

اثر سه محوره تنش منفی و زاویه لود بر رفتار شکست نرم فولاد اس تی-۳۷

محسن منصوری^۱، سید مهدی گنجیانی^{*}

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ganjiani@ut.ac.ir

چکیده

در این مقاله اثر سه محوره تنش منفی بر روی کرنش شکست مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، مدل هندسی برای نمونه‌ها با سه محوره تنش منفی به دست آمد. نمونه‌ها از جنس فولاد اس تی-۳۷ ساخته شدند. برای به دست آوردن سه محوره تنش منفی در آزمون تک‌محوری فشار، هندسه قطعات به نوعی طراحی شدند که از انجام آزمون چندمحوری جلوگیری می‌کند. آزمون‌های کشش و فشار به منظور دستیابی کرنش شکست بر روی آن‌ها انجام شد. آزمون کشش و فشار توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس شبیه‌سازی شدند. از روش همبستگی تصویری دیجیتال برای به دست آوردن مقادیر کرنش و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده شد. شکل و نحوه آسیب نمونه‌های مختلف پس از آزمون و شبیه‌سازی باهم مقایسه شدند که نحوه شکست در هر دو روش یکسان بود. کانتورهای کرنش روش اجزای محدود و همبستگی تصویری دیجیتال با هم مقایسه شدند و مشاهده شد که مقدار کرنش هر دو روش با یکدیگر تطابق دارند. مقادیر کرنش شکست برحسب سه محوره تنش، زاویه لود بی‌بعد شده و نوردای سوم رسم شدند. در هر دو روش تجربی و عددی، با کاهش مقدار سه محوره تنش منفی، ابتدا مقدار کرنش شکست کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: سه‌محوره تنش منفی، کرنش شکست، همبستگی تصویری دیجیتال، زاویه لود، آزمون مکانیکی.

۱- مقدمه

شکست نرم یک حالت شکست مهم در اجزای فولادی است که ارزیابی دقیق آن برای طراحی ایمنی سازه‌ها اهمیت عملی دارد. شکست نرم از طریق روش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است، از جمله تحلیل‌های میکرومکانیکی، تحقیق‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی. هر یک از این روش‌ها به توسعه سایر روش‌ها کمک کرده و به درک شکست نرم کمک می‌کند. مشاهدات تجربی اطلاعات اساسی را برای صحت‌سنجی از مطالعه‌های میکرومکانیکی فراهم می‌کنند. علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های عددی به یک ابزار کلیدی برای توسعه و پیاده‌سازی مدل‌های مبتنی بر میکرومکانیک تبدیل شده است [۱].

شکست نرم به عنوان فرآیندی تعریف می‌شود که شامل ائتلاف قابل توجهی از انرژی مکانیکی بوده و قبل از شکست دچار تغییر شکل پلاستیک در مقیاس بزرگ می‌شود. شکست نرم مقاومت نهایی قطعه‌های فولادی را در شرایط مختلفی تعیین می‌کند. به خصوص در نقاطی که ناپیوستگی‌ها منجر به تمرکز کرنش غیرالاستیک و تنش‌های چندمحوری می‌شوند، مانند مقاطع خالص اتصالات پیچ‌شده، اتصالات جوش‌داده‌شده و نواحی دارای تسلیم موضعی در قطعه‌های فولادی. شکست نرم در مواد فلزی از طریق رشد تدریجی، هسته‌زایی و در نهایت هم‌جوشی حفره‌ها رخ می‌دهد. در میان این فرآیندها، رویدادهای هسته‌زایی و هم‌جوشی حفره‌ها به شدت تصادفی هستند، که منجر به کمبود داده‌های تجربی کمی می‌شود. با فرض اینکه رشد حفره گام تعیین‌کننده برای شروع ترک نرم است، مدل‌هایی که هدفشان پیش‌بینی شکست نرم است باید اثرات ترکیبی سه محوره تنش و کرنش پلاستیک را به خوبی ثبت کنند. چندین محقق آزمایش‌های کشش تک‌محوری بر روی نمونه‌های صاف و بدون انحنا انجام داده‌اند. با این حال، شروع و گسترش ترک نرم حساس به سه‌محوره تنش است و مطالعه‌های جامع در مورد تکامل میکروحفره‌ها تحت سه‌محوره تنش مختلف از جنبه‌های کاربردی مهندسی است [۲]. با مطالعه ادبیات موضوعی، می‌توان متوجه شد که حالت تنش یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر آغاز شکست نرم است. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی شکست توسعه یافته‌اند تا نقطه آغاز شکست نرم را پیش‌بینی کنند. این مدل‌های پیش‌بینی شکست به دو دسته تقسیم می‌شوند: مدل شکست

کوپل نشده و مدل شکست کوپل شده. مدل های شکست نرم کوپل نشده تأثیر آسیب را بر معادلات رفتاری نادیده می گیرند، در حالی که مدل های شکست نرم کوپل شده، تجمع آسیب را در معادلات رفتاری در نظر می گیرند [۳].

از دیدگاه فیزیکی، آسیب به صورت کاهش سطح مقطع نامی در المان حجمی مرجع^۱ که تمام متغیرها در این عنصر حجمی هموزن در نظر گرفته می شود، تعریف می شود. کاهش سطح مقطع به خاطر جوانه زنی، رشد میکروترکها و میکروحفرهها است. ناپیوستگیها و آسیبها با توجه به اندازهی المان حجمی، کوچک هستند اما در مقایسه با فضاهای اتمی ماده بزرگ هستند. متغیر آسیب، وابسته به انتخاب بردار نرمال \vec{n} است و باید برای توصیف آن از رابطهی تانسوری استفاده شود. در حالت بارگذاری محوری که نیروی F عمود بر سطح مقطع در المان حجمی مرجع اعمال می شود و با در نظر گرفتن تعریف تنش $\sigma = F / A_0$ و جایگذاری $A_{eff} = A_0 (1 - D)$ با فرض همسانگرد بودن ماده، رابطه تنش مؤثر به صورت معادله (۱) تعریف می شود که این معادله مفهوم بنیادین در مکانیک آسیب پیوسته است.

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (1)$$

σ_{eff} را برخی مراجع با $\tilde{\sigma}$ نمایش می دهند. بر اساس تعریف تنش مؤثر، رفتار ماده در حالت آسیب دیده تنها تحت تأثیر تنش مؤثر است، به عبارت دیگر، معادلات در حالت بررسی آسیب مثل معادلات در حالت عادی است با این تفاوت که تنش مؤثر جایگزین تنش در معادلات می شود.

آسیب نرم در فلزات می تواند در اثر رشد و به هم پیوستن میکروحفره های درون ماده گسترش یابد. بر این اساس گرسون مدلی را برای فلزات نرم ارائه داد [۴، ۵]. مدل اصلی گرسون اولین مدل میکرو مکانیکی است که تأثیر رشد فضای خالی را بر تابع تسلیم و قانون جریان^۲ فلز توصیف می کند. آسیب انباشته شده در طول تغییر شکل با کسر حجمی فضای خالی نشان داده می شود. تلاش های زیادی برای اصلاح مدل گرسون صورت گرفته است [۶، ۷]. اگرچه مدل های شکست کوپل شده دارای مزایایی در توضیح مکانیزم های فیزیکی زیربنایی شکست نرم هستند، اما همچنان در کاربردهای مهندسی محدودیت هایی دارند: اول آن که، آنها معمولاً پارامترهای مهم فیزیکی زیادی دارند که به دست آوردن دقیق آنها دشوار است [۸]. دوم آن که، شبیه سازی با مدل های شکست کوپل شده در مقایسه با مدل های شکست کوپل نشده زمان بر است [۹].

به دلیل سادگی ساختار، تعداد زیادی از مدل های کوپل نشده در طی سال های گذشته با فرضیه های مختلف یا روش های آزمایشگاهی مختلف توسعه یافته اند. مدل کوپل نشده بر مبنای انرژی برای اولین بار توسط فرودنتال [۱۰] اختراع شد، وی کسی بود که گفت شکست نرم هنگامی رخ می دهد که کار پلاستیک در هر واحد حجم ماده که از یک آستانه بگذرد. نتیجه چنین شده است که شکست نرم همیشه در ناحیه ای با اولین تنش اصلی ظاهر می شود و با این پدیده ها، کارکرافت و لاتام [۱۱]. یک مدل شکست پیشنهاد کردند که توسط اولین تنش اصلی ایجاد می شود. سپس اوه و همکارانش [۱۲] اولین تنش اصلی را با تنش معادل در مدل کارکرافت و لاتام نرمالیزه کردند. طبق نتایج آنها، مدل توسعه یافته می تواند شکست نرم را در اکستروژن^۳ و فرایند شکل دهی کشش پیش بینی کند. بروزو و همکارانش [۱۳] مدل کارکرافت و لاتام را به وسیله در نظرگیری اثر تنش میانگین بر شکست نرم توسعه دادند. اویان و همکارانش [۱۴] معتقدند که نسبت انباشتگی آسیب با سه محوره تنش خطی است و از این به بعد محققان فهمیدند که سه محوره تنش در شکست نرم نقش بسیار مهمی دارد. گنجیانی [۱۵] یک مدل شکست در چارچوب مکانیک آسیب پیوسته ارائه کرده است. این مدل، از سطح تسلیم پلاستیک فون میسر و یک سطح تسلیم آسیب بهره می گیرد که به تنش سه محوری و پارامتر زاویه لوود بستگی دارد. نتایج پیش بینی شده شامل حالت تنش برای وضعیت تنش صفحه ای می باشند. این مدل، کرنش شکست را در محدوده وسیعی از سه محوره تنش از جمله سه محوره تنش صفر تا ۱/۳- پیش بینی می کند. کرنش شکست وابسته به زاویه لوود مربوط به مدل پیشنهادی با داده های تجربی بائو و ویرزبیک [۱۶] مقایسه شده اند و مشاهده شد که این مدل توانایی پیش بینی کرنش شکست را دارد.

¹ Representative element volume

² Flow rule

³ Extrusion

وولن‌وبر^۱ و همکاران، رفتار دوفازی فولاد دی‌پی ۸۰۰ تحت مسیر کرنش‌های مختلف، بررسی کردند [۱۷]. مسیر کرنش یک شامل آزمون کشش ساده ولی مسیر کرنش دو از ترکیب آزمون‌های کشش و خمش تشکیل شده بود. هنگامی که تغییر شکل در مسیرهای کرنش یک و دو تحت سه محوره تنش مثبت صورت می‌گیرد، آسیب بیشتری ایجاد می‌شود چون تعداد حفره‌های ایجادشده در مسیر یک زیاد است. درحالی‌که اگر تغییر شکل ابتدا در سه محوره تنش منفی و سپس با تغییر مسیر کرنش سه محوره تنش مثبت ادامه یابد، مقدار آسیب کاهش می‌یابد. رفتار شکست آلیاژ منگنزیم زدکی ۶۰ با سه محوره‌های تنش مختلف تحت آزمون کشش توسط ژو و همکاران مورد تحقیق قرار گرفت [۱۸]. مشاهده شد که با تغییر سه محوره تنش از صفر به ۰/۶۶، نوع شکست از بین‌دانه‌ای به میان‌دانه‌ای تغییر کرد. پارک و همکاران، یک معیار شروع ترک بر پایه ترک ارائه دادند که اثر سه محوره تنش در نظر گرفته شد [۱۹]. از مدل گرسون برای توصیف آسیب پیوسته با رشد فضای خالی استفاده شد، درحالی‌که مدل ناحیه منسجم برای معرفی ترک‌های ناپیوسته و نشان دادن رفتار نرم شدن غیرخطی استفاده می‌شود. در این مدل، تخلخل درون ترک با افزایش مقدار سه محوره تنش، کاهش می‌یابد.

در این مقاله، کرنش شکست هندسه‌های تنش سه محوره منفی به‌طور عددی و تجربی به‌دست‌آمده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به دلیل دشوار بودن انجام آزمون چندمحوری، در این پژوهش سعی شد هندسه نمونه‌ها با طراحی خاصی، حالت تنش چندمحوری تحت آزمون کشش و فشار در آن‌ها به وجود بیاید. از انحنا با شعاع‌های مختلف استفاده شد تا سه محوره تنش منفی بدون نیاز به آزمون چندمحوری به‌دست بیاید. به‌منظور به دست آوردن کرنش شکست، آزمون‌های کشش و فشار بر روی نمونه‌ها انجام و برای اندازه‌گیری صحیح کرنش در آزمون‌ها، از روش همبستگی تصویری دیجیتال^۴ استفاده شد. همچنین، نمونه‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود شبیه‌سازی شدند. کانتورهای کرنش برای تمامی نمونه در دو روش همبستگی تصویری دیجیتال و شبیه‌سازی با هم مقایسه شدند. برای درک درست از رفتار آسیب نرم نمونه‌ها، معیار آسیب نرم به شبیه‌سازی اضافه شدند. اثر هندسه متفاوت نمونه‌ها بر روی مشخصه سه محوره تنش^۵ و آسیب نرم مطالعه شدند. درنهایت، به‌منظور بررسی اثر سه محوره تنش منفی بر روی رفتار شکست نرم ماده، کرنش شکست به ازای سه محوره‌های متفاوت بررسی و رفتار ماده در سه محوره تنش منفی مطالعه شد.

۲- تعریف حالت تنش

۲-۱- تحلیل تئوری:

حالت تنش می‌تواند با استفاده از تانسور تنش یا مقادیر تنش اصلی نشان داده شود. همچنین، ثابت‌های تنش بدون بعد معمولاً در مکانیک پلاستیسیته و شکست برای نمایش حالت تنش استفاده شده‌اند. معیارهای شکست نرم غالباً یک تابعی از ثابت‌های تنش برای شرح تأثیر حالت تنش روی انباشت آسیب و رفتار شکست می‌باشند. بخش نوردای تانسور تنش، از طریق نوردای اول تانسور تنش کوشی σ یعنی (I_1) ، و نورداهای دوم و سوم تانسور تنش انحرافی متناظر یعنی J_2 و J_3 ،

$$s = \sigma - (tr \sigma / 3)$$
 توصیف می‌شود،

$$I_1 = tr \sigma, \quad J_2 = \frac{1}{2} s : s, \quad J_3 = \det(s) \quad (2)$$

تنش متوسط (یا هیدروستاتیک) σ_m و تنش معادل (یا وون میسر) $\bar{\sigma}$ (یا σ_{eq} یا σ_{VM}) به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\sigma_m = \frac{I_1}{3}, \quad \sigma_{VM} = \sqrt{3J_2} \quad (3)$$

^۱ Wollenweber

^۲ DP800

^۳ ZK60

^۴ Digital Image Correlation

^۵ Triaxiality

سه محوره تنش η ، تنش هیدروستاتیک σ_m و تنش وون میسر σ_{VM} از طریق عبارت زیر با یکدیگر مرتبط شده‌اند:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{VM}} = \frac{I_1}{3\sqrt{3}J_2} \quad (4)$$

که $-\infty \leq \eta \leq \infty$ ، نوردای سوم نرمالیزه ξ عبارت است از:

$$\xi = \frac{27}{2} \frac{J_3}{\sigma_{VM}^3} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (5)$$

که در بازه $-1 \leq \xi \leq 1$ قرار می‌گیرد؛ این پارامتر، مکان تنش اصلی دوم σ_{II} را نسبت به تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه، یعنی σ_I و σ_{III} تعیین می‌کند. توجه داشته باشید که ξ به ازای $\sigma_I = \sigma_{II} > \sigma_{III}$ برابر -1 ، و به ازای $\sigma_I > \sigma_{II} = \sigma_{III}$ برابر یک است، و به ازای $\sigma_{II} = (\sigma_I + \sigma_{III})/2$ برابر صفر است. مدل‌های شکست به کاررفته در این پژوهش، مستقیماً برحسب نوردای سوم نرمالیزه ξ فرمول‌بندی نشده‌اند. مدل موهر-کولمب اصلاح‌شده، مبتنی بر پارامتر زاویه لود نرمالیزه $\bar{\theta}$ است، که در ادامه به معرفی آن می‌پردازیم.

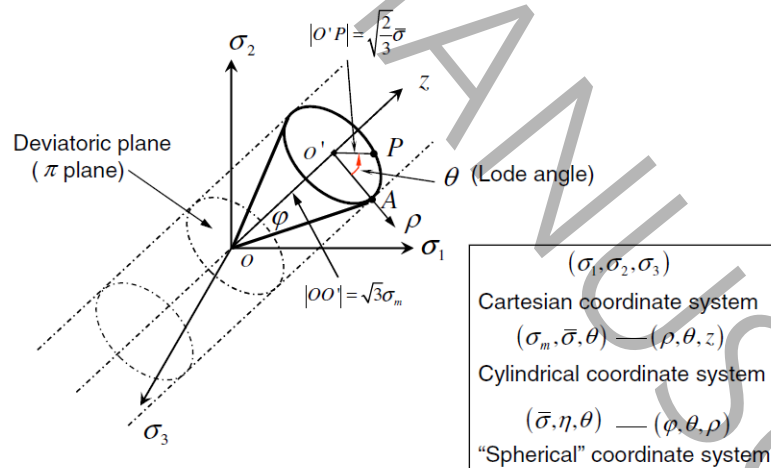
پارامتر زاویه لود θ ، ثابت تنش بدون بعد مهم دیگر است که در شکل ۱ نشان داده شده و به صورت زیر تعریف شده است:

$$\theta = \frac{1}{3} \left(\cos^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right) \right) \quad (6)$$

پارامتر زاویه لود بی‌بعدشده $\bar{\theta}$ به صورت زیر تعریف شده است:

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{6\theta}{\pi} \quad (7)$$

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



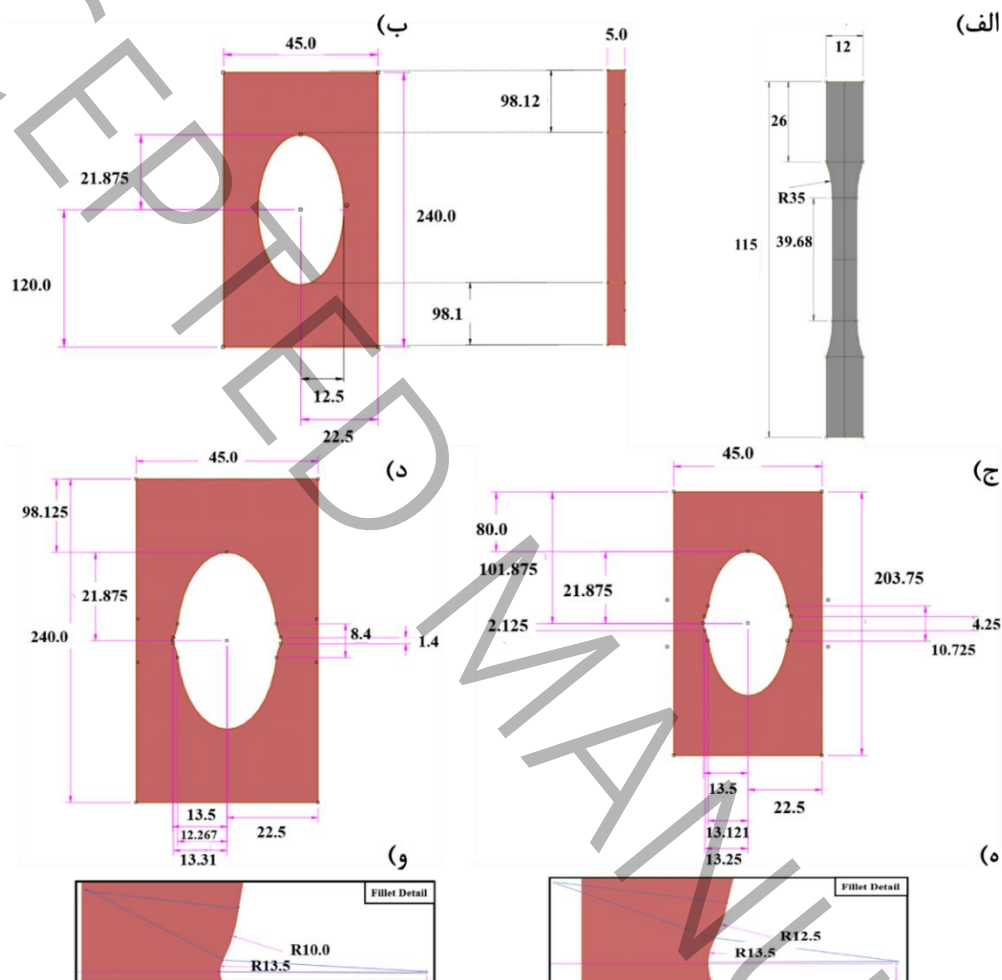
شکل ۱ سه نوع سیستم مختصات در فضای تنش‌های اصلی [۲۰]

Figure 1 Three types of coordinate systems are considered in the principal stress space [20]

۲-۲-۲ مدل‌های هندسی

به منظور بررسی اثر چند محوره تنش منفی بر روی کرنش شکست، چند نوع نمونه با هندسه‌های مختلف طراحی شدند تا سه محوره تنش منفی به دست بیاید. وجود انحنای و شیاری منجر به تغییر وضعیت تنش از حالت تک‌محوری به چندمحوری می‌شود. بنابراین می‌توان با آزمون کشش، فشار و برش تک‌محوری، وضعیت تنش چندمحوری ایجاد کرد. مدل هندسی نمونه‌های

آزمون کشش و فشار در شکل ۲ نشان داده شده است. تمامی نمونه‌ها دارای ضخامت پنج میلی‌متر هستند. هندسه نمونه‌های ام ۱، ام ۲ و ام ۳ به صورت مستطیل هستند که درون آن‌ها سوراخی بیضی شکل ایجاد شده است. ابعاد مستطیل در نمونه‌های ام ۱ و ام ۲ به طول ۲۰۴ و عرض ۴۵ میلی‌متر هستند در حالی که نمونه ام ۳ مستطیلی به طول ۲۰۳/۷۵ و عرض ۴۵ میلی‌متر است. حفره بیضی شکل با شعاع‌های ۲۱/۸۷۵ و ۱۳/۵ میلی‌متر ایجاد شده که در نمونه‌های ام ۲ و ام ۳، در راستای شعاع کوچک‌تر، دو انحنا با شعاع‌های متفاوت تشکیل شده است.



شکل ۲ مدل هندسی نمونه‌ها الف) دمبلی ب) ام ۱ ج) نمونه ام ۲، د) نمونه ام ۳، ه) انحنا نمونه ام ۲ و و) انحنا نمونه ام ۳

Figure 2 The geometric models of the specimens a) a dog-bone specimen, b) an M1 specimen, c) an M2 specimen, d) an M3 specimen, e) the curvature of the M2 specimen, and f) the curvature of the M3 specimen

۲-۳- تحلیل تجربی

آزمون‌های کشش و فشار توسط دستگاه کشش یونیورسال اینسترون^۴ ۸۵۰۲ در دانشگاه تهران انجام شد. بر روی نمونه دمبلی شکل آزمون کشش، ام ۲ و ام ۳ آزمون فشار و ام ۱ هر دو آزمون فشار و کشش انجام شد. برای اندازه‌گیری کرنش، از فک دستگاه و همچنین از روش همبستگی تصویری دیجیتال استفاده شد. برای انجام این کار، ابتدا سطح نمونه با رنگ سفید اسپری

^۱ M1

^۲ M2

^۳ M3

^۴ Instron 8502

و سپس یک الگوی لکه‌های سیاه بر روی آن ایجاد شد. سپس الگوی نامنظم توسط دوربین سی‌ام‌اواس^۱ مدل کیواچ‌وای ۴۱۰ سی^۲ ثبت شد. تصاویر به دست آمده از روش همبستگی تصویری دیجیتال، توسط نرم‌افزار منبع باز^۳ تحلیل شدند و جابه‌جایی و کرنش برای آزمون‌های مختلف از تصاویر ثبت شده، به دست آمد. دستگاه‌های انجام آزمون و کرنش سنجی همبستگی تصویری دیجیتال در شکل ۳ نشان داده شده است. آزمون کشش نمونه دمبلی طبق استاندارد دین ۵۰۱۲۵^۴ انجام شد. به دلیل این که هندسه های نمونه ام ۱، ام ۲ و ام ۳ طوری طراحی شدند که اثر سه محوره تنش مختلف تحت آزمون تک محوره مورد بررسی قرار بگیرد و تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته اند، هنوز استاندارد دی برای این نمونه ها ایجاد نشده است. برای هر نمونه، تعداد سه بار آزمون تکرار شد و مقدار متوسط آن‌ها گزارش شد. در شکل ۳-الف، نمونه دمبلی را نشان می‌دهد که برای کرنش سنجی همبستگی تصویری دیجیتال اسپری زده شده و درون فک دستگاه قرار گرفته است. در شکل ۳-ب نیز آزمون مکانیکی به همراه دوربین عکس برداری نمایش داده شده است. نمونه‌ها از جنس فولاد اس تی-۳۷^۵ هستند که در جدول ۱ خواص مادی به کاررفته در این مطالعه ذکر شده است.

جدول ۱ پارامترهای ماده برای فولاد اس تی-۳۷ به کاررفته در شبیه‌سازی

Table 1 The material parameters for ST-37 steel used in the simulations

ویژگی	مقدار
چگالی (kg/m^3)	۷۸۳۰
E (GPa)	۲۰۵
ν	۰/۳

^۱ CMOS

^۲ QHY410C

^۳ Ncorr

^۴ DIN 50125

^۵ ST-37



شکل ۳ آزمون مکانیکی الف) نمونه دمبلی آماده شده برای روش همبستگی تصویری دیجیتال ب) دستگاه کشش و دوربین برای کرنش سنجی توسط روش همبستگی تصویری دیجیتال

Figure 3 Mechanical test a) the preparation of a dog-bone specimen for the Digital Image Correlation (DIC) method and b) the use of a tensile testing machine along with a camera setup for strain measurement via DIC

۲-۴- تحلیل عددی:

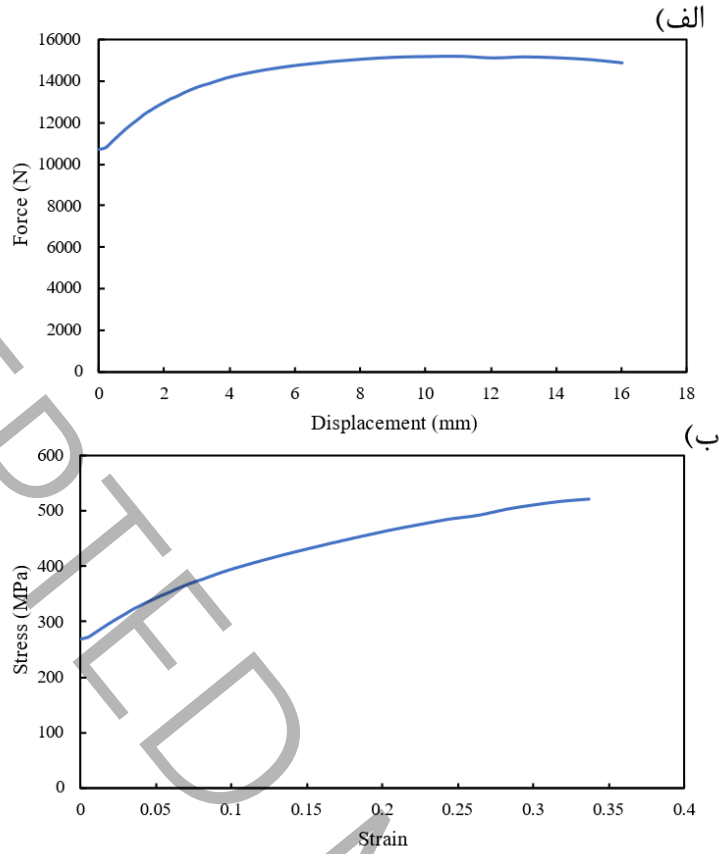
تحلیل‌های عددی برای بررسی هندسه‌های مختلف سه محوره تنش منفی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. منحنی تنش برحسب کرنش پلاستیک استفاده شده در شبیه‌سازی در شکل ۴ نمایش داده شده است. برای مشاهده آسیب نرم در شبیه‌سازی، از مدل آسیب نرم در نرم‌افزار استفاده شده است. فرم کلی قانون آسیب به صورت زیر است [۲۰]:

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}_p} \frac{d\bar{\epsilon}_p}{\bar{\epsilon}_f(\eta, \theta)} \quad (8)$$

که D شاخص آسیب و $\bar{\epsilon}_p$ کرنش پلاستیک معادل است. شکست زمانی آغاز می‌شود که D به واحد برسد. مدل آسیب استفاده شده در این مطالعه از نوع نمایی است که مقادیر ۱ برای جابه‌جایی در شکست و ۰/۸ برای پارامتر نمایی λ در مدل آسیب استفاده شد. از المان مکعبی هشت گره‌ای^۲ برای شبکه زدن استفاده شد. مدل‌های عددی شبکه‌بندی شده نمونه‌ها، در شکل ۵ نشان داده شده است. در طول سنجش نمونه دمبلی نحوه شبکه‌بندی به‌نوعی انجام شده که تعداد المان بیشتری در مرکز قرار گرفتند تا دقت شبیه‌سازی افزایش یابد. برای نمونه دمبلی ۱۰۵۶۰، ۱م، ۳۰۳۴۰، ۲م، ۲۵۹۴۰ و ۳م، ۲۸۴۴۰ المان ایجاد شده است. در نمونه‌های ۱م، ۲م و ۳م قسمتی که در فک دستگاه قرار دارد به صورت جسم صلب مدل شدند تا هزینه محاسباتی کاهش یابد. بار خارجی به صورت جابه‌جایی در راستای y اعمال می‌شود و در سایر جهات، جابه‌جایی مقید شده است.

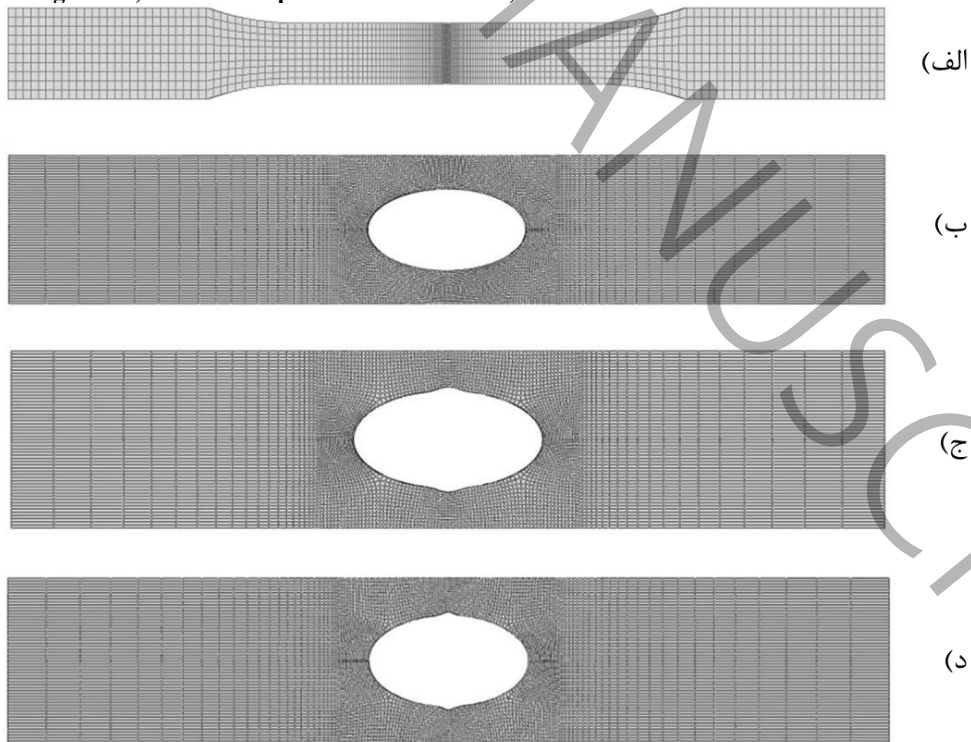
^۱ Law

^۲ Eight-node brick element



شکل ۴ الف) نمودار نیرو جابه‌جایی (ب) نمودار تنش کرنش استفاده‌شده در شبیه‌سازی

Figure 4 a) the force-displacement curve and b) the stress-strain curve used in the simulations



شکل ۵ مدل اجزای محدود نمونه الف) دمبلی، (ب) ام ۱، (ج) ام ۲ و (د) ام ۳

Figure 5 The finite element models of the specimens a) dog-bone, b) the M1, c) the M2, and d) the M3 specimen

۳- تفسیر نتایج

در این بخش، نتایج آزمون‌های مکانیکی انجام شده برای نمونه‌های دمبلی، ام ۱، ام ۲ و ام ۳ به تفکیک ارائه خواهد شد. این نتایج برای هر نمونه به دو طریق شامل داده‌های خروجی دستگاه (بار و جابجایی) و داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی نمایش داده شدند.

۳-۱- تنش سه محوره منفی

از آنجایی که تنش تحت آزمون کشش در نمونه دمبلی به صورت تک‌محوری باقی می‌ماند، طبق معادله (۴)، مقدار سه محوره تنش برابر $0/33$ است. وجود انحنای در سایر نمونه، منجر به تغییر وضعیت تنش از حالت تک‌محوری به چند محوری می‌شود. به همین دلیل، نمی‌توان از معادله (۴) برای هندسه‌های دارای انحنای استفاده کرد و روش اجزای محدود به کار گرفته شد تا سه محوره تنش در هندسه‌های مختلف به دست بیاید. در این روش، ابتدا خواص الاستیک و پلاستیک نمونه‌ها طبق بخش شبیه‌سازی عددی اعمال شده و بارگذاری انجام می‌شود. سپس، سه محوره تنش با استفاده از بخش خروجی میدان نرم‌افزار، اندازه‌گیری می‌شود. تغییرات سه محوره تنش در جابه‌جایی مختلف محاسبه شد و در نقطه‌ای که مقدار آن به عدد ثابتی رسید، به عنوان سه محوره تنش نمونه‌ها انتخاب شد. در جدول ۲ نتایج سه محوره تنش به دست آمده برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است.

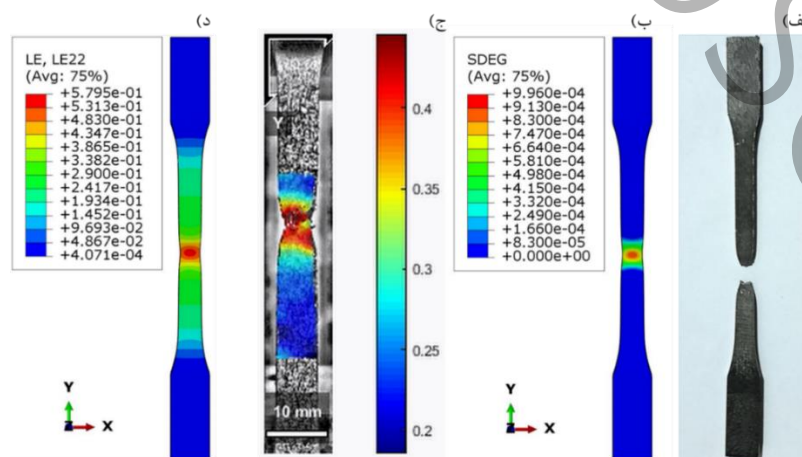
جدول ۲ مقادیر تنش سه محوره به دست آمده برای نمونه‌های مختلف

Table 2 The stress triaxiality values obtained for different samples

سه محوره تنش	نمونه
$0/33$	دمبلی
$0/348$	ام ۱ (کشش)
$-0/348$	ام ۱ (فشار)
$-0/381$	ام ۲
$-0/456$	ام ۳

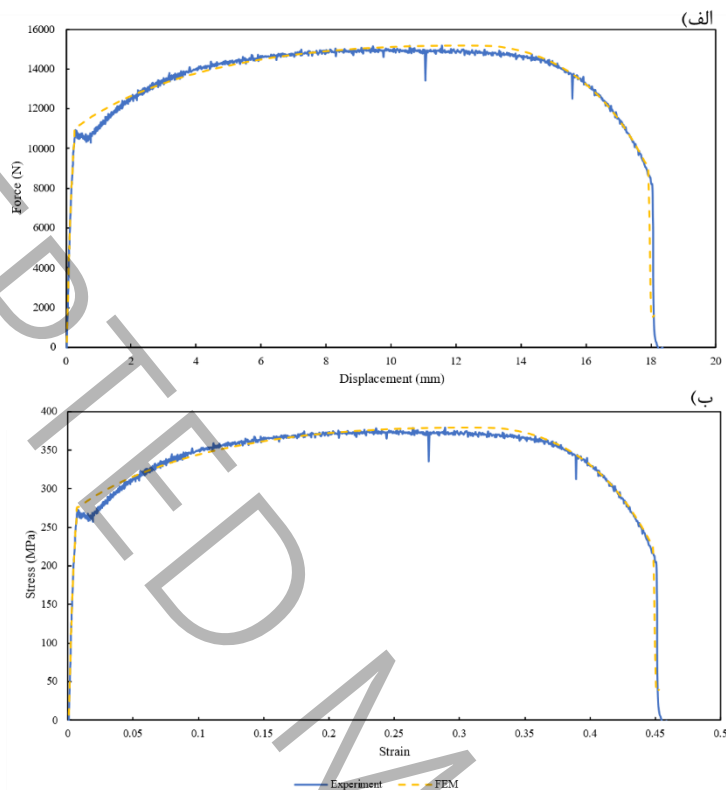
۳-۲- نمونه دمبلی

در شکل ۶ نمونه پس از آزمون کشش به همراه کانتور آسیب و کرنش در راستای λ نمایش داده شده است. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده، کانتور کرنش همبستگی تصویری دیجیتال (شکل ۶ ج) با کانتور کرنش در جهت λ در شبیه‌سازی (شکل ۶ د) مقایسه شدند. همچنین، نتایج آزمون کشش بر نمونه دمبلی شامل مقادیر بار و جابجایی و مقادیر تنش و کرنش به ترتیب در شکل ۷ الف و ب به دو روش مختلف تجربی (داده‌های دستگاه کشش) و اجزای محدود نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، نتایج تنش و کرنش به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تجربی در پیش‌بینی مقادیر تنش تسلیم، استحکام نهایی، تنش در لحظه شکست و کرنش شکست موفق عمل کرده است.



شکل ۶ نمونه دمبلی الف) پس از آزمون کشش، ب) پارامتر آسیب، ج) کانتور کرنش همبستگی تصویری دیجیتال و د) کرنش در راستای y

Figure 6 The dog-bone, a) the post-tensile test condition, b) the damage parameter, c) the strain contour obtained from DIC, and d) the strain in the y-direction



شکل ۷ مقایسه نتایج به دست آمده به روش تجربی و اجزای محدود برای نمونه دمبلی الف) نمودار بار-جابجایی ب) نمودار تنش-کرنش

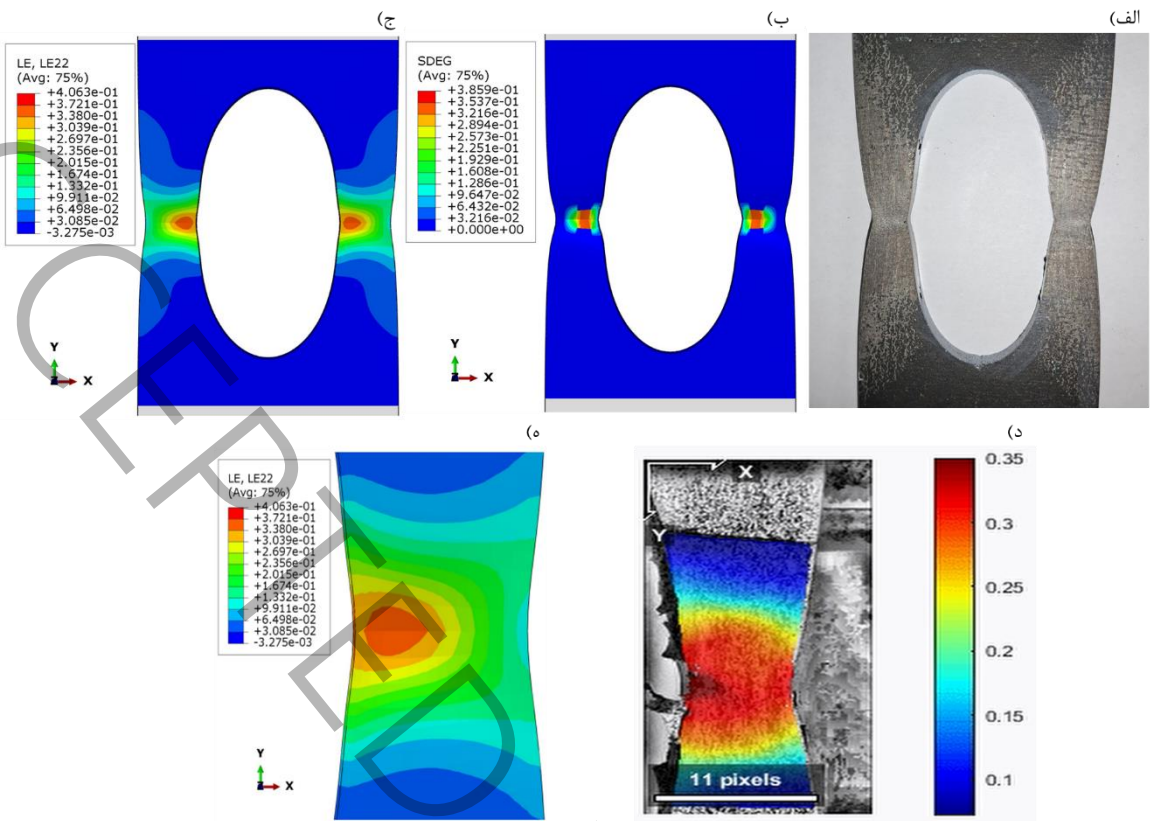
Figure 7 Comparison between the experimental and FEM results for the dog-bone, a) the load-displacement curve and b) the stress-strain curve

مقدار پارامتر شروع آسیب برای تمامی نمونه‌ها، مقدار یک است. در این تحلیل نشان داده شده است که هنگامی که مقدار پارامتر شروع آسیب به یک می‌رسد، المان‌ها دچار کاهش سفتی می‌شوند. به علت تعداد زیاد تصاویر، تنها پارامتر کاهش سفتی نشان داده شده است.

۳-۳- نمونه ۱م

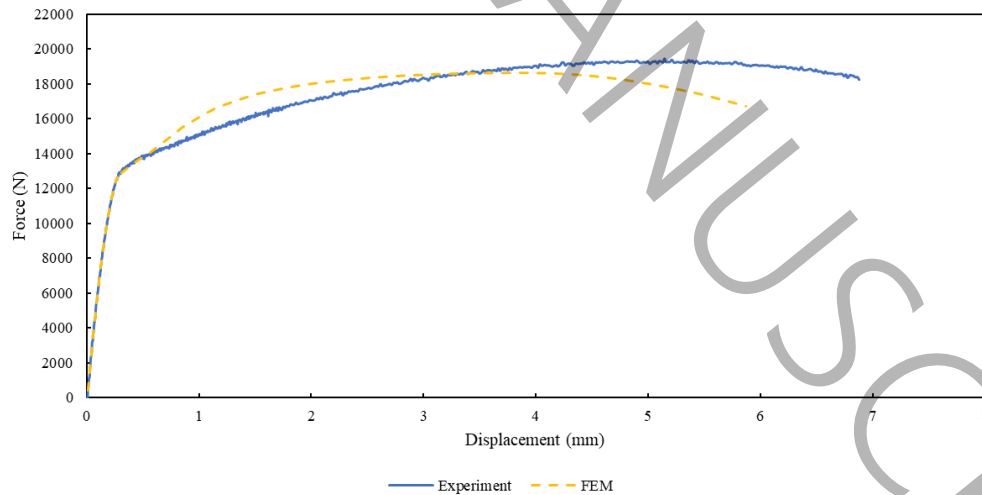
۳-۳-۱- کشش

در شکل ۸ و شکل ۹، نتایج آزمون کشش بر نمونه ۱م به ترتیب شامل نمونه واقعی به همراه کانتور آسیب، کانتورهای کرنش از روش همبستگی تصویری دیجیتال و شبیه‌سازی و مقادیر بار و جابجایی نمایش داده شده است. از مقایسه شکل نمونه‌ها در دو روش، مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی با آزمون کشش مطابقت دارند. در شکل ۸ پارامتر کاهش افت سفتی نشان داده شده است، هنگامی که مقدار پارامتر شروع آسیب به یک می‌رسد، سفتی ماده شروع به کاهش می‌کند. در تمام ناحیه‌ای که دچار افت سفتی شده‌اند، مقدار پارامتر آسیب به حد بحرانی رسیده است. تفاوت میان نمودارهای شکل ۹ می‌توان به دلیل عیب‌های به وجود آمده هنگام ساخت قطعه و در نظرنگرفته شدن این عیب‌ها در شبیه‌سازی اشاره کرد. همچنین، از مقادیر جابه‌جایی فک دستگاه استفاده شد که با مقادیر جابه‌جایی طول سنجه نمونه تا حدی متفاوت بوده و ممکن است باعث ایجاد اختلاف نتایج شود.



شکل ۸ نمونه ام ۱ الف) پس از آزمون کشش، ب) پارامتر آسیب و ج) کرنش در راستای y ، د) کانتور کرنش همبستگی تصویری دیجیتال و ه) تصویر بزرگنمایی شده کانتور کرنش شبیه‌سازی

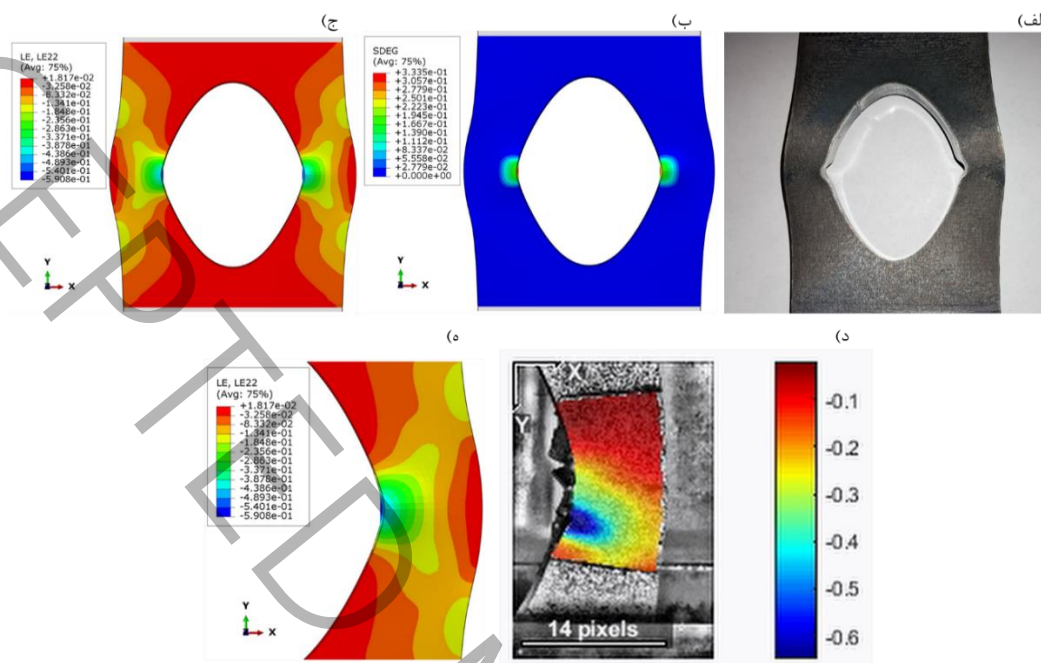
Figure 8 M1 specimen, a) the post-tensile test condition, b) the damage parameter, c) the strain in the y -direction, d) the strain contour obtained from DIC, and e) a magnified image of the simulated strain contour



شکل ۹ نمودار بار کششی - جابجایی نمونه ام ۱

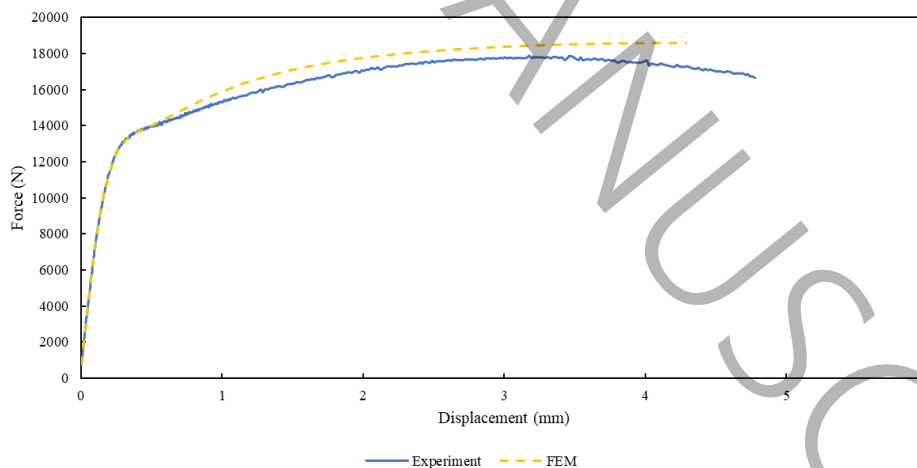
Figure 9 The tensile load-displacement curve for M1

در شکل ۱۰ نمونه پس از آزمون، کانتور آسیب و کانتور کرنش از روش همبستگی تصویری دیجیتال و اجزای محدود نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که شکل نمونه پس از آزمون همانند شکل تغییر یافته در شبیه‌سازی است. نتایج نیروی فشاری-جابجایی برای نمونه ام ۱ در قالب شکل ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۱۰ نمونه ام ۱ الف) پس از آزمون فشار، ب) پارامتر آسیب و ج) کرنش در راستای y، د) کانتور کرنش همبستگی تصویری دیجیتال و ه) تصویر بزرگنمایی شده کانتور کرنش شبیه‌سازی

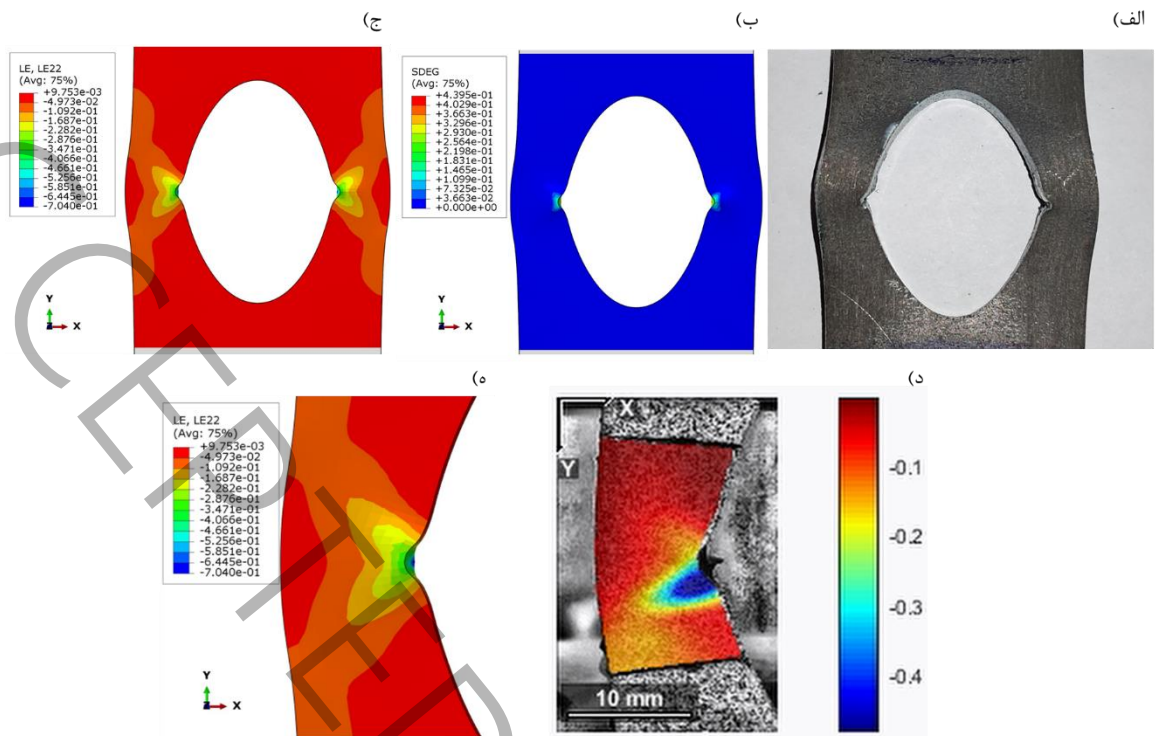
Figure 10 M1 specimen, a) the post-compression test condition, b) the damage parameter, c) the strain in the y-direction, d) the strain contour obtained from DIC, and e) a magnified image of the simulated strain contour



شکل ۱۱ نمودار بار فشاری-جابجایی نمونه ام ۱

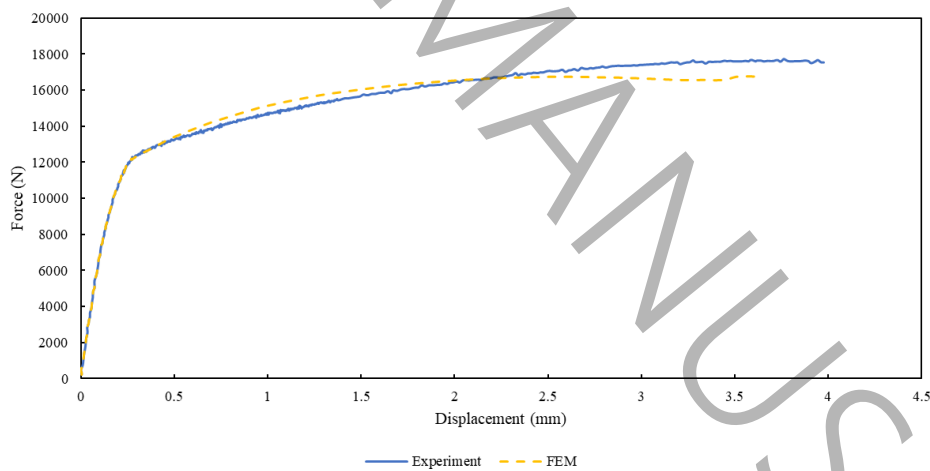
Figure 11 The compression load-displacement curve for M1

نتایج کانتورهای آسیب و کرنش و نیروی فشاری-جابجایی برای نمونه ام ۲ در قالب شکل ۱۲ و شکل ۱۳ ارائه شده است. با مقایسه شکل نمونه با کانتورهای به دست آمده، مشاهده می‌شود که بین شبیه‌سازی و آزمون مطابقت وجود دارد.



شکل ۱۲ نمونه ام ۲ الف) پس از آزمون فشار، ب) پارامتر آسیب، ج) کرنش در راستای y، د) کانتور کرنش همبستگی تصویری دیجیتال و ه) تصویر بزرگنمایی شده کانتور کرنش شبیه‌سازی

Figure 12 M2 specimen, a) the post-compression test condition, b) the damage parameter, c) the strain in the y-direction, d) the strain contour obtained from DIC, and e) a magnified image of the simulated strain contour

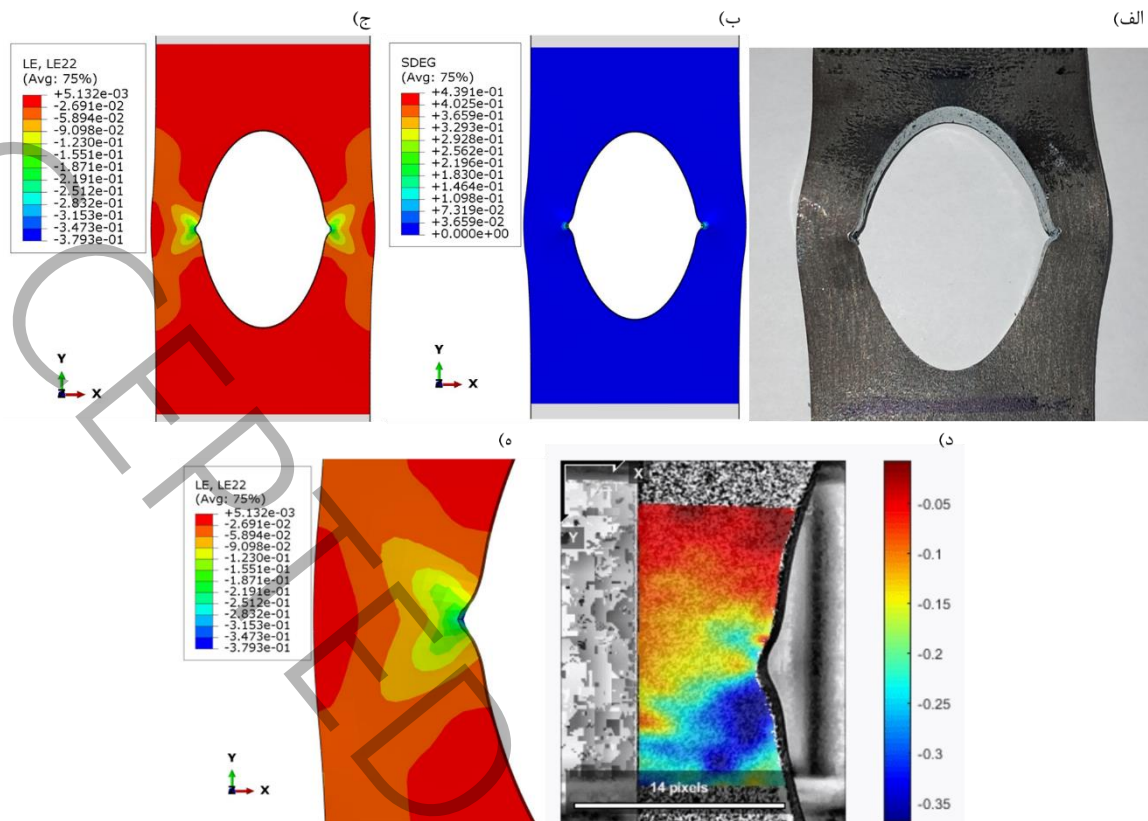


شکل ۱۳ نمودار بار-جابجایی نمونه ام ۲

Figure 13 The compression load-displacement curve for M2

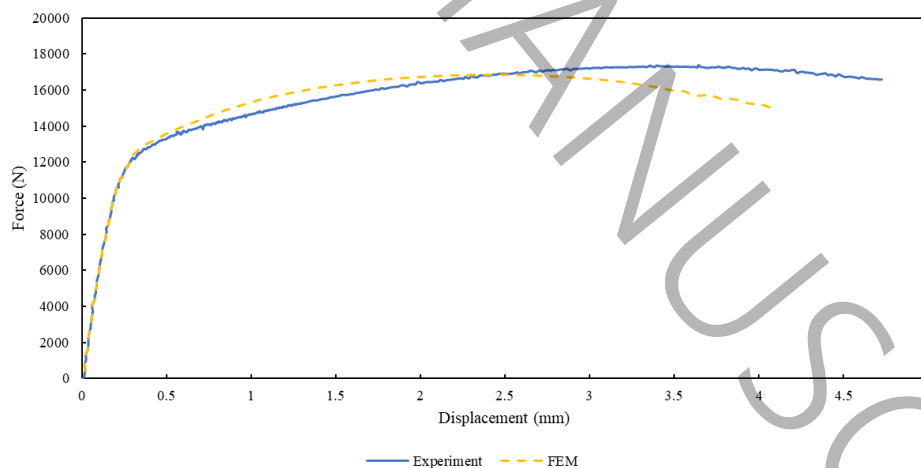
۳-۵- نمونه ام ۳

در شکل ۱۴، نمونه پس از آزمون فشار، کانتور آسیب، کانتورهای کرنش از روش همبستگی تصویری دیجیتال و شبیه‌سازی و کانتور کرنش و شکل ۱۵ نتایج نیرو-جابجایی برای نمونه ام ۳ نشان داده شده است که مطابقت میان نتایج حاصل از دو روش تجربی و اجزای محدود، به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۱۴ نمونه ام ۳ الف) پس از آزمون فشار، ب) پارامتر آسیب و ج) کرنش در راستای y ، د) کانتور کرنش همبستگی تصویری دیجیتال و ه) تصویر بزرگنمایی شده کانتور کرنش شبیه‌سازی

Figure 14 M3 specimen, a) the post-compression test condition, b) the damage parameter, c) the strain in the y -direction, d) the strain contour obtained from DIC, and e) a magnified image of the simulated strain contour



شکل ۱۵ نمودار بار-جابجایی نمونه ام ۳

Figure 15 The compression load-displacement curve for M3

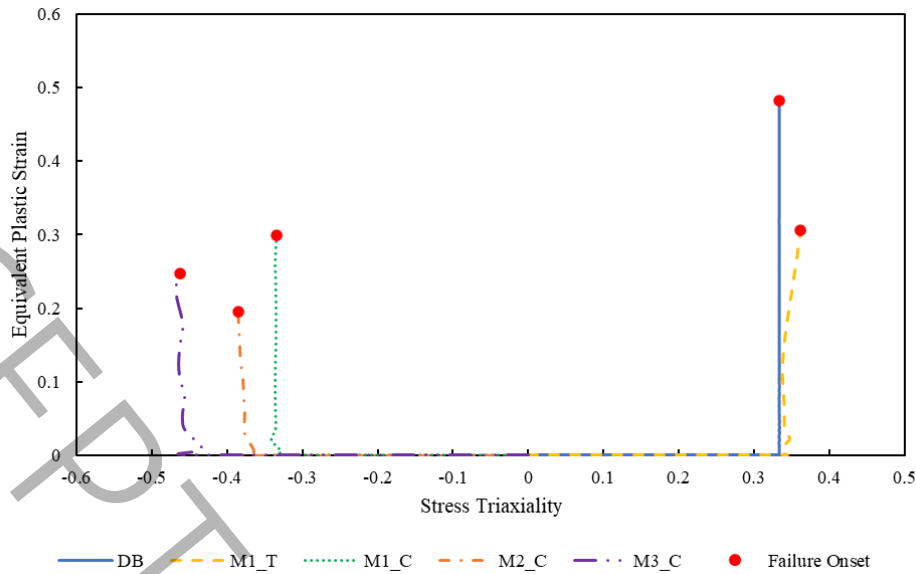
۳-۸- بحث

از نظر کیفی، تمام آزمایش‌ها پاسخ مشابهی از جمله یک دوره بارگذاری الاستیک اولیه و به دنبال آن، یک دوره تسلیم، کرنش سختی و در انتها شکست نهایی را نشان دادند. مطابق نتایج، تمام حالت‌های شکست نمونه‌ها، شکست نرم بودند. با بررسی نمودارهای مربوط به کانتور کرنش حاصل از روش همبستگی تصویری دیجیتال و اجزای محدود، شبیه‌سازی‌های انجام‌شده اعتبارسنجی شدند. مشاهده شد که در تمامی نمونه‌ها، نتایج حاصل از دو روش مشابهت قابل قبولی دارند. در نمونه دمبلی،

تمامی پارامترها به خوبی در دو روش با هم تطابق داشتند. در حالی که برای نمونه ام ۱ کششی، کرنش شکست دو روش با هم ۱۵٪ تفاوت دارد. همچنین در آزمون فشار، با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی بیشترین مطابقت مربوط به نمونه های ام ۱ و ام ۲ بوده که کرنش در لحظه شکست را با خطای معادل ۱۰٪ نتایج آزمایشگاهی پیش بینی می کند. بیشترین اختلاف نیز مربوط به نمونه ام ۳ با درصد خطای ۱۴٪ در پیش بینی کرنش در لحظه شکست است. تصاویر نمونه های ام ۱، ام ۲ و ام ۳ مربوط به انتهای آزمون فشار هستند که آزمون پس از شکست نرم ادامه یافته است. به همین خاطر تصاویر آزمون فشار مقداری کماتش محلی مشاهده می شود که البته این قسمت از نمودار حذف شده است. تفاوت بین آزمون و شبیه سازی ممکن است به موارد مختلفی مرتبط است. جابه جایی فک دستگاه با ناحیه طول سنج نمونه ها متفاوت است و به همین دلیل، ممکن است باعث اختلاف نتایج شود. مورد دیگر، نادیده گرفتن برخی جزئیات نمونه در مدل اجزای محدود است که کارایی محاسباتی و دشواری همگرایی را افزایش می دهد و ممکن باعث تفاوت نتایج شود. برخی از عیوب فنی، مانند ابعاد هندسی و آسیب های در هنگام ساخت، اجتناب ناپذیر هستند که باعث تفاوت نتایج آن با نتایج حاصل از شبیه سازی می شود.

در شکل های بخش ۳، تصاویر تغییر شکل یافته برای نمونه های مختلف پس از انجام آزمون و شبیه سازی نشان داده شده اند. برای تمامی نمونه ها، شکل روش تجربی و شبیه سازی یکسان است. در آزمون های کشش، کم شدن سطح مقطع بیانگر شکست نرم است. همانند آزمون کشش، در آزمون فشار نیز بیشترین تغییر شکل در ناحیه مرکزی رخ داده است به خصوص در ناحیه ای که انحنا قرار گرفته است. با توجه به کانتورهای آسیب نمونه ها، در ناحیه انحنا آسیب شروع می شود و تغییر شکل در این ناحیه بیشتر از سایر نقاط است.

سابقه شکست نمونه ها با سه محوره تنش مختلف در شکل ۱۶ رسم شده اند. در تمامی نمونه ها، پس از چند نوسان اولیه در کرنش های ابتدایی، به مقدار پایدار رسیده اند. در جدول ۳ کرنش شکست به ازای سه محوره تنش و زاویه لودهای مختلف نشان داده شده است. در شکل ۱۸ نیز کانتورهای کانتور سه محوره تنش و زاویه لود بی بعد شده برای نمونه های ام ۱، ام ۲ و ام ۳ نشان داده شده است که با مقادیر جدول ۳ مطابقت دارد. همچنین، مقادیر کرنش در لحظه شکست برای بازه مشخصی از سه محوره های تنش، زاویه لود بی بعد شده و نوردای سوم در شکل ۱۷ رسم شده است. در شکل ۱۷-الف، سه محوره تنش منفی به صورت خط و سه محوره های مثبت به صورت نقطه نمایش داده شده است. در هر دو روش تجربی و اجزای محدود، تغییرات کرنش شکست یکسان است. برای سه محوره های تنش مثبت، با افزایش مقدار سه محوره تنش، کرنش شکست کاهش می یابد. کرنش شکست برای سه محوره تنش مثبت ۰/۳۳ (دمبلی) و ۰/۳۴۸ (ام ۱ کششی)، در روش تجربی ۰/۴۵ و ۰/۳۵ و در شبیه سازی برابر ۰/۴۴ و ۰/۲۹ هستند. در مورد سه محوره های تنش منفی، ابتدا مقدار کرنش شکست با کاهش سه محوره تنش ابتدا کم می شود و سپس افزایش می یابد. با کاهش سه محوره تنش از ۰/۳۴۸- تا ۰/۴۵۶-، کرنش شکست در روش تجربی ابتدا از ۰/۲۴ تا ۰/۲۰ و سپس با افزایش از ۰/۲۰ تا ۰/۲۴ مواجه شده است. در روش شبیه سازی نیز مقدار کرنش شکست از ۰/۲۱ تا ۰/۱۸ کاهش یافته و در نهایت از ۰/۱۸ تا ۰/۲۰ افزایش می یابد. در شکل ۱۷-ب و ج نیز کرنش شکست بر حسب زاویه لود بی بعد شده و نوردای سوم رسم شده است. در این شکل ها نیز ابتدا مقدار کرنش شکست کاهش یافته و در نهایت افزایش می یابد. وابستگی فولاد اس تی-۳۷ به سه محوره تنش و زاویه لود بی بعد شده در شکل ۱۷ قابل مشاهده است. بنابراین برای پیش بینی کرنش شکست، تنها بررسی سه محوره تنش کافی نیست و زاویه لود بی بعد شده باید در مدل های محاسباتی در نظر گرفته شود. کاهش و افزایش کرنش شکست با کاهش مقدار سه محوره تنش و زاویه لود نرمالیزه شده، می توان به دلیل نوع آسیب ایجاد شده در سه محوره تنش های مختلف است. به عنوان مثال با تغییر نمونه از دمبلی به ام ۱ کششی و افزایش مقدار سه محوره تنش، ریز حفره ها تمایل دارند که سریعتر افزایش یابند و کرنش شکست کاهش می یابد [۲۱]. وجود انحنا باعث تغییر وضعیت تنش می شود و بنابراین در هر نمونه یک نوع وضعیت تنش خاص مرتبط به هندسه خود را دارد. از آنجایی که شکست نرم به سه محوره تنش وابسته است، محل شکست در نقطه ای به وجود می آید که در آن سه محوره تنش بیشترین مقدار را دارد. به همین دلیل است که در شکل های آسیب حاصل از آزمون و شبیه سازی نمونه ها، محل شکست نرم مرکز نمونه به دست می آید.



شکل ۱۶ سابقه شکست نمونه‌ها با سه محوره تنش مختلف

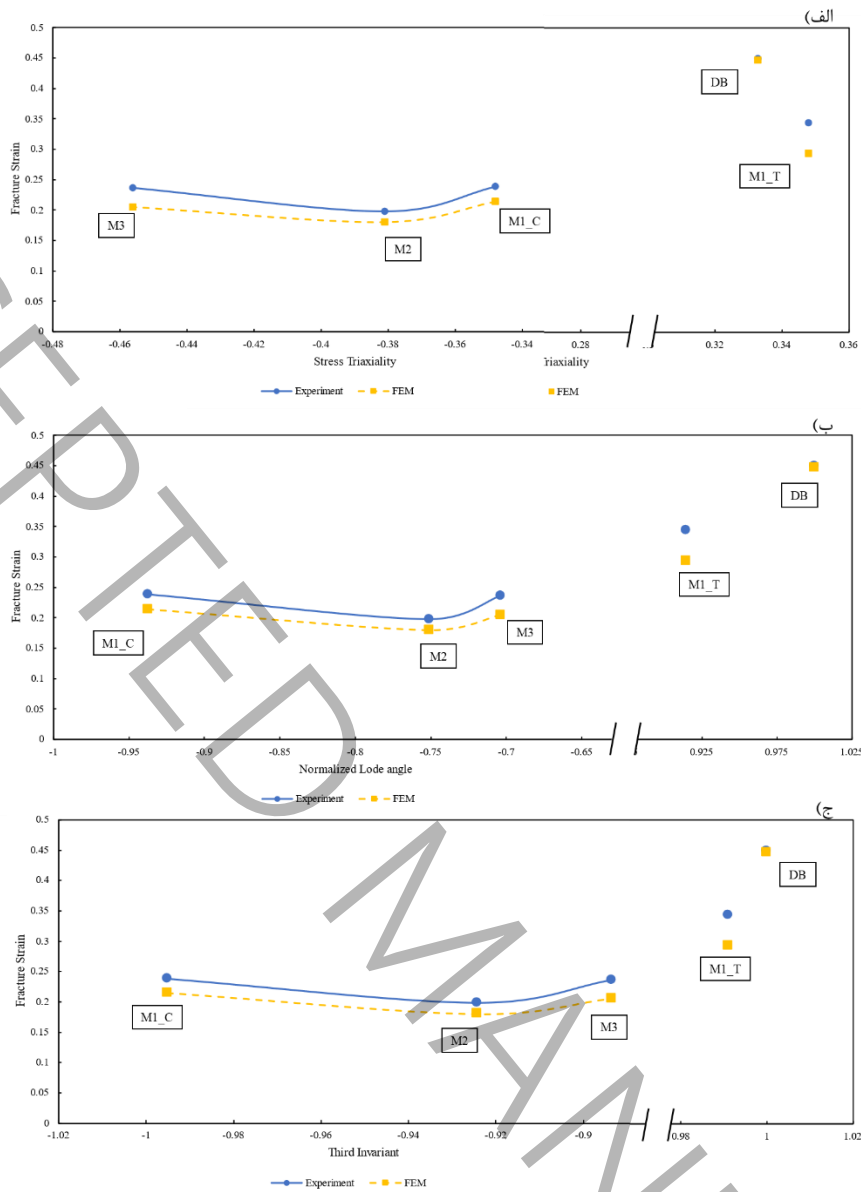
Figure 16 The fracture behavior of samples under different stress triaxialities

جدول ۳ مقادیر سه محوره تنش، زاویه لود بی‌بعدشده و کرنش شکست متناظر آن‌ها

Table 3 Values of the stress triaxiality, the normalized Lode angle, and their corresponding fracture strain

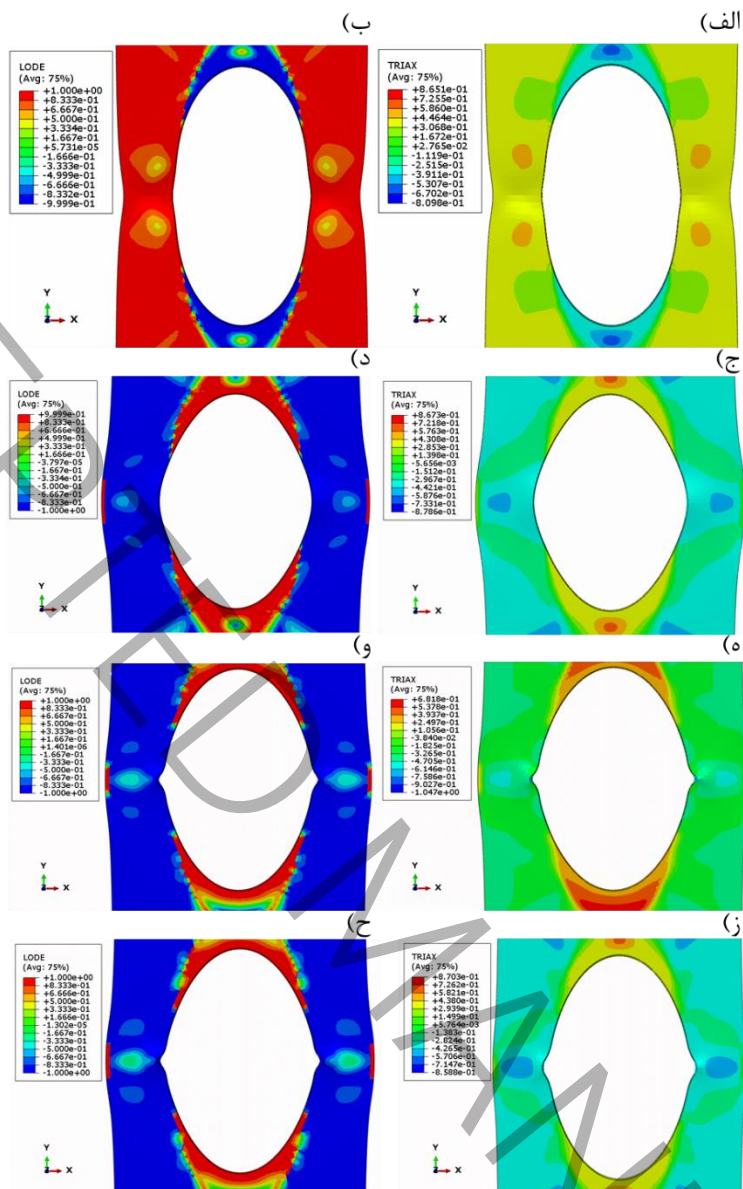
کرنش شکست	زاویه لود بی‌بعدشده	سه محوره تنش
۰/۲۴	-۰/۷۰	-۰/۴۵۶
۰/۲۰	-۰/۷۵	-۰/۳۸۱
۰/۲۴	-۰/۹۳	-۰/۳۴۸
۰/۴۶	۱	۰/۳۳۳
۰/۳۵	۰/۹۲	۰/۳۴۸

هندسه نمونه‌های طراحی شده به نوعی ایجاد شدند تا با استفاده از نمونه مسطح که تحت بارگذاری تک‌محوره، وضعیت تنش مختلف ایجاد می‌شود. این فرآیند بدون نیاز به دستگاه خاصی برای قابل انجام است و نیازی به چیدمان آزمون چندمحوره نیست. با بهره‌گیری از هندسه‌های طراحی شده، شکست نرم را می‌توان برای طیف وسیعی از سه محوره تنش کم و متوسط و حالات کرنش مطالعه کرد. شایان ذکر است که این تکنیک آزمایشی جدید ممکن است برای اعتبارسنجی مدل‌های مبتنی بر مکانیزم برای شکست نرم نیز مورد استفاده قرار گیرد. توسعه این فرآیند ترکیبی تجربی-عددی به دلیل نیاز صنعت به ابزارهای مهندسی برای پیش‌بینی شکستگی در فلزات حائز اهمیت است. به‌همین دلیل، تحقیق برای توسعه معیارهای شروع پیش‌بینی کرنش شکست در بازه وسیع‌تر سه محوره تنش به خصوص در بخش منفی، در حال انجام است.



شکل ۱۷ نمودار کرنش در لحظه شکست بر حسب الف) سه محوره تنش منفی، ب) زاویه لود بی بعدشده و ج) ناوردای سوم با روش‌های تجربی و اجزای محدود

Figure 17 The fracture strain at failure as a function of a) negative stress triaxiality, b) normalized Lode angle, and c) the third invariant using both experimental and FEM



شکل ۱۸ الف) کانتور سه محوره تنش ام (کششی، ب) زاویه لود بی بعدشده ام (کششی، ج) کانتور سه محوره تنش ام (فشاری، د) زاویه لود بی بعدشده ام (فشاری، ه) کانتور سه محوره تنش ام (کششی، و) زاویه لود بی بعدشده ام (فشاری، ز) کانتور سه محوره تنش ام (کششی، ح) زاویه لود بی بعدشده ام (فشاری، ح)

Figure 18 the stress triaxiality and normalized Lode angle contours a) the stress triaxiality contour for M1 under tension, b) normalized Lode angle for M1 under tension, c) the stress triaxiality contour for M1 under compression, d) normalized Lode angle for M1 under compression, e) the stress triaxiality contour for M2, f) normalized Lode angle for M2, g) the stress triaxiality contour for M3, and h) normalized Lode angle for M3

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، آزمون های تجربی بر روی نمونه های مختلف با مقادیر سه محوره تنش مثبت و منفی صورت گرفت و رفتار شکست تحت سه محوره های تنش متفاوت بررسی شد. مدل هندسی نمونه ها، قطعاتی مستطیلی از جنس فولاد اس تی-۳۷ انتخاب شده و درون آن را حفره مستطیلی به همراه انحنا در میان آن ها ایجاد شد. با اعمال بار تک محوره، به دلیل وجود انحنا، وضعیت تنش چندمحوری درون نمونه ایجاد می شود. بدین صورت نیاز به انجام آزمون چندمحوری نیست و با استفاده از هندسه های طراحی شده، بازه مختلفی از سه محوره تنش مورد بررسی قرار گرفتند. تغییر شکل نمونه ها پس از اعمال بارگذاری در دو روش تجربی و شبیه سازی همانند هم بودند. همچنین، از روش همبستگی تصویری دیجیتال برای ثبت دقیق تر کرنش و

اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده شد. کانتور کرنش به‌دست‌آمده از روش همبستگی تصویری دیجیتال و شبیه‌سازی با هم مقایسه شدند که نتایج با هم تطابق داشتند.

با بررسی کانتور آسیب حاصل از شبیه‌سازی، مشخص شد که آسیب در ناحیه انحنای ایجاد می‌شود. همچنین مشاهده شد که مقدار کرنش شکست حاصل از دستگاه بیشتر از روش شبیه‌سازی بوده که ممکن است به علت عیب‌های ساخت و خطاهای آزمون است. مقادیر کرنش شکست به‌دست‌آمده از روش‌های تجربی و عددی برحسب تنش سه محوره رسم شد. رفتار فولاد اس‌تی-۳۷ در سه محوره تنش منفی، زاویه لود بی‌بعد شده و ناوردای سوم در روش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی به یک صورت هست، به‌طوری‌که ابتدا مقدار کرنش شکست کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در مطالعه‌های آینده، سعی می‌شود که مدل تحلیل ارائه شود تا اثر سه محوره تنش منفی بر روی کرنش شکست را به‌درستی پیش‌بینی کند.

مراجع

- [۱] Y. Zhu, M.D. Engelhardt, Z. Pan, Simulation of ductile fracture initiation in steels using a stress triaxiality–shear stress coupled model, *Acta Mechanica Sinica*, 35 (2019) 600-614.
- [۲] L. Kang, H. Ge, X. Fang, An improved ductile fracture model for structural steels considering effect of high stress triaxiality, *Construction and Building Materials*, 115 (2016) 634-650.
- [۳] Z. Peng, H. Zhao, X. Li, New ductile fracture model for fracture prediction ranging from negative to high stress triaxiality, *International Journal of Plasticity*, 145 (2021) 103057.
- [۴] A.L. Gurson, Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media, *J. Eng. Mater. Technol.*, 99(1) (1977) 2-15.
- [۵] M. Homayounfard, M. Ganjani, A large deformation constitutive model for plastic strain-induced phase transformation of stainless steels at cryogenic temperatures, *International Journal of Plasticity*, 156 (2022) 103344.
- [۶] C. Chu, A. Needleman, Void nucleation effects in biaxially stretched sheets, *J. Eng. Mater. Technol.*, 102(3) (1980) 249-256.
- [۷] V. Tvergaard, Material failure by void growth to coalescence, *Advances in Applied Mechanics*, 27 (1989) 83-151.
- [۸] C. Wang, X.-g. Liu, J.-t. Gui, Z.-f. Xu, B.-f. Guo, Influence of inclusions on matrix deformation and fracture behavior based on Gurson–Tvergaard–Needleman damage model, *Materials Science and Engineering: A*, 756 (2019) 405-416.
- [۹] Y. Lou, J.W. Yoon, Anisotropic ductile fracture criterion based on linear transformation, *International Journal of Plasticity*, 93 (2017) 3-25.
- [۱۰] A.M. Freudenthal, *The inelastic behavior of engineering materials and structures*, Wiley, (1950).
- [۱۱] M. Cockcroft, Ductility and workability of metals, *J. of Metals*, 96 (1968) 2444.
- [۱۲] S. Oh, C. Chen, S. Kobayashi, Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing—part 2: workability in extrusion and drawing, *J. Eng. Ind. Feb*, 101(1) (1979) 36-44.
- [۱۳] P. Brozzo, B. Deluca, R. Rendina, A new method for the prediction of formability limits in metal sheets, in: *Proc. 7th biennial Conf. IDDR*, 1972.

[۱۴]M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima, Criteria for ductile fracture and their applications, *Journal of Mechanical Working Technology*, 4(1) (1980) 65-81.

[۱۵]M. Ganjani, A damage model for predicting ductile fracture with considering the dependency on stress triaxiality and Lode angle, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 84 (2020) 104048.

[۱۶]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.

[۱۷]M.A. Wollenweber, S. Medghalchi, L.R. Guimarães, N. Lohrey, C.F. Kusche, U. Kerzel, T. Al-Samman, S. Korte-Kerzel, On the damage behaviour in dual-phase DP800 steel deformed in single and combined strain paths, *Materials & Design*, 231 (2023) 112016.

[۱۸]S. Xu, L. Qian, C. Sun, F. Liu, C. Wang, Z. Sun, Y. Zhou, Investigation into the fracture behavior of ZK60 Mg alloy rolling sheet under different stress triaxiality, *Journal of Materials Research and Technology*, 27 (2023) 7368-7379.

[۱۹]J. Park, S. Kweon, K. Park, Gurson-Cohesive modeling (GCM) for 3D ductile fracture simulation, *International Journal of Plasticity*, 175 (2024) 103914.

[۲۰]Y. Bai, T. Wierzbicki, Application of extended Mohr–Coulomb criterion to ductile fracture, *International journal of fracture*, 161(1) (2010) 1-20.

[۲۱]R. Kiran, K. Khandelwal, A triaxiality and Lode parameter dependent ductile fracture criterion, *Engineering Fracture Mechanics*, 128 (2014) 121-138.

The effect of negative stress triaxiality and lode angle on ductile fracture of ST-37

Mohsen Mansouri^a, Seyed Mehdi Ganjiani^{a1}

^a Department of Mechanical Engineering, University of Tehran

ABSTRACT

In this article, the effect of negative stress triaxiality on the fracture strain has been studied. First, the geometric model was obtained for samples with three negative stress triaxialities. To obtain negative stress triaxialities in the uniaxial compression test, the geometry of samples was designed somehow that prevents multiaxial tests. Samples were manufactured from ST-37 steel. Then tensile and compression tests were performed on them in order to obtain the fracture strain. Tensile and compression tests were simulated by Abaqus software. The digital image correlation method was used to obtain the strain values and validate the simulation results. The shape and damage mode of different samples were compared after the test and simulation in which the mode of fracture was the same in both methods. The strain contours of the finite element method and digital image correlation were compared and it was observed that the strain values of both methods match each other. The fracture strains were depicted in terms of stress triaxialities, the normalized Lode angle, and the third invariant. In both experimental and numerical methods, by decreasing the amount of negative stress triaxiality, the amount of fracture strain first decreases and then increases.

KEYWORDS

Stress triaxiality, fracture strain, digital image correlation, lode angle, mechanical test.

¹ Corresponding Author: Email: ganjiani@ut.ac.ir