیری آزمون تک محوره در دو حالت کشش و فشار به جای آزمون دوم محوره مرسوم فراهم گردید. شش نوع هندسه مختلف شامل نمونه دمبلی و پنج نمونه مستطیلی به همراه حفره بیضوی انتخاب شدند. همچنین بر روی حفره بیضوی انحنای شعاع های مختلف ایجاد شد تا مقادیر مختلف سه



*Science and Engineering: A*, 835, pp. 142689.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142689>

- 3 Kubik, P., Šebek, F., Hůlka, J. & Petruška, J., 2016. Calibration of ductile fracture criteria at negative stress triaxiality. *International Journal of Mechanical Sciences*, 108, pp. 90-103.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.02.001>

- 4 Wang, C., Liu, X.-g., Gui, J.-t., Xu, Z.-f. & Guo, B.-f., 2019. Influence of inclusions on matrix deformation and fracture behavior based on guron-tvergaard-needleman damage model. *Materials Science and Engineering: A*, 756, pp. 405-416.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.056>

- 5 Lou, Y. & Yoon, J. W., 2017. Anisotropic ductile fracture criterion based on linear transformation. *International Journal of Plasticity*, 93, pp. 3-25.

<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2017.04.008>

- 6 Li, W., Jing, Y., Zhou, T. & Xing, G., 2022. A new ductile fracture model for structural metals considering effects of stress state, strain hardening and micro-void shape. *Thin-Walled Structures*, 176, pp. 109280.

<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109280>

- 7 Torki, M. & Benzerga, A. A., 2022. Ductile fracture in plane stress. *Journal of Applied Mechanics*, 89, pp. 011001.

<https://doi.org/10.1115/1.4052106>

تنش  $0/333$  و  $-0/353$  و کمترین مقدار کرنش شکست برای نمونه‌های M2 کششی و M4 فشاری  $0/16$  (به ازای سه محوره تنش  $0/370$  و  $-0/497$ ) است.

بر اساس کانتورهای آسیب حاصل از روش عددی، در نواحی منتهی به انحنای، بیشترین مقدار پارامتر شروع آسیب و ضریب افت سفتی مشاهده می‌شود. همچنین با توجه به کانتور کرنش، بیشترین مقدار کرنش نیز در نواحی دارای انحنای موجود است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، روند تغییرات کرنش شکست در سه محوره‌های تنش مثبت به‌صورت کاهشی (با افزایش مقدار سه محوره تنش) و در سه محوره‌های تنش منفی به‌صورت کاهشی (با کاهش مقدار سه محوره تنش) است. تغییرات کرنش شکست به ازای زاویه لود نرمالیزه شده دارای روندی مشابه بوده، به‌طوری‌که هم در مقادیر مثبت و هم منفی زاویه لود نرمالیزه شده، روندی افزایشی وجود دارد.

نتایج نشان می‌دهند که فشار هیدرواستاتیکی نقش کلیدی در مکانیزم شکست دارد. فشار هیدرواستاتیکی باعث تغییر ناحیه آسیب و تغییر کرنش شکست در نمونه‌ها می‌شود. همچنین وجود فشار هیدرواستاتیک باعث تشکیل تنش‌های ترکیبی می‌شود که بر روی کرنش شکست اثرگذار است. این نتایج می‌توانند در طراحی و بهینه‌سازی قطعات فلزی تحت بارگذاری‌های ترکیبی مورد استفاده قرار گیرند، به‌ویژه در صنایعی مانند خودروسازی و هوافضا که کنترل شکست نرم برای افزایش ایمنی و دوام سازه‌ها اهمیت بالایی دارد.

## منابع

- 1 Peng, Z., Zhao, H. & Li, X., 2021. New ductile fracture model for fracture prediction ranging from negative to high stress triaxiality. *International Journal of Plasticity*, 145, pp. 103057. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2021.103057>
- 2 Yu, R., Li, X., Yue, Z., Li, A., Zhao, Z., Wang, X., Zhou, H. & Lu, T. J., 2022. Stress state sensitivity for plastic flow and ductile fracture of 1907a low-alloy marine steel: From tension to shear. *Materials*



- 15 Lou, Y., Yoon, J. W. & Huh, H., 2014. Modeling of shear ductile fracture considering a changeable cut-off value for stress triaxiality. *International Journal of plasticity*, 54, pp. 56-80.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2013.08.006>
- 16 Brünig, M., Gerke, S. & Schmidt, M., 2018. Damage and failure at negative stress triaxialities: Experiments, modeling and numerical simulations. *International Journal of Plasticity*, 102, pp. 70-82.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2017.12.003>
- 17 Ganjiani, M., 2020. A damage model for predicting ductile fracture with considering the dependency on stress triaxiality and lode angle. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 84, pp. 104048.  
<https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104048>
- 18 Wang, B., Xiao, X., Astakhov, V. P. & Liu, Z., 2019. The effects of stress triaxiality and strain rate on the fracture strain of ti6al4v. *Engineering Fracture Mechanics*, 219, pp. 106627.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106627>
- 19 Hong, T., Ding, F., Chen, F., Zhang, H., Zeng, Q. & Wang, J., 2023. Study on the fracture behaviour of 6061 aluminum alloy extruded tube during different stress conditions. *Crystals*, 13, pp. 489.  
<https://doi.org/10.3390/cryst13030489>
- 20 Liu, H., Jin, T., Su, B., Qiu, J. & Shu, X., 2024. Deformation responses and fracture behaviors of aa6061 under different stress
- 8 Freudenthal, A. M., 1950. The inelastic behavior of engineering materials and structures. *John Wiley & Sons, Inc.*
- 9 Cockcroft, M., 1968. Ductility and workability of metals. *J. of Metals*, 96, pp. 2444.
- 10 Li, R., Zheng, Z., Zhan, M., Zhang, H., Cui, X. & Lei, Y., 2022. Fracture prediction for metal sheet deformation under different stress states with uncoupled ductile fracture criteria. *Journal of Manufacturing Processes*, 73, pp. 531-543.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.023>
- 11 Bridgman, P. W. 1964. *Studies in large plastic flow and fracture: With special emphasis on the effects of hydrostatic pressure*, Harvard University Press.
- 12 Bao, Y. & Wierzbicki, T., 2005. On the cut-off value of negative triaxiality for fracture. *Engineering fracture mechanics*, 72, pp. 1049-1069.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2004.07.011>
- 13 Zheng, M., Hu, C., Luo, Z. & Zheng, X., 1993. Further study of the new damage model by negative stress triaxiality. *International journal of fracture*, 63, pp. R15-R19.  
<https://doi.org/10.1007/BF00053322>
- 14 Khan, A. S. & Liu, H., 2012. A new approach for ductile fracture prediction on al 2024-t351 alloy. *International Journal of Plasticity*, 35, pp. 1-12.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.01.003>

- alloy under continuously variable stress triaxiality. *Engineering Failure Analysis*, 169, pp. 109177.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109177>
- 27 Cheng, X., Wang, R., Zhou, Z., Yang, Y., Chen, X., Wu, H., Chen, X. & Xu, W., 2025. Characterization of uncoupled ductile fracture criteria for 0cr17ni4cu4nb stainless steel under different stress states. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, pp. 5985-6003.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.225>
- 28 Bai, Y. & Wierzbicki, T., 2010. Application of extended mohr–coulomb criterion to ductile fracture. *International journal of fracture*, 161, pp. 1-20.  
<https://doi.org/10.1007/s10704-009-9422-8>
- 21 Guo, X., Zong, S., Zhang, J. & Fang, Y., 2023. Modified plasticity constitutive model for extruded aluminum alloys. *Journal of Building Engineering*, 73, pp. 106717.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106717>
- 22 Haskul, M. & Arslan, E., 2025. Fracture initiation in aluminum alloys under multiaxial loading at various low strain rates. *Metals*, 15, pp. 785.  
<https://doi.org/10.3390/met15070785>
- 23 González, Á., Celentano, D., Cruchaga, M. & Ponthot, J.-P., 2024. The triaxiality effect on damage evolution in al-2024 tensile samples. *Metals*, 14, pp. 1103.  
<https://doi.org/10.3390/met14101103>
- 24 Feng, R., Chen, M. & Xie, L., 2024. Constitutive relationship and fracture mechanism for wide stress triaxiality of titanium alloy. *Engineering Fracture Mechanics*, 295, pp. 109804.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109804>
- 25 Liu, B., Chang, M., Ren, Y., Dong, Y., Zhou, H. & Zhao, S., 2025. Parameter modification of ti6al4v df2012 ductile fracture model under wide range strain rate and analysis based on micro fracture mechanism. *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 111446.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111446>
- 26 Wang, H., Jia, W., Ma, L., Huang, Z., Zhang, J., Ning, F. & Lei, J., 2025. Fracture behavior of az31 magnesium triaxialities. *Advanced Engineering Materials*, pp. 2301805.  
<https://doi.org/10.1002/adem.202301805>