

تعیین نمودار تنش حد شکل دهی آلیاژ آلومینیوم  
۵۰۸۳ به وسیله‌ی نمونه‌ی صلیبی

Original Article

فرهاد فرهادزاده\* (دانشجوی دکترا)

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مهدی سلهانی تهرانی (استادیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهدی تاجداری (استاد)

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

در این تحقیق برای آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، تحت کشش‌های تک‌محوره و دومحوره، به صورت‌های تجربی و عددی، نمودار تنش حد شکل‌دهی استخراج شده است. برای این هدف نمونه‌ی صلیبی لیبونل و نیز یک سازواره وابسته‌ی کشش دومحوره ساخته شده است. با استفاده از این سازواره و نیز دستگاه کشش - فشار تک‌محوره‌ی اینسترون - ۱۳۴۳، آزمون دومحوره - مساوی درمای محیط و نرخ کرنش متوسط  $0.003$  بر ثانیه انجام شده است. موقعیت آشکار شدن آسیب، شکل توسعه یافته‌ی آن، و نمودارهای نیروهای شکست روی بازوهای نمونه در بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی مورد توجه بوده است. برای شبیه‌سازی رفتار شکست روش اجزای محدود به کار گرفته شده است. نمونه‌ی صلیبی تحت بارگذاری با نسبت‌های مختلف قرار گرفته و به صورت عددی نتایج شکست استخراج شده است. همبستگی بسیار خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی دیده شد. در نهایت تحت نسبت بارهای مختلف، نقاط دومحوره‌ی کششی در صفحه‌ی تنش برای آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ استخراج شد. نموداری که از این نقاط می‌گذرد مؤید مکان هندسی شکست ماده است و به آن نمودار تنش حد شکل‌دهی گفته می‌شود.

واژگان کلیدی: شکست، نمونه‌ی صلیبی، آلیاژ آلومینیوم ۳۲۱ - ۵۰۸۳، بارگذاری دومحوره، نمودار تنش حد شکل‌دهی.

## ۱. مقدمه

تک‌محوره قرار گیرند. اکثر قطعات موجود در سیستم‌های مکانیکی، تنش‌های دو و یا چندمحوره را تجربه می‌کنند که اطلاعات حاصل از آزمایش‌های تک‌محوره برای بیان رفتار آن‌ها مناسب نیست. برای مثال بعضی از قطعات هواپیمائی، نیروگاهی، هسته‌بی، دریایی و صنعتی تحت تنش‌های چندمحوره قرار دارند، و اگر این قطعات در معرض دمای بالا قرار گیرند نمی‌توان رفتار آنها را با استفاده از اطلاعات مربوط به آزمایش‌های تک‌محوره بیان کرد.<sup>[۱]</sup> کرنش شکست که از آزمایش کشش تک‌محوره استخراج می‌شود، بسیار کم‌تر از کرنش شکست در کشش‌های چندمحوره است. بنابراین اگر از اطلاعات کشش تک‌محوره در شکل‌دهی ورق‌ها استفاده شود، پیش‌گویی رفتار شکل‌پذیری ورق بسیار ضعیف خواهد بود.<sup>[۲]</sup> برای نزدیک‌تر شدن شرایط آزمایش به شرایط کارکرد قطعات در حالت‌های واقعی، آزمایش دومحوره مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این آزمایش نمودار تنش - کرنش در جهت‌های مختلف قابل استخراج است.<sup>[۳]</sup> آزمایش کشش دومحوره با استفاده از نمونه‌ی صلیبی شکل، یک آزمایش مناسب برای درک رفتار ماده تحت تنش‌های دومحوره در حالت‌های مختلف است. برای ایجاد حالت‌های مختلف تنش از اعمال تغییر مکان یا نیروهای متفاوت در

بدون دانش کافی از فرایند و خواص مواد، پیشگیری از عیوب و بهینه‌سازی فرایندها بسیار مشکل می‌شود. در ورق‌های فلزی دوگانه ناهمسانگردی وجود دارد. یکی ناهمسانگردی صفحه‌بی که تغییرات خواص مکانیکی را در صفحه‌ی ورق نشان می‌دهد، و دیگری ناهمسانگردی عمودی که درمورد مقاومت فلز در ضخامت ورق نسبت به مقاومت آن در صفحه‌ی ورق بحث می‌کند.<sup>[۱]</sup> در فرایند کشش عمیق، ماده تحت تنش‌های چندمحوره قرار می‌گیرد. برای این‌که بتوان فرایند موفقیت داشت و کیفیت قطعه‌ی تولیدی را افزایش داد، باید از حد شکل‌پذیری ماده اطلاع حاصل کرد. برای این منظور از آزمایش کشش دومحوره استفاده می‌شود. اطلاعاتی که از آزمایش کشش تک‌محوره استخراج می‌شود شامل مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی و میزان تغییر شکل ماده است. در حالت ایده‌آل این خواص و اطلاعات به دست آمده از کشش تک‌محوره برای مواقعی است که قطعات در حال فعالیت، تحت تنش‌های

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۷/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۰/۱۱، پذیرش ۱۳۹۶/۱۲/۱۳

DOI:10.24200/J40.2018.10818.1444

بوهلر و همکاران - نسبت به دیگر دستگاه‌ها امتیازاتی دارند؛ زیرا در این دستگاه‌ها مطالعه‌ی میدان کرنش در نمونه‌ی صلیبی و اعمال حرارت آسان‌تر است. در مجموع، دستگاه‌های کشش دوماحوره‌ی مستقل تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. قیمت تمام شده‌ی ساخت این دستگاه‌ها بسیار بالاست و همین موضوع محققین را بر آن داشت تا دستگاه کشش دوماحوره‌ی وابسته را طراحی کنند. در این دستگاه‌ها حرکت و نیرو در یک راستا، به حرکت و نیرو در راستای دیگر مرتبط می‌شود. برای ایجاد مسیرهای کرنش متفاوت در نمونه‌ی صلیبی، هنگام ارتباط نیرو و تغییر مکان در یک راستا به راستای دیگر با تغییر طول عضوهای میله‌ی ارتباطی تبدیل‌هایی صورت می‌پذیرد تا حرکت در یک محور ضریبی از حرکت محور دیگر باشد. بنابراین حرکت در یک راستا از این دستگاه‌ها به دستگاه کشش - فشار متصل شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. این موضوع باعث کاهش هزینه‌ی تمام شده‌ی ساخت این دستگاه‌ها می‌شود، اما تعداد مسیرهای کرنش ایجاد شده را محدود می‌سازد. فرون و مکیند، در سال ۲۰۰۸ طرحی با هشت عضو میله‌ی ارائه کردند.<sup>[۲]</sup> فرانهافر در سال ۲۰۰۵، بریو و همکاران در ۲۰۰۶، وزر و مجور در ۲۰۰۴ فدی و همکاران در ۲۰۰۷، و کواک و همکاران در ۲۰۰۸، دستگاه‌های کشش دوماحوره‌ی وابسته‌ی مختلفی را طراحی کردند.<sup>[۳-۱۱، ۱۳]</sup>

در پژوهش حاضر به دلیل کاهش هزینه‌های ساخت و آزمون‌های بارگذاری دوماحوره با استفاده از نمونه‌های صلیبی لیونل، سازواری کشش دوماحوره‌ی وابسته‌ی طراحی و ساخته شده است. این دستگاه نسبت به دستگاه‌های طراحی شده تاکنون اندکی تفاوت دارد و با استفاده از دستگاه کشش - فشار تک‌محوره، ساخت شرکت اینسترون<sup>۴</sup> به کار گرفته می‌شود. در خصوص آزمون‌های تک‌محوره از دستگاه کشش تک‌محوره‌ی سنتام<sup>۵</sup> استفاده شده و نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM در سه جهت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد ساخته شده و تحت شرایط دوماحوره از لحاظ نرخ کرنش و دما آزمون شده است. پس از انجام آزمون‌های تک‌محوره و دوماحوره به وسیله‌ی روش اجزای محدود و با نرم‌افزار آباکوس<sup>۶</sup> شبیه‌سازی‌های مربوطه انجام شده و صحت شبیه‌سازی‌های با نتایج تجربی مقایسه شده است. در نهایت با اعمال نسبت بارهای مختلف روی بازوهای مدل صلیبی، در نرم‌افزار اجزای محدود، تنش‌های دوماحوره در نقاط شکست، در محل مقطع آزمون نمونه، و لحظه‌ی قبل از بروز شکست محاسبه شده است. با استفاده از این مقادیر محاسباتی در ربع اول صفحه‌ی تنش، مکان هندسی شکست ماده به دست آمده است. نقاط به دست آمده برای تطبیق معیارهای مختلف شکست آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ بسیار کاربردی‌اند.

## ۲. نمونه‌ی صلیبی

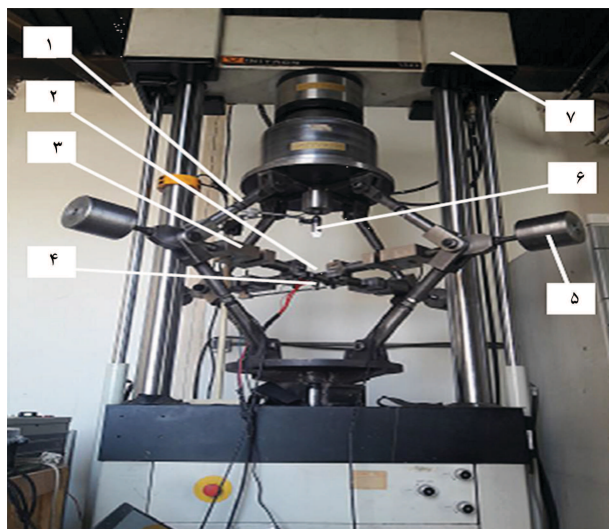
یکی از بحث برانگیزترین قسمت‌ها در آزمایش کشش دوماحوره، طراحی هندسه نمونه‌ی صلیبی است. این نمونه می‌تواند از یک استوانه‌ی ساده یا یک دیسک که در روی آن‌ها فشار هیدرواستاتیک اعمال می‌شود، تا نمونه‌های صلیبی شکل با طراحی‌های مختلف در محل تقاطع دوماحوره تشکیل شده باشد. نمونه‌های صلیبی مورد استفاده توسط محققین ابعاد و اشکال متفاوتی دارند. هدف اصلی محققین، ایجاد تنش دوماحوره‌ی خالص درون ناحیه‌ی مؤثر کشش است. یکی از نکات مهم آن است که درون ناحیه مؤثر کشش، گرادیان تنش برشی کم‌ترین مقدار باشد تا حالت تنش دوماحوره‌ی خالص ایجاد شود. بوهلر نشان داد در صورتی که گرادیان تنش‌های برشی به وجود آیند، هر چند اندک باشند، محورهای تنش اصلی قابل شناسایی نبوده

دو انتهای نمونه‌ی صلیبی شکل استفاده می‌شود.<sup>[۲]</sup> علاوه بر این، آزمایش کشش تک‌محوره برای مواد همسانگرد معتبر است. در حالی که بر اثر انجام عملیات نورد روی یک ورق نازک، آثار ناهمسانگردی در خواص کششی آن به وجود می‌آید.<sup>[۴]</sup> مواد ناهمسانگرد زمانی که تحت آزمایش کشش دوماحوره قرار می‌گیرند، به علت وجود ناهمسانگردی در جهت‌های ضعیف‌تر دچار واما ندگی می‌شوند.<sup>[۵]</sup>

از جمله آزمایش‌هایی که برای ایجاد حالت تنش دوماحوره معرفی شده، می‌توان به آزمایش‌های هیدرواستاتیک، سمبه و ماتریس و مارسینیاک اشاره کرد.<sup>[۵-۷]</sup> پیش از این در آزمایش‌ها، بارگذاری به صورت خارج از صفحه صورت می‌پذیرفت، به همین دلیل در ورق خمش ایجاد می‌شد و تعیین خواص ورق را دچار خطا می‌کرد. به همین منظور پژوهشگران تمرکز خود را بر آزمایش‌هایی گذاشتند که در آنها بتوان نمونه را به صورت درون صفحه‌ی بارگذاری کرد و اثرات خمش را از بین برد.

در پژوهش حاضر آزمایشی که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته، استفاده از نمونه‌های صلیبی است.<sup>[۸-۱۰]</sup> این نمونه‌های صلیبی، ترکیبی از آزمایش کشش تک‌محوره در دو راستای عمود بر هم است. برخلاف نمونه‌ی کشش تک‌محوره که تعیین ابعاد آن دارای استاندارد ASTM<sup>۱</sup> است، نمونه‌ی کشش صلیبی برای آزمایش کشش دوماحوره در حالت شکست استاندارد خاصی ندارد.<sup>[۲]</sup> ولی برای حالت تسلیم می‌توان از استاندارد ایزو ۱۶۸۴۲<sup>۲</sup> استفاده کرد. بنابراین از شبیه‌سازی اجزای محدود برای تعیین بهینه‌ی ابعاد نمونه با توجه به نوع دستگاه کشش، ضخامت ورق، جنس ورق و غیره باید بهره برد. دمرله و بوهلر، برای یک ورق با دو ضخامت ۷ و ۱۳ میلی‌متر ابعاد این نمونه را بهینه کردند.<sup>[۸]</sup> فدی و همکاران، نیز ابعاد بهینه‌ی برای نمونه‌ی صلیبی ارائه دادند که نسبت به ابعاد ارائه شده توسط دمرله و بوهلر، از عمومیت بیشتری برخوردار است.<sup>[۱۱]</sup> موضوعی که در مواد ناهمسانگرد باید مورد توجه قرار گیرد، عدم تطابق محورهای کرنش اعمالی با محورهای کرنش اصلی است. این موضوع باعث می‌شود، گرادیان تنش برشی در نمونه ایجاد شود. برای غلبه بر این مشکل محققین از بارگذاری‌هایی با عنوان «خارج از محور» برای تنش‌های تک‌محوره استفاده کرده‌اند. دمرله و بوهلر اشاره کردند که نمونه‌ی بهینه شده برای مواد همسانگرد و بارگذاری نمونه در حالتی که بازوهای نمونه به صورت کاملاً صلب به دستگاه کشش متصل شده باشد، نتایج معقولی برای مواد ناهمسانگرد می‌توان ایجاد کرد.<sup>[۸]</sup> لیونل و همکاران، ابعاد مشخص دیگری برای نمونه‌ی صلیبی ارائه دادند.<sup>[۷]</sup> آنها نیز از این نمونه برای آزمایش مواد همسانگرد و ناهمسانگرد استفاده کردند و اشاره کردند که این ابعاد می‌تواند تمام مسیرهای کرنش را ایجاد کند و تنش بیشینه نیز در همان وسط نمونه باقی بماند بدون این که بازوها دچار پارگی شوند. در این تحقیق از نمونه‌ی لیونل برای بررسی شکست آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳<sup>۳</sup> استفاده شده است.

برای انجام آزمایش‌های دوماحوره، پژوهشگران دستگاه‌های مختلفی طراحی کرده‌اند که آنها را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: ۱. دستگاه‌های کشش دوماحوره‌ی مستقل؛ ۲. دستگاه‌های کشش دوماحوره‌ی وابسته (دارای عضوهای میله‌ی ارتباطی). در دستگاه‌های کشش دوماحوره‌ی مستقل، نیرو و تغییر مکان به طور مستقل به بازوها، در راستای دو محور عمود بر هم اعمال می‌شود. مکیند و همکاران در سال ۱۹۹۲ دستگاهی بدین منظور ابداع کردند.<sup>[۲]</sup> از دیگر دستگاه‌ها می‌توان به دستگاه‌های ابداع شده توسط بوهلر و همکاران<sup>[۸]</sup> و کوبارا و همکاران<sup>[۱۲]</sup> اشاره کرد. مسئله‌ی مهم در طراحی این دستگاه‌ها نحوه‌ی اعمال نیروی هر یک از بازوها به نمونه‌ی صلیبی است. پژوهشگران سعی کردند تا در طراحی‌های خود از اعمال نیروی خمشی به نمونه‌ی صلیبی ناشی از بازوها جلوگیری کنند. یکی از تفاوت‌های بارز این طراحی‌ها، چگونگی استقرار نمونه‌ی صلیبی در دستگاه است. دستگاه‌هایی که نمونه را به صورت عمودی تحت بارگذاری قرار می‌دهند - مانند دستگاه طراحی شده توسط



۱) سازواره و اعضاء میله بی (۲) نمونه صلیبی (۳) نیروسنج الکتریکی (۴) گرمکن (۵) وزنه تعادلی (۶) میکروسکوپ دینولایت (۷) دستگاه کشش- فشار اینسترون

شکل ۲. سازواره کشش دوماحوری وابسته، نصب شده روی دستگاه آزمون کشش - فشار تک محوره ای اینسترون - ۱۳۴۳.

سازواره کشش دوماحوری وابسته مطابق شکل ۲ طراحی و ساخته شده است. در این چیدمان آزمون از اجزاء زیر استفاده شده است:

- دستگاه کشش - فشار اینسترون - ۱۳۴۳ با ظرفیت بارگذاری ۵۰ تن و حداقل سرعت فک تا ۰/۵ میلی متر بر دقیقه؛
- نمونه صلیبی مطابق با مدل لیونل؛
- نیروسنج های S شکل ساخت شرکت زمیک،<sup>۱۱</sup> مستقر بر روی بازوهای عمود بر هم سازواره؛
- دوربین یا میکروسکوپ دینولایت؛<sup>۱۲</sup>
- گرمکن الکتریکی با توانایی تولید دما تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد؛
- دماسنج لیزری برای اندازه گیری دمای نمونه به هنگام گرم کردن آن.

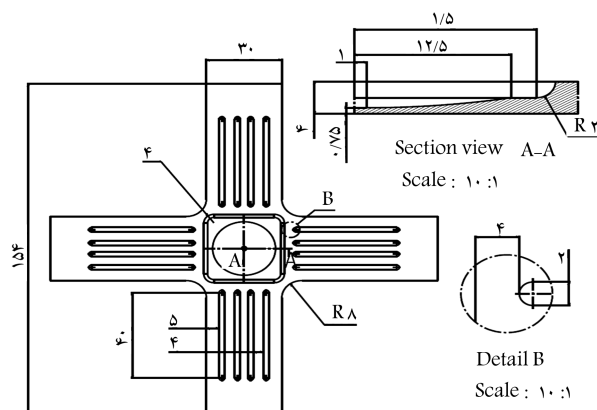
در شکل ۲ اجزاء مذکور نشان داده شده است. نحوه قرار گرفتن نمونه صلیبی در سازواره کشش دوماحوری به گونه ای است که ناحیه فرورفته در مدل به سمت پائین و مقابل گرمکن قرار می گیرد و سطح دیگر که صاف است و شبکه بندی شده، رو به بالاست تا دوربین مقابل آن قرار گیرد و بتوان به راحتی از کرنش و تغییر کرنش آن تصویر برداری و فیلم برداری کرد.

جهت تنظیم نیروسنج های مورد استفاده در سازواره کشش دوماحوری، قبل از نصب آنها روی سازواره مربوطه، با بارگذاری روی آنها در دستگاه کشش و فشار، تنظیم انجام شد. در نیروهای کم تر دقت نیروسنج ها بیشتر بود. بر اساس این بارگذاری، نرم افزار و کدهای مربوط به نیروسنج ها تنظیم شدند.

#### ۴. نتایج آزمون های تجربی

##### ۱.۴. نتایج آزمون های تک محوره

برای در نظر گرفتن ناهمسانگردی ورق نیاز به انجام آزمون های تک محوره در راستاهای صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد است. راستای صفر درجه، راستای



شکل ۱. نقشه نمونه صلیبی لیونل برای بررسی رفتار شکست ماده. [۷-۱۶]

و استخراج معادله ماده از نتایج آزمایش نامعتبر خواهد بود.<sup>[۸]</sup> محققان به دنبال این موضوع بوده اند که این حالت تنش دوماحوری در وسط نمونه ایجاد شود، بدون این که در نواحی دیگر نمونه صلیبی تنشی بیشتر از مقدار موجود در وسط نمونه ایجاد شود. این موضوع به این دلیل است که ظرفیت شکل پذیری نمونه و کرنش شکست، در حالت تنش تک محوره بسیار کم تر از حالت تنش دوماحوری باشد. بنابراین سعی بر آن است تا از پارگی بازوهای نمونه صلیبی قبل از پارگی ناحیه مؤثر کشش در وسط نمونه جلوگیری به عمل آید.<sup>[۱۰]</sup>

در شکل ۱ نقشه نمونه صلیبی لیونل، که برای رفتار شکست ماده طراحی شده، نشان داده شده است. یکی از ویژگی های این نمونه آن است که برای آزمون های کشش دوماحوره بهینه شده است. ساختار این نمونه به گونه ای است که گرادیان تنش به سمت مرکز نمونه یعنی مرکز مقطع آزمون بوده و شکست در ناحیه مقطع آزمون با هر نسبت بارگذاری رخ می دهد. در صورتی که بررسی تسلیم ماده در کشش دوماحوره مورد نظر باشد باید از نمونه دنگ یا کوابارا استفاده کرد.<sup>[۱۵]</sup> ساختار نمونه صلیبی برای حالت تسلیم با مدل لیونل کاملاً متفاوت است. نمونه لیونل از ورق آلایژ آلومینیوم ۵۰۸۳ با ضخامت ۴ میلی متر، ابتدا با جت آب برش خورده و سپس با استفاده از روش فرزکاری ناحیه مقطع آزمون آن ماشین کاری شده است و پس از آن با استفاده از وایرکات شیارهای بازوها ایجاد شده اند. در انتها عملیات ایجاد شبکه روی سطح صاف نمونه به روش شبکه بندی الکتروشیمیایی<sup>۷</sup> اجرا شده است. شبکه بندی با دایره هایی به قطر ۵ میلی متر انجام شده است.

برای اندازه گیری ناهمسانگردی در ورق فلزی، آزمون های تک محوره در راستاهای صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد ورق انجام شده است. نمونه های تک محوره مورد نیاز بر اساس استاندارد ASTM ساخته شده است. ورق این نمونه ها نیز ابتدا با استفاده از جت آب<sup>۸</sup> و سپس با استفاده از روش الکتروشیمیایی<sup>۹</sup> برش خورده است.

#### ۳. چیدمان آزمایشگاهی

برای انجام آزمون های کشش تک محوره از دستگاه آزمون کشش ستام - ۲۵ استفاده شده است. قبل از انجام آزمون ها این دستگاه توسط تنظیم کننده<sup>۱۰</sup> مخصوص تنظیم می شود.

برای انجام آزمون های دوماحوره با استفاده از نمونه صلیبی لیونل و با امکان دسترسی به دستگاه آزمون کشش - فشار تک محوره ای شرکت اینسترون یک

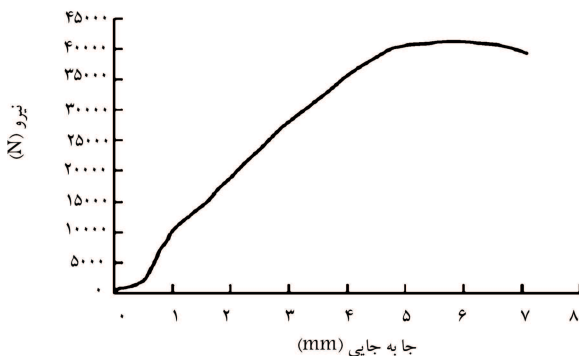
### ۲.۴. نتایج آزمون‌های دومحوره

با توجه به چیدمان شکل ۲ آزمون‌های دومحوره در حالت دومحوره‌ی مساوی انجام شده است. بدین معنی که طول عضوهای میله‌ی سازواره هم اندازه بوده و به بازوهای نمونه‌ی صلیبی جابه‌جایی‌های یکسان وارد شده‌اند. آزمون تجربی انجام شده در دمای محیط بوده و سرعت فک دستگاه نیز روی ۱ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شده است. علاوه بر این که در این آزمون، نمودار بار بر حسب جابه‌جایی دستگاه آزمون کشش - فشار اینسترون اندازه‌گیری شده است، توسط نیروسنج‌های الکتریکی مستقر در سازواره کشش دومحوره، نیز نیروهای ایجاد شده در بازوهای نمونه‌ی صلیبی اندازه‌گیری شده است. نمودارهای مربوط به این نیروها به صورت شکل ۵ است. در صورتی که مقادیر بیشینه‌ی نیروها از نمودارهای الف و ب شکل ۵ در نظر گرفته شود، اختلاف نسبی برای این دو حدود ۹/۲ درصد است. این میزان خطا را می‌توان به اصطکاک بین مفاصل سازواره دومحوره، انحراف‌های احتمالی، تغییر زاویه‌ی عضوهای میله‌ی و غیره نسبت داد. بیشترین اختلاف نسبی بین دو نمودار شکل ب ۵ حدود ۱۴/۹ درصد است و در ناحیه‌ی نزدیک به قله، این دو نمودار بر هم منطبق‌اند.

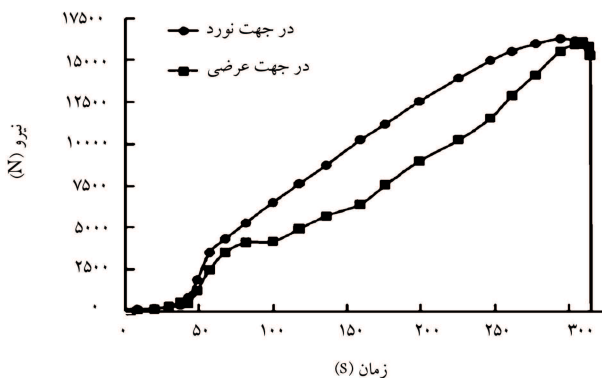
شکل ۶ استقرار نمونه‌ی صلیبی، تحت جابه‌جایی دومحوره‌ی مساوی، در سازواره دومحوره و شکستگی آن را نشان می‌دهد. از آن‌جا که نمونه‌ی صلیبی لیونل در راستای ضخامت تقارن ندارد، به‌هنگام بارگذاری به صورت جابه‌جایی، ناحیه‌ی مرکز مقطع آزمون، یعنی دایره‌ی ضخامت ثابت در مرکز مقطع آزمون با قطر دو میلی‌متر، به سمت محل تقاطع محورهای بارگذاری کشیده می‌شود. در ساختار این نمونه

نورد و راستای ۹۰ درجه راستای عرضی‌اند. لذا با توجه به استاندارد ASTM این آزمون‌ها به وسیله‌ی دستگاه سنتام - ۲۵۰ انجام گرفته و نتایج به صورت نمودارهای شکل ۳ ارائه شده است. در شکل ۳، یعنی نمودار کشش تک‌محوره‌ی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، یک ناپیوستگی سیلانی مشاهده شد. ناپیوستگی سیلانی در آلیاژهای آلومینیوم معمولاً همراه با پدیده‌های مرتبط با سازواره‌های پیر شدن دینامیک ۱۳ به وجود می‌آید.<sup>[۱۷]</sup> از آن‌جمله می‌توان به ایجاد باندهای تغییر شکل در سطح نمونه یا منفی شدن ضریب حساسیت به کرنش ماکروسکوپی اشاره کرد که از مشخصات اثر پورتوین - لوشاتولیه<sup>[۱۸]</sup> است. ایجاد هر یک از دندانه‌ها در نمودار تنش - کرنش، در اثر ایجاد یک باند تغییر شکل در طول نمونه است. در واقع، ناپیوستگی سیلانی در اثر از دست رفتن ناگهانی چقرمگی نمونه و ناصاف شدن سطح آن ایجاد می‌شود.<sup>[۱۷، ۱۸]</sup>

نمودارهای شکل ۳ برای کاربردهای عددی تغییر شکل‌های بزرگ، باید به نمودارهای تنش حقیقی - کرنش پلاستیک تبدیل شود. لذا شکل ۴ نمودارهای تنش حقیقی - کرنش پلاستیک را در سه جهت مذکور نشان می‌دهد. با استفاده از فرض ۰/۲ درصد خارج از مرکزی، تنش‌های تسلیم برای هر حالت از نمونه‌های کشش ساده به دست آمده است. بر این اساس مقادیر تنش‌های تسلیم برحسب مگاپاسکال به صورت  $\sigma_{RD} = 225$ ،  $\sigma_{\theta} = 220$ ، و  $\sigma_{TD} = 215$  است.

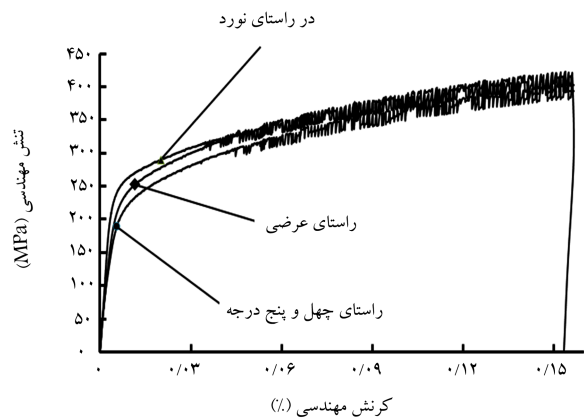


الف) نمودار نیرو - جابه‌جایی دستگاه کشش - فشار اینسترون؛

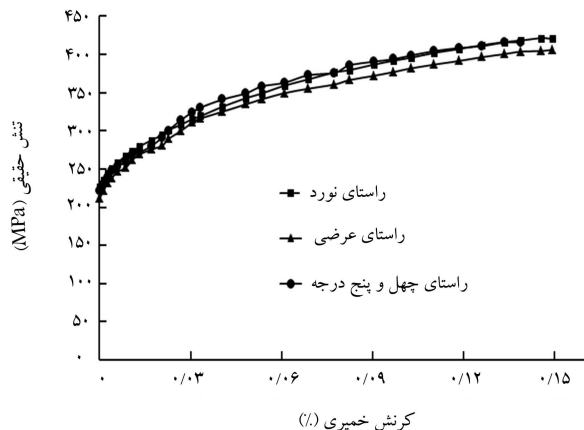


ب) نمودار نیرو-زمان نیرو سنج‌های الکتریکی سازواره کشش دو محوره وابسته.

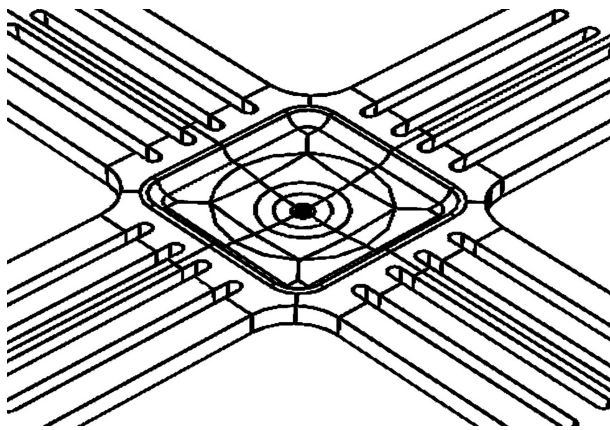
شکل ۵. نمودارهای بارگذاری روی نمونه‌ی صلیبی.



شکل ۳. نمودارهای تجربی تک‌محوره تنش مهندسی - کرنش مهندسی برای آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳.



شکل ۴. نمودارهای تجربی تک‌محوره تنش حقیقی - کرنش خمیری برای آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳.



شکل ۸. مدل قسمت بندی شده‌ی نمونه‌ی صلیبی در نرم‌افزار آباکوس.

جدول ۱. برخی خواص مکانیکی ورق با ضخامت ۴ میلی‌متر از آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ که از آزمون‌های کشش تک‌محوره به دست آمده است.

زاویه نسبت به راستای نورد			خواص
۰°	۴۵°	۹۰°	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲۶۷۰	۲۶۷۰	۲۶۷۰	
۰٫۳۳	۰٫۳۳	۰٫۳۳	نسبت پواسون
۶۸٫۵۶	۶۲٫۸۴	۶۸٫۵۶	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
۲۲۵	۲۲۰	۲۱۵	تنش تسلیم (مگاپاسکال)
۴۲۰٫۵	۴۱۵٫۸	۴۱۴	تنش کششی نهایی (مگاپاسکال)

آزمون‌های تجربی تکرار شده، و نتیجه برای همه‌ی آنها مشابه بوده است. توجه به این نکته اهمیت دارد که در شکل ۷ راستای افقی از دید ناظر، راستای نورد و راستای عمودی از دید ناظر، راستای عرضی است.

## ۵. تحلیل‌های عددی

برای تحلیل عددی تغییر شکل پلاستیک و شکست نمونه‌ی صلیبی به روش اجزای محدود، از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مدل‌سازی بر اساس نمونه‌ی صلیبی لیونل به صورت شکل ۸ انجام شده است. کل مدل ساخته شده در نرم‌افزار اجزای محدود، بدون شرایط تقارن محوری در نظر گرفته شده است. با توجه به این‌که در نمونه‌ی مورد نظر آسیب یا پارگی در یک نقطه، در محل مقطع آزمون نمونه‌ی صلیبی رخ می‌دهد از مدل‌سازی نمونه به صورت متقارن محوری پرهیز شده است. بارگذاری به صورت اعمال جابه‌جایی روی هر دو بازوی مقابل از نمونه‌ی صلیبی انجام شده است. در اینجا حالت کشش دوجوروی مساوی مد نظر است. برخی از خواص مکانیکی مربوط به آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ در جدول ۱ ارائه شده است.

در خصوص خواص ناهمسانگردی ماده‌ی به کار رفته می‌توان از روابط استاندارد بین المللی ASTM-E517<sup>۱۵</sup> استفاده کرد.<sup>[۲۰،۱۹]</sup> این روابط عبارت‌اند از:

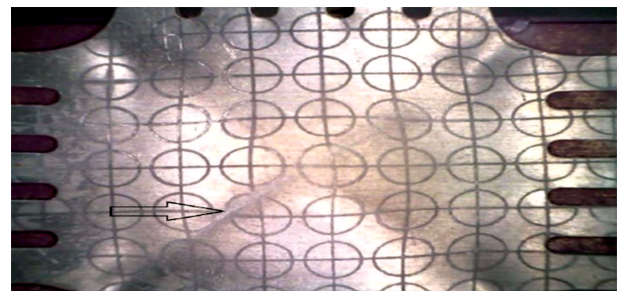
$$r_{(x)} = \frac{\varepsilon_w(x)}{\varepsilon_t(x)} \quad (1)$$

$$R = \frac{r_{90} + 2r_{45} + r_{0}}{4} \quad (2)$$

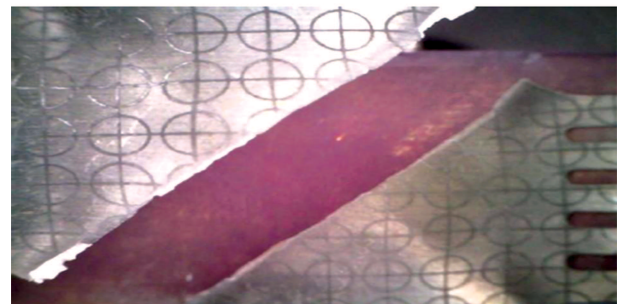
$$\Delta R = \frac{r_{90} + r_{0} - 2r_{45}}{4} \quad (3)$$



شکل ۶. شکست نمونه‌ی صلیبی از آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳.



الف) آغاز آسیب؛



ب) شکست کامل نمونه.

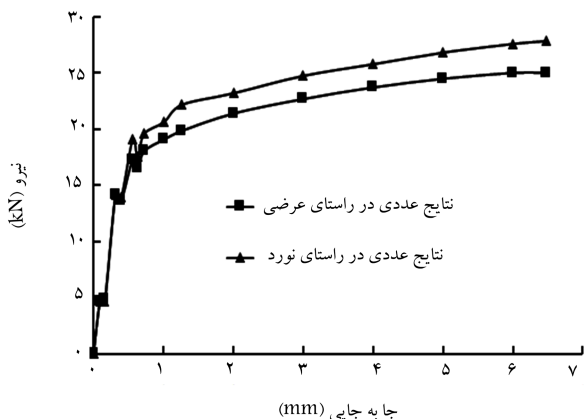
شکل ۷. تصویر آغاز و شکست نمونه صلیبی از آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ با استفاده از میکروسکوپ دینولایت.

شاید این موضوع یک نقص و محلی برای بروز خطا در نتایج تجربی و عددی باشد.

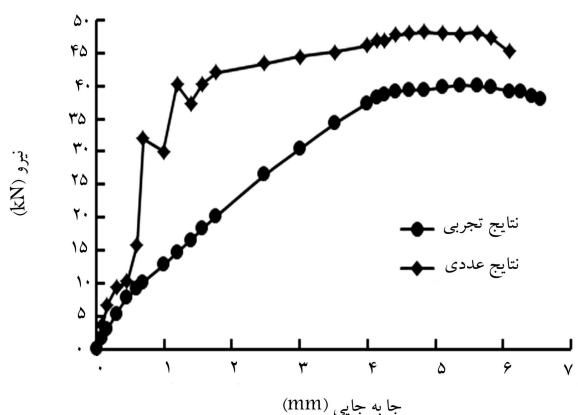
در شکل ۷ بروز آسیب و رشد آن نشان داده شده است. در شکل ۷ الف تغییر شکل پلاستیک به شکل X از گوشه‌های مقطع آزمون رخ داده است و مشاهده می‌شود که در نواحی نزدیک به بازوها روی محورهای تقارن نمونه‌ی صلیبی، تغییر شکل‌ها بسیار اندک است. از طرفی شکل ۷ الف آشکار شدن شکست در ناحیه مقطع آزمون را نشان می‌دهد. شکست از جایی آغاز می‌شود که مقطع آزمون دارای ضخامت متغیر است. با توجه به شکل ۱، در وسط مقطع آزمون نمونه‌ی صلیبی ناحیه‌ی به قطر ۲ میلی‌متر با ضخامت ثابت ۰٫۷۵ میلی‌متر وجود دارد. بعد از آن تا شعاع ۱۲٫۵ میلی‌متر به صورت دایره‌ی و با مقطع غیرخطی تا ۲ میلی‌متر تغییر می‌یابد. پیش‌بینی می‌شود که در آزمون‌های تجربی و در تحلیل‌های عددی اجزای محدود، شکست در این ناحیه و نه از مرکز مقطع آزمون که تغییر ضخامت دارد اتفاق افتد. در آزمون انجام شده این تصور به یقین تبدیل شده است. البته

جدول ۲. مقادیر محاسباتی بر مبنای نتایج تجربی برای ضرائب ناهمسانگرد در تحلیل عددی اجزای محدود.

مقادیر متغیرهای ناهمسانگرد	مقادیر متغیرهای ناهمسانگرد	مقادیر	مقادیر
$R_{11}$	۱	$R_{12}$	$0,9654$
$R_{22}$	$0,9218$	$R_{23}$	۱
$R_{33}$	$1,0726$	$R_{32}$	۱



شکل ۹. منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از تحلیل‌های عددی در راستاهای نورد و عرضی.



شکل ۱۰. مقایسه نیروهای تجربی و عددی در دستگاه اینسترون-۱۳۴۳.

در شکل ۱۰ نیز نشان داده شده است که در واقع نمودار محاسباتی دستگاه اینسترون است. این نمودار برآیند، باید با نمودار تجربی ماشین اینسترون که در شکل ۵ الف ارائه شده مقایسه شود.

شکل ۱۱ در واقع همان تصاویر شکل ۷ است با این تفاوت که از نتایج عددی حاصل شده است. توزیع معیار آسیب نرم در شکل‌های ۱۱ الف و ب، به ترتیب برای شرایط بروز آسیب و رشد آسیب نشان داده شده است.

در مقطع آزمون نمونه‌ی صلیبی گرادیان تنش به سمت مقطع آزمون بوده و نمونه در مقطع آزمون خود، در مسیر مرکز به سمت گوشه‌ها، نسبت به تنش حساسیت نشان می‌دهد. با افزایش بارگذاری این حساسیت افزایش یافته به گونه‌ی که بروز آسیب در مقطع آزمون شکل ۱۱ الف نشان داده شده است. با افزایش بارگذاری از نقطه‌ی آسیب دیده، شکست به سمت گوشه‌های نمونه اتفاق می‌افتد. توسعه یا گسترش شکست در شکل ۱۱ ب نشان داده شده است.

در شکل ۱۰ نیروهای به دست آمده از تحلیل شبه‌استاتیک اجزای محدود و نتایج تجربی شکل ۵ الف مقایسه شده است. با در نظر گرفتن طول و زوایای اعضای سازواره دوماحوره، اختلاف نسبی بین برآیند نیروهای دو سر نمونه و نیروی ماشین اینسترون در حالت تجربی ۹٫۲ درصد به دست می‌آید. اختلاف نسبی محاسبه شده بین نتایج تجربی و عددی بیشینه‌ی نیروی ماشین اینسترون ۱۳٫۳ درصد است.

در شکل ۹ منحنی نیرو بر حسب جابه‌جایی در راستاهای نورد و عرضی نشان داده شده است. برآیند این دو نیرو با توجه به نوع ارتباط اعضای سازواره کشش دوماحوره

که در آن  $r(x)$  نسبت به کرنش در راستای  $x$  است.  $\epsilon_t$  و  $\epsilon_w$  به ترتیب کرنش‌های عرضی و ضخامت نمونه،  $R$  ناهمسانگردی عمودی  $16$  و  $\Delta R$  ناهمسانگردی صفحه‌ی  $17$  را معرفی می‌کنند. هرچند مقدار  $r$  نسبت کرنش پهنا به ضخامت ورق نمونه را بیان می‌کند، ولی  $\epsilon_t$  به هنگام شکست نمونه‌ی تک‌محوره، به دلیل نازکی ورق قابل اندازه‌گیری نیست و لذا کرنش‌های طولی و عرضی اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از اصل بقا حجم در تغییرشکل خمیری، کرنش در راستای ضخامت به دست می‌آید:

$$\epsilon_l + \epsilon_w + \epsilon_t = 0;$$

$$\epsilon_t = -(\epsilon_l + \epsilon_w) \quad (4)$$

$\epsilon_l$  کرنش طولی یا کرنش در راستای نورد است. برای بیان ناهمسانگردی در نرم‌افزار آباکوس محاسبه‌ی ضرائب ناهمسانگردی به صورت دسته روابط ۵ ضرورت می‌یابد که طبق روابط ۴ محاسبه می‌شوند:

$$R_{11} = R_{12} = R_{22} = 1$$

$$R_{23} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0(r_{90} + 1)}}$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0 + r_{90}}}$$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3r_{90}(r_0 + 1)}{(2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90})}} \quad (5)$$

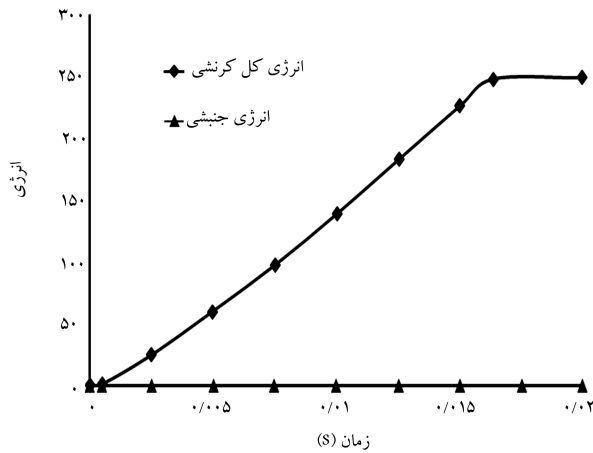
مقادیر محاسباتی ضرائب ناهمسانگردی بر اساس داده‌های تجربی کشش تک‌محوره برای تحلیل عددی به شرح جدول ۲ است.

نتایج آزمون‌های تجربی بسیاری از مواد نشان می‌دهد که نمودارهای تنش-کرنش خمیری در جهات عرضی و ضخامت تقریباً برهم منطبق‌اند [۲۱-۲۳] و حدود ۵ تا ۱۰ درصد کم‌تر از حالت نورد است. لذا در اینجا برای انجام محاسبات و قرانت داده‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود فرض شده که در راستای ضخامت همان شرایط عرضی حاکم باشد. رفتار ماده شامل بخش‌های کشسانی، خمیری به صورت جدولی، و ضرائب هیل برای در نظر گرفتن اثرات ناهمسانگردی در تسلیم و آسیب نرم است، که خود دو بخش شروع آسیب  $18$  و گسترش آسیب  $19$  را شامل می‌شود. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با در نظر گرفتن آسیب نرم در ادامه ارائه شده است.

## ۶. نتایج عددی

در شکل ۹ منحنی نیرو بر حسب جابه‌جایی در راستاهای نورد و عرضی نشان داده شده است. برآیند این دو نیرو با توجه به نوع ارتباط اعضای سازواره کشش دوماحوره





شکل ۱۲. نمودارهای انرژی جنبشی و انرژی کرنشی به دست آمده از تحلیل شبه استاتیکی اجزای محدود.

جدول ۳. مقادیر تنش در دو راستای نورد و عرضی در محل شکست و لحظه‌ی قبل از آن برحسب مگاپاسکال ( $\sigma_1$  تنش در راستای نورد و  $\sigma_2$  تنش در راستای عرضی).

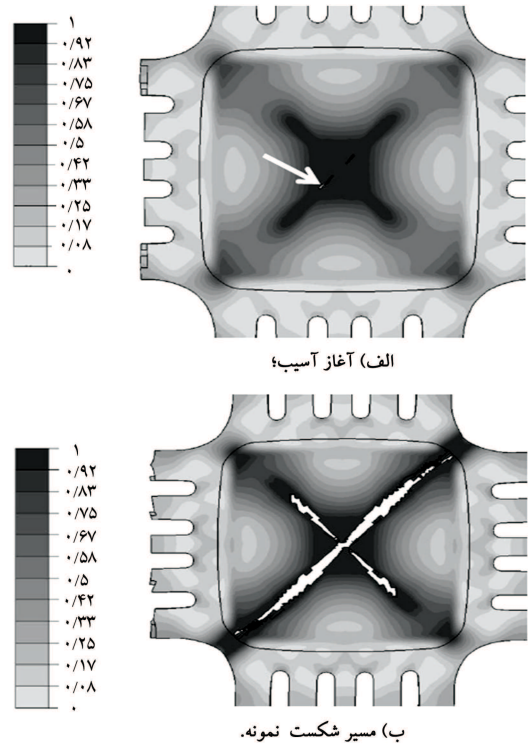
$\sigma_2$	$\sigma_1$	نسبت های بارگذری
۴۱۴	۰	۰:۱
۴۶۷٫۵	۴۰۲٫۵	۱:۴
۴۴۸	۴۴۸	۲:۴
۴۲۵	۴۷۰	۳:۴
۴۰۵	۴۷۷٫۵	۱:۱
۳۹۴	۴۹۷٫۵	۴:۳
۳۶۳	۵۱۵	۴:۲
۳۳۸	۵۲۵	۴:۱
۰	۴۲۰	۱:۰

بسیار مفید و کاربردی است. همچنین با استفاده از نمودار تنش - حد شکل‌دهی می‌توان صحت بسیاری از معیارهای رفتار شکست مواد مختلف را بررسی کرد یا معیار جدیدی برای مواد ارائه داد.

در شکل ۱۳ نتایج (توزیع آسیب) تحلیل‌های عددی برای نسبت بارهای ۱:۴، ۲:۴، ۳:۴، ۴:۳، ۴:۲، ۴:۱ و ۴:۰ نشان داده شده است. نسبت بار ۱:۱ در واقع کشش دومحوره‌ی مساوی است که در شکل ۱۱ نتایج آن ارائه شده است. شرایط بارگذاری به گونه‌ی بی‌اشتباه است که در تمامی حالات ارائه شده بار به صورت جابه‌جایی و روی هر دو بازو همزمان اعمال شده است.

در جدول ۳ مقادیر عددی تنش در دو راستای نورد و عرضی، با توجه به نسبت بارهای مختلف، لحظه‌ی قبل از بروز شکست درج شده است.

اطلاعات جدول ۳ در شکل ۱۴ به صورت تصویری نشان داده شده است. صفحه‌ی تنش در واقع همان صفحه‌ی نورد عرضی است که به دلیل عدم وجود تنش برشی یا کمینه بودن آن، فرض می‌شود این دو راستا، راستاهای تنش‌های اصلی‌اند. اکنون می‌توان هر معیار رفتاری پیشنهادی را از نقاط به دست آمده در شکل ۱۴ عبور داده و نسبت به دقت معیار با فرض دقیق بودن نقاط به دست آمده ارزیابی کرد. یکی از معیارهای به نسبت جدید معیار تسلیم/شکست خان - لیواست که بهبود یافته‌ی معیارهای هیل ۱۹۴۸ (سمت چپ معادله) و معادله‌ی ساختاری جانسون - کوک (سمت راست معادله) و به نام معادله‌ی ساختاری خان - هوانگ - لیانگ است. [۲۲، ۲۱]



شکل ۱۱. توزیع آسیب نرم شکست نمونه‌ی صلیبی از آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ با استفاده از حل شبه استاتیکی اجزای محدود در مقایسه با شکل ۷.

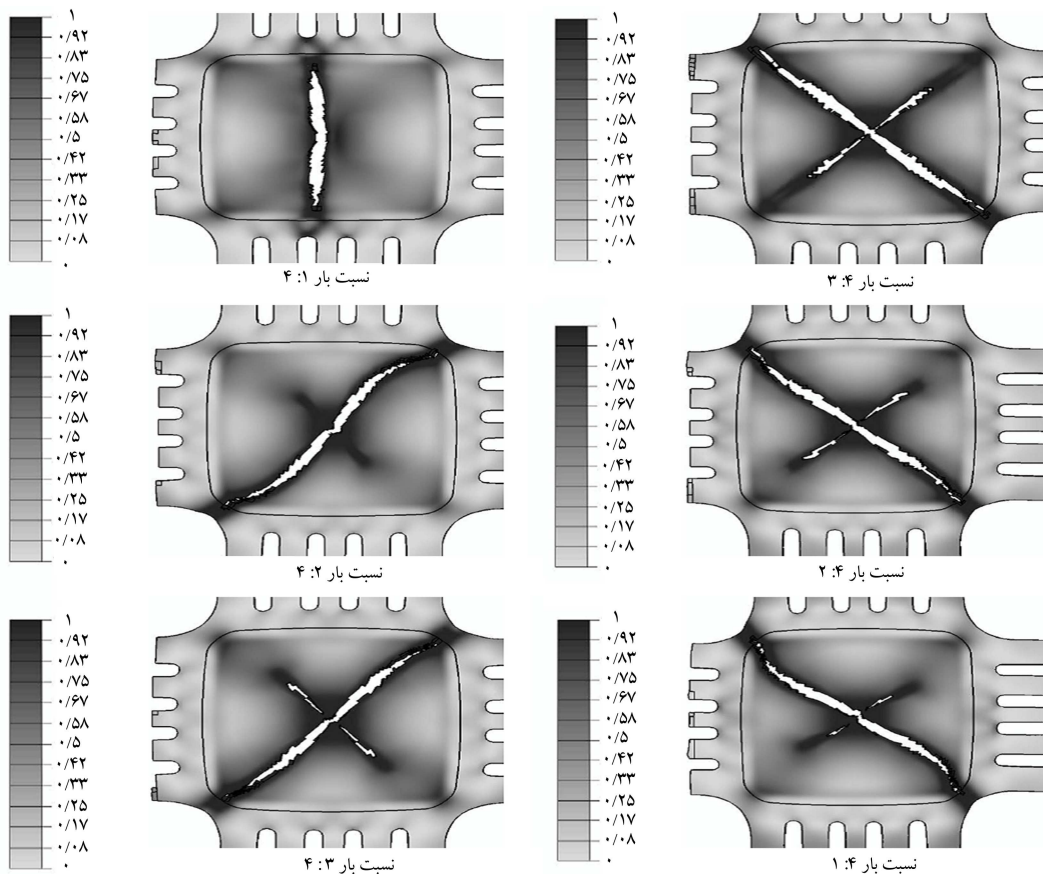
آزمون نمونه‌ی صلیبی است. این مهم در شکل ۱۱ ب به وضوح نمایان است. به صورت ظاهری همبستگی خوبی بین نتایج تجربی و عددی شکل‌های ۷ و ۱۱ دیده می‌شود.

یکی از نتایج جذاب برای مقایسه در این تحقیق، تعیین موقعیت بروز آسیب در مقطع آزمون نمونه است. در شکل ۷ الف موقعیت بروز آسیب در راستایی با زاویه‌ی  $224/88$  درجه‌ی مثلثاتی نسبت به راستای نورد و در شعاع  $8/2$  میلی‌متر از مرکز نمونه قرار دارد. در شکل ۱۱ الف این موقعیت دارای زاویه‌ی  $228/2$  درجه و شعاع  $3/2$  میلی‌متر است. این نتایج نزدیک به هم و به نسبت مطلوب‌اند.

نمودار انرژی جنبشی<sup>۲۰</sup> و نیز نمودار انرژی کرنشی کل<sup>۲۱</sup> که در حل شبه استاتیکی از تحلیل اجزای محدود به دست آمده مطابق شکل ۱۲ است. در یک تحلیل شبه استاتیکی مقدار انرژی جنبشی نباید از کسر کوچکی از انرژی کرنشی بیشتر شود. در نمودار شکل ۱۲ این موضوع محقق شده است.

یک نتیجه‌ی بسیار کاربردی از تحلیل‌های اجزای محدود، استخراج مقادیر تنش در محل بروز آسیب، در دو راستای نورد و عرضی ورق است. این آگاهی وجود دارد که اندازه‌گیری نسبتاً دقیق تنش، در نقطه‌ی از قطعه‌ی تحت بار که دچار آسیب شده در حال حاضر بسیار دشوار و یک چالش بسیار بزرگ است. تعیین تنش در چنین حالتی از طریق اندازه‌گیری‌های تغییر شکل و یا کرنش و سپس محاسبات تنش انجام می‌شود. مقادیر تنش در یک لحظه قبل از بروز آسیب در راستاهای نورد و عرضی به ترتیب  $\sigma_{11} = 4775$  و  $\sigma_{22} = 405$  مگاپاسکال به دست می‌آید.

با تکرار تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش برای نسبت بارهای مختلف می‌توان مکان هندسی شکست ماده را به دست آورد. این مکان هندسی همان نمودار تنش - حد شکل‌دهی بوده که به عنوان یک معیار شکست برای طراحان



شکل ۱۳. توزیع معیار آسیب نرم نمونه‌ی صلیبی لیونل تحت نسبت بارهای مختلف (جابه‌جایی در راستای نورد به راستای عرضی).

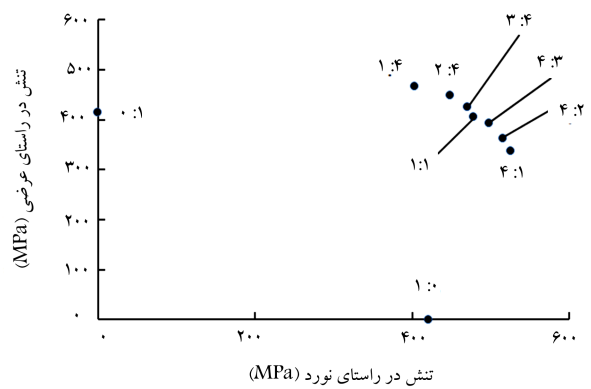
$C$  ضریب عدم تقارن در کشش و فشار،  $\xi$ ،  $F$ ،  $G$ ،  $H$ ،  $L$ ،  $M$  و  $N$  ثوابت ناهمسانگردی،  $C_1$  ضریب فشار هیدرواستاتیک،  $n$  حساسیت به نرخ کرنش و  $m$  اثر دماست.  $I_1$  اولین نامتغیر تانسور تنش است.  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش و  $T^*$  دمای بدون بعد است که از رابطه‌ی  $(T_m - T)/(T_m - T_r)$  محاسبه می‌شود.  $T_m$  دمای ذوب آلیاژ،  $T$  دمای فعلی و  $T_r$  دمای مرجع یعنی  $296$  درجه کلوین است.

عبارت  $[(2/\sqrt{3})\sin(\theta + \pi/3)]^K$  وابستگی به مکان هندسی شکست است. این عبارت عامل تعمیم‌یافتگی معیار خان - لیو است. به دلیل عدم وجود فشار هیدرواستاتیک در شرایط آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش، از عبارت  $e^{C_1 I_1/\sqrt{F}}$  صرف‌نظر می‌شود. چون شرایط تنش صفحه‌ی حاکم است مقدار تنش در راستای سوم یعنی  $z$  صفر است ( $\sigma_z = 0$ ). با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک مقدار ثوابت مادی با استفاده از سه نقطه تنش در راستای نورد، عرضی و دوجوره - مساوی به دست می‌آید.

با فرض حالت تنش صفحه‌ی، یعنی  $\sigma_z = 0$ ، تابع هزینه  $\chi^2$  برای مسئله‌ی برازش منحنی به صورت معادله‌ی ۷ در نظر گرفته شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_{K=1}^Q e^{\chi(K)}} \quad (7)$$

$Q$  تعداد نقاطی است که برازش منحنی توسط آنها انجام می‌شود و  $e$  نیز مقدار اختلاف بین تابع برازش شده و مقدار واقعی است که به صورت معادله‌ی ۸ تعریف می‌شود:



شکل ۱۴. نقاط تنش دوجوره در صفحه‌ی نورد - عرضی بر اساس نسبت‌های بارگذاری مختلف (نسبت جابه‌جایی در راستای نورد به جابه‌جایی در راستای عرضی).

شکل ریاضی این معیار به صورت رابطه‌ی ۶ است:

$$\begin{aligned} & [(2/\sqrt{3})\sin(\theta + \pi/3)]^K \times \\ & \sqrt{\frac{e^{C(\xi+1)}(F\sigma_1^2 + G\sigma_2^2 + H\sigma_3^2 + L\sigma_1\sigma_2 + L\sigma_1\sigma_3 + M\sigma_2\sigma_3 + N\sigma_1\sigma_3)}{L\sigma_1\sigma_2 + M\sigma_2\sigma_3 + N\sigma_1\sigma_3}} \\ & = e^{C_1 I_1/\sqrt{F}} [A + B(1 - (In\dot{\epsilon}/InD^p))^n] \epsilon^n \times \\ & [\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}^*]^c [(T_m - T)/(T_m - T_r)]^m \end{aligned} \quad (6)$$

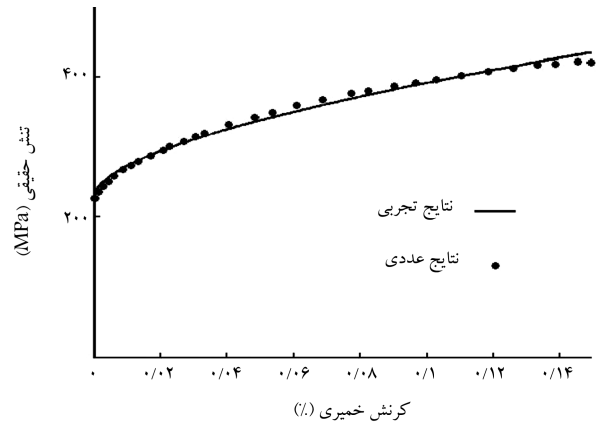
که در آنها  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  تنش‌های اصلی هستند.  $\theta$  زاویه لود،  $K$  ثابت مادی،



جدول ۴. عوامل تنظیم روندنمای ژنتیک.

داده‌ها	کمیت
تعداد متغیرها	۷ و ۴
بیشینه تکرار	۲۰۰۰
اندازه جمعیت	۸۰
درصد تقاطع	٪۸۰
درصد جهش	۳۰
نرخ جهش	۰/۱۲۵

مکانیزم انتخاب والدین      مکانیزم چرخ رولت



شکل ۱۵. تطبیق نمودار تنش حقیقی - کرنش خمیری تجربی با تئوری خان-هوانگ - لیانگ.

$$e = \sqrt{e^{C(\xi+1)}(F\sigma_1^2 + G\sigma_1^2 + L\sigma_1\sigma_2)} - e^{C_1 T_1 / \sqrt{V}} \left[ A + B(1 - (In\dot{\epsilon}/InD^p))^n \epsilon^n \right] \times [\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}^*]^c [(T_m - T)/(T_m - T_r)]^m \quad (8)$$

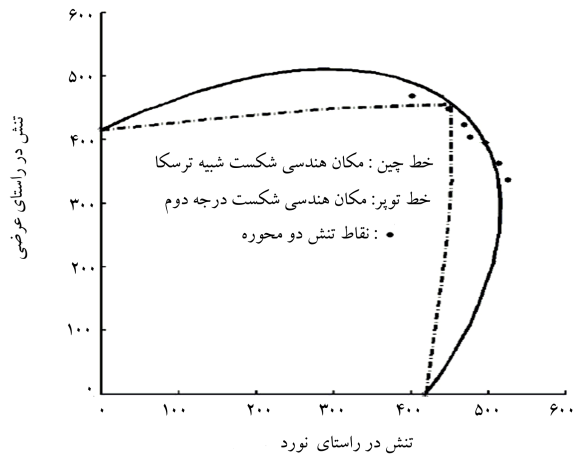
تابع هزینه دارای ۱۱ متغیر است. متغیر  $C_1$  به دلیل عدم وجود فشار هیدرواستاتیک صفر در نظر گرفته شده است. شش متغیر دیگر یعنی متغیرهای  $A, B, n, m, c, n, m$  مربوط به معادله خان - هوانگ - لیانگ از طریق داده‌های واقعی و تجربی نمودار تنش کرنش شکل ۱۵ مقاله، حدود ۳۱ نقطه‌ی تنش حقیقی - کرنش خمیری، به روش الگوریتم ژنتیک به دست آمده است. تابع خطا برای معادله خان - هوانگ - لیانگ عبارت است از:

$$e = \left[ A + B(1 - (In\dot{\epsilon}/InD^p))^n \epsilon^n \right] \times [\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}^*]^c [(T_m - T)/(T_m - T_r)]^m - \sigma_{actual} \quad (9)$$

پس از بهینه‌سازی متغیرهای رابطه‌ی ۹، همبستگی نمودار تئوری خان - هوانگ - لیانگ از نظر تطبیق ظاهری بررسی می‌شود.

در حل اجزای محدود،  $V$  نسبت بار به صورت جابه‌جایی در نظر گرفته شده است. لذا  $V$  نقطه تنش دومحوره به دست می‌آید که یک نقطه‌ی آن، معمولاً نقطه‌ی تنش دومحوره‌ی مساوی، به همراه دو نقطه‌ی تنش تک‌محوره در راستای نورد و عرضی در نظر گرفته می‌شود. با داشتن متغیرهای  $A, B, n, m, c, n, m$  و نیز سه نقطه‌ی تنش مذکور، یعنی نقطه‌ی تنش دومحوره‌ی مساوی و تک‌محوره در راستای نورد و نیز تک‌محوره در راستای عرضی، ثوابت  $F, C, G, L$  از طریق تابع خطای رابطه‌ی ۸ تعیین می‌شود. دامنه‌ی متغیرها به‌گونه‌ی انتخاب شده که تابع هزینه نزدیک به صفر شود. برای هر کدام از حالات بالا پس از چندین بار اجرای کد ژنتیک و تنظیم دامنه متغیرها کم‌ترین مقدار تابع هزینه انتخاب شده و ثوابت به دست آمده است. برای معادله‌ی خان - هوانگ - لیانگ مقدار تابع هزینه ۵/۵۹۰۵ و برای معیار خان - لیو تابع هزینه صفر شدند. عوامل تنظیم الگوریتم ژنتیک در جدول ۴ و مقادیر بهینه‌شده‌ی ثوابت مادی در جدول ۵ ارائه شده است.

ثوابت معادله‌ی ساختاری خان - هوانگ - لیانگ، یعنی ثوابت ردیف ۲ جدول ۵ از نمودار تنش حقیقی - کرنش پلاستیک در راستای نورد به دست می‌آید. مطابق شکل ۱۵، نتایج بهینه‌سازی ثوابت معادله ساختاری خان - هوانگ - لیانگ با نتایج



شکل ۱۶. مکان هندسی شکست آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ بر اساس معیار تعمیم یافته خان - لیو، تنش‌ها بر حسب مگاپاسکال.

تجربی در این خصوص مطابقت بالایی دارد. سپس با استفاده از دو نقطه‌ی تنش تک‌محوره (در راستای نورد و عرضی) و یک نقطه تنش دومحوره (ترجیحاً تنش دومحوره مساوی) ثوابت مادی ردیف ۱ جدول ۵ از طریق بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک محاسبه می‌شود. با استفاده از کلیه‌ی ثوابت مادی به دست آمده، درج شده در جدول ۵ می‌توان متحنی معیار خان - لیو را به صورت شکل ۱۶ رسم کرد. این نمودار مکان هندسی شکست یا نمودار تنش حد شکل‌دهی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به کار رفته در این تحقیق است.

با استفاده از نقاط تنش دومحوره‌ی دیگر، غیر از نقطه‌ی تنش دومحوره‌ی مساوی و با داشتن ثوابت مادی معادله خان - هوانگ - لیانگ و معیار تعمیم یافته‌ی خان - لیو می‌توان «توان عبارت وابسته به شکل مکان هندسی شکست ماده» ( $K$ ) را به هر روش بهینه‌سازی محاسبه کرد. در این پژوهش مقدار  $K$  برابر صفر به دست آمده است. این بدان معناست که رفتار ماده بر حالت درجه دوم معیار خان - لیو بر اساس داده‌های نمونه‌ی صلیبی شکست لیونل منطبق است.

## ۷. نتیجه‌گیری

هدف کلی در این تحقیق بررسی کیفی و کمی شکست آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، به وسیله‌ی نمونه‌ی صلیبی، تحت بارهای دومحوره‌ی مساوی، به روش‌های تجربی و اجزای محدود است. در این راستا آزمون‌های تک‌محوره در جهات مختلف ورق، برای

جدول ۵. نتایج به دست آمده برای ضریب و ثوابت مادی معیار خان - لیو با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

مقدار تابع هزینه	مقدار	ثوابت مادی	بهبودسازی به روش الگوریتم ژنتیک
	۰,۰۰۱۳	C	۱- تحلیل معیار خان - لیو
	۰,۲۷۶	F	
	۰,۲۸۴	G	
	-۳۱,۶۸	L	
	۰	c <sub>۱</sub>	۲- تحلیل معادله ساختاری خان - هوانگ - لیانگ
	۷۲۸,۹۱۴۵	A	
	۷۳۷,۷۲۳۷	B	
۵,۵۹۰۵	۲,۳۸۶۶	n <sub>۱</sub>	
	۰,۵۸۹	n <sub>۰</sub>	
	۰,۱۳۶۵	c	
	۳	m	

این توانمندی را ایجاد می‌کند تا مبنی بر تجربه و با استفاده از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود بتوان مکان هندسی نسبتاً دقیقی برای ماده، در ربع اول صفحه‌ی تنش رسم کرد. روش کار به عنوان یک نتیجه در تحقیق حاضر شامل: ۱. انجام آزمون‌های تک‌محوره در راستاهای نورد، ۴۵ و عرض، برای تعیین ثوابت ناهمسانگردی؛ ۲. آزمون‌های دومحوره‌ی مساوی به وسیله‌ی نمونه‌های صلیبی دنگ برای شرایط تسلیم و لیونل برای شرایط شکست؛ ۳. شبیه‌سازی نمونه‌ی صلیبی و اعتبارسنجی نتایج آن با داده‌های تجربی؛ ۴. استخراج نقاط تنش دومحوره در ربع اول صفحه‌ی تنش برای نسبت بارهای مختلف؛ ۵. انتخاب یک مدل رفتاری تسلیم یا شکست؛ ۶. تعیین ثوابت مادی مدل رفتاری به یکی از روش‌های بهینه‌سازی مانند روندنمای ژنتیک و ۷. رسم مکان هندسی تسلیم یا شکست و در نهایت به کارگیری آن در طراحی‌های خاص و دقیق مهندسی است. در واقع مهم‌ترین ویژگی و دستاورد این تحقیق ارائه راهکاری برای تعیین نمودارهای تنش-حد شکل‌دهی مواد شکل‌پذیر است. لذا در ادامه این تحقیق با تکرار تحلیل‌های عددی اجزای محدود برای نسبت بارهای مختلف در بازوهای نمونه‌ی صلیبی و در نرخ‌های کرنش و دماهای مختلف می‌توان رفتار کشش دومحوره‌ی ماده را بررسی کرد.

بررسی محدودیت‌های نمونه‌ی صلیبی شکست برای دست‌یابی به طیف وسیعی از نقاط کشش دومحوره در شرایط مختلف فرایند از موارد جذاب برای پژوهش‌های بعدی است.

## ۸. تقدیر و تشکر

نویسندگان از مدیریت مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری زبردیا، به دلیل تأمین اعتبار و ایجاد تسهیلات لازم در پیشبرد اهداف این پروژه کمال قدردانی را دارند. از مدیریت و کارشناسان محترم آزمایشگاه‌های مرکزی صنایع هوایم‌سازی ایران، هسا، جهت همکاری در آزمون‌های تجربی و آزمایشگاهی تشکر می‌شود. کلیه‌ی حقوق مادی و معنوی این تحقیق متعلق به دانشگاه صنعتی مالک اشتر است.

به دست آوردن خواص مکانیکی ماده انجام شد. برای انجام آزمون‌های دومحوره از نمونه‌ی صلیبی لیونل، که اساساً برای رفتار شکست فلزات شکل‌پذیر طراحی شده، استفاده شده است. یک سازواری کشش دومحوره‌ی وابسته، متناسب با دستگاه آزمون کشش - فشار تک‌محوره‌ی اینسترون - ۱۳۴۳، طراحی و ساخته شده است. با استفاده از این سازواری، آزمون‌های تجربی دومحوره انجام شده است. از تجهیزات اندازه‌گیری مانند میکروسکوپ دینولایت، نیروسنج‌های الکترونیکی، ترموکوپل لیزری و غیره با دقت نسبتاً مناسب و با انجام تنظیمات اولیه استفاده شده است.

نمودارهای بارگذاری اندازه‌گیری شده از نیروسنج‌های الکترونیکی سازواری کشش دومحوره‌ی وابسته، همبستگی خوبی با نمودار اندازه‌گیری شده از نیروسنج دستگاه آزمون کشش - فشار تک‌محوره‌ی اینسترون - ۱۳۴۳ نشان می‌دهد. این همبستگی در شکل و حالت نمودارها و نیز مقادیر حداکثری آنها مشهود است. از سوی دیگر نمودارهای نیرو - جابه‌جایی بازوهای نمونه‌ی صلیبی، که از روش اجزای محدود استخراج شده، همبستگی خوبی با نمودارهای تجربی به دست آمده دارند.

از کمیت‌های مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی، موقعیت آغاز شکست و مسیر توسعه‌ی آن است که در این خصوص همبستگی خوبی بین نتایج تجربی و عددی ملاحظه می‌شود. همچنین چروکیدگی نواحی گوشه روی نمونه و جابه‌جایی مرکز نمونه در راستای ضخامت نمونه قبل از شکست نسبت به محورهای بارگذاری، به دلیل عدم وجود تقارن برای نمونه نسبت به صفحه‌ی عمود بر راستای ضخامت از مواردی هستند که در عمل و در تحلیل‌های عددی مشاهده شده است.

به طور کلی مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی در این تحقیق نشان می‌دهد که روش تحلیل عددی به‌کار برده شده می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار شکست مواد فلزی شکل‌پذیر استفاده شود و قابل اعتماد است.

اندازه‌گیری تنش در تغییر شکل‌های بزرگ، در محل شکست ماده، چالش بسیار بزرگی است که معمولاً از طریق محاسبات عددی، به روش اجزای محدود انجام می‌گیرد. برای بررسی و یا بیان مدل ریاضی رفتار یک ماده‌ی خاص یا طیفی از مواد نیاز به مکان هندسی تسلیم / شکست است. مطالعه‌ی حاضر

## پانویسها

1. ASTM E8/E8M - 13a
2. ISO16842
3. Al. Alloy 5083-H321
4. instron
5. santam-STM-250
6. Abaqus 6.14
7. etching
8. water jet
9. wire cut
10. calibrator
11. zemic(Code: H3- C3- 10t- 6B- D55)
12. dino lite microscope- type: AM 7013 MZI(R4)
13. dynamic strain aging(DSA)
14. portevin-le chatelier(PLC)
15. ASTM E517-00
16. normal anisotropy
17. planar anisotropy
18. damage initiation
19. damage propagation
20. kinematic energy (ALLKE)
21. total strain energy (ALLIE)
22. lode angle
23. lode parameter
24. root mean square error (RMSE)

## منابع (References)

1. Banabic, D., Balan, T. and Comsa, D. "A new yield criterion for orthotropic sheet metals under plane-stress conditions", *In Proceedings of the 7th Conference 'TPR2000', Cluj Napoca, Romania* (2000).
2. Hannon, A. and Tiernan, P. "A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal", *Journal of materials processing technology*, **198**(1), pp. 1-13 (2008).
3. Li, D. and Ghosh, A.K. "Biaxial warm forming behavior of aluminum sheet alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, **145**(3), pp. 281-293 (2004).
4. Schödel, M., Zerbst, U. and Dalle Donne, C. "Application of the european flaw assessment procedure SINTAP to thin wall structures subjected to biaxial and mixed mode loadings", *Engineering Fracture Mechanics*, **73**(5), pp. 626-642 (2006).
5. Quaak, G., *Biaxial testing of sheet metal: An experimental-numerical analysis*, Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Computational and Experimental Mechanics, pp. 1-33 (2008).
6. Gutscher, G. and et al. "Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test", *Journal of Materials Processing Technology*, **146**(1), pp. 1-7 (2004).
7. Leotoing, L. and et al. "Cruciform shape benefits for experimental and numerical evaluation of sheet metal formability", *Journal of Materials Processing Technology*, **213**(6), pp. 856-863 (2013).
8. Boehler, J., Demmerle, S. and Koss, S. "A new direct biaxial testing machine for anisotropic materials", *Experimental Mechanics*, **34**(1), pp. 1-9 (1994).
9. Yu, M.-h., "Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century", *Applied Mechanics Reviews*, **55**(3), pp. 169-218 (2002).
10. Yu, Y. and et al. "Design of a cruciform biaxial tensile specimen for limit strain analysis by FEM", *Journal of Materials Processing Technology*, **123**(1), pp. 67-70 (2002).
11. Abu-Farha, F.K., *Integrated approach to the superplastic forming of magnesium alloys*, *Mechanical Engineering* (2007).
12. Kuwabara, T., Ikeda, S. and Kuroda, K., "Measurement and analysis of differential work hardening in cold-rolled steel sheet under biaxial tension", *Journal of Materials Processing Technology*, **80**, pp. 517-523 (1998).
13. Brieu, M., Diani, J. and Bhatnagar, N. "A new biaxial tension test fixture for uniaxial testing machine—a validation for hyperelastic behavior of rubber-like materials", *Journal of Testing and Evaluation*, **35**(4), pp. 364-372 (2006).
14. Vezer S. Z. and Major Z., *Development of An In-Plane Biaxial Test Setup for Monotonic and Cyclic Tests of Elastomers*, Polymer Competence Center Leoben, (2004).
15. Deng, N., Kuwabara, T., and Korkolis, Y. "Cruciform specimen design and verification for constitutive identification of anisotropic sheets", *Experimental Mechanics*, **55**(6), pp. 1005-1022 (2015).
16. Leotoing, L. and Guines, D. "Investigations of the effect of strain path changes on forming limit curves using an in-plane biaxial tensile test", *International Journal of Mechanical Sciences*, **99**, pp. 21-28 (2015).
17. Robinson, J. "Serrated flow in aluminium base alloys", *International Materials Reviews*, **39**(6), pp. 217-227 (1994).
18. Yilmaz, A. "The portevin-le chatelier effect: a review of experimental findings", *Science and Technology of Advanced Materials*, **12**(6), pp. 063001 (2011).
19. Janbakhsh, M., Riahi, M., and Djanroodi, F. "Anisotropy induced biaxial stress-strain relationships in aluminum alloys", *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, **5**(3), pp. 1-7 (2012).
20. Djanroodi, F. and Janbakhsh, M., *Formability Characterization of Titanium Alloy Sheets*, in *Titanium Alloys-Advances in Properties Control*, InTechOpen (2013).
21. Khan, A.S. and Liu, H. "Strain rate and temperature dependent fracture criteria for isotropic and anisotropic metals", *International Journal of Plasticity*, **37**, pp. 1-15 (2012).
22. Khan, A.S. and Yu, S. "Deformation induced anisotropic responses of Ti-6Al-4V alloy. part I: experiments", *International Journal of Plasticity*, **38**, pp. 1-13 (2012).
23. Khan, A.S., Yu, S., and Liu, H. "Deformation induced anisotropic responses of Ti-6Al-4V alloy Part II: a strain rate and temperature dependent anisotropic yield criterion", *International Journal of Plasticity*, **38**, pp. 14-26 (2012).