

## بررسی تجربی و عددی تنش پسماند در فرایند شکل دهی ورق داغ آلومینیوم ۵۰۸۳ با دمش گاز

حامد فتاحی<sup>۱\*</sup>، مهدی جلالی عزیزپور<sup>۲</sup>

### چکیده

در پژوهش حاضر سعی شده است، تحلیل تنش پسماند در ورق آلومینیومی آلیاژ ۵۰۸۳ به روش شکل دهی داغ توسط گاز با استفاده از آزمایش‌های تجربی انجام گردد. سپس به وسیله روش اجزاء محدود و مقایسه آن با آزمایش‌های تجربی انجام شده، صحت این شبیه سازی‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار داده شد. هدف از این پژوهش، تبیین روشی کارا جهت تعیین تنش‌های به وجود آمده در این روش شکل دهی می‌باشد. لذا تنش القایی در مخروط ناقص شکل داده شده توسط روش مذکور بوسیله‌ی روش سوراخکاری مرکزی اندازه‌گیری شد. تنش معادل در آزمایش تجربی برابر با ۴۴/۵ مگاپاسکال به دست آمد. سپس تنش پسماند فرآیند شکل دهی داغ ورق توسط گاز و با بهره‌گیری از روش تحلیل المان محدود در حالت وابسته به دما بررسی شد. بدین منظور از نرم افزار المان محدود ABAQUS/Explicit برای شبیه سازی فرآیند شکل دهی استفاده شد. حداکثر انحراف نتایج محاسبات المان محدود و آزمایش تجربی برای تنش بیشینه‌ی موجود در قطعه ۷٪ تعیین شد. از این رو نتیجه گرفته شد که با استفاده از محاسبات المان محدود می‌توان مطالعه‌ی دقیقی بر روی روش شکل دهی داغ توسط گاز داشت.

**واژه‌های کلیدی:** شکل دهی، تنش پسماند، سوراخ کاری، المان محدود، آلیاژ.

<sup>۱</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

<sup>۲</sup> - استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

\* - نویسنده مسوول مقاله: hfattahi13@yahoo.com

## پیشگفتار

فرایند شکل‌دهی فلز داغ توسط دمش گاز از جمله روش‌های جدید جهت شکل‌دهی ورق می‌باشد. هم‌چنین این روش از مهم‌ترین روش‌های شکل‌دهی آلیاژهای سوپرپلاستیک بشمار می‌رود. شکل‌دهی داغ ورق توسط گاز به وسیله جنرال موتور<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۸ به عنوان فرآیند شکل‌دهی ورق آلیاژ آلومینیوم به شکل‌های پیچیده مانند پانل بدنه خودرو با قابلیت تولید بالا مطرح شد و نهایتاً در پایان سال ۲۰۰۵ تولید ۳۰۰۰۰۰ پانل بدنه خودرو توسط این روش انجام گردید. ایده‌ی شکل‌دهی داغ توسط گاز از شکل‌دهی سوپرپلاستیک<sup>۲</sup> و شکل‌دهی ورزشی داغ<sup>۳</sup> گرفته شده است. مکانیزم شکل‌دهی در این روش، مشابه فرایند هیدروفرمینگ است و تنها تفاوت آن استفاده از گاز خنثی به جای روغن می‌باشد. از مزایای این روش نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی، امکان استفاده از دماهای بالا، توانایی دست‌یابی به تغییر طول‌های زیاد، قابلیت ایجاد اشکال پیچیده ساخته شده از مواد، افزایش سرعت شکل‌دهی و کاهش هزینه‌ی قالب می‌باشد [۱ و ۲]. سورگنت امکان کاهش زمان شکل‌دهی را بوسیله‌ی کنترل پروفیل فشار در ناحیه‌ای از قطعه که در معرض بیش‌ترین کرنش در پایان فرایند شکل‌دهی بود، بررسی نمود. وی به این نتیجه رسید که کنترل نمودن نرخ کرنش بوسیله‌ی پروفیل فشار در ناحیه‌ای از قطعه که بیش‌ترین تغییر شکل را در انتهای فرایند دارد، زمان شکل‌گیری به شدت کاهش می‌یابد [۳].

آلومینیوم و منیزیم فلزاتی هستند که برای کاهش وزن تجهیزات موتوری استفاده می‌شوند. آلومینیوم و منیزیم آلیاژهای کاملاً مستحکمی هستند؛ اما در دمای اتاق قابلیت شکل‌پذیری کمی دارند. بنابراین روش جدید شکل‌دهی جهت شکل دادن قطعات پیچیده مورد نیاز در صنایع هوایی و خودرویی ضروری است [۴]. شکل‌دهی داغ، روشی قابل استفاده در صنعت است که قابلیت شکل‌پذیری آلومینیوم و منیزیم را افزایش می‌دهد. با این وجود این روش برای آلیاژهای ویژه‌ای از قبیل آلیاژ سوپر

پلاستیک AA۵۰۸۳ که دارای ویژگی‌های قابل‌کنترلی برای شکل‌دهی داغ هستند، استفاده شده است [۵].

بسیاری از قطعات تولید شده بوسیله‌ی شکل‌دهی سوپر پلاستیک، قطعات سازه‌ای هستند. به این معنی که طراحی آن‌ها بر اساس تحمل بار اعمالی می‌باشد. حضور تنش پس‌ماند در قطعات صنعتی منجر به تغییر عکس العمل سازه در مقابل بار اعمالی می‌گردد و از این‌رو شناسایی و تعیین میزان تنش پس‌ماند و بررسی چگونگی تأثیر تنش پسماند بر رفتار سازه ضروری است و طراحی قطعات حساس بدون در نظر گرفتن تنش پس‌ماند می‌تواند سبب بروز خسارت‌های مالی و جانی شود [۶].

شکل‌دهی قطعات با استفاده از روش سوپر پلاستیک مزایای بسیاری دارد که شکل‌دهی قطعات با اشکال پیچیده با استفاده از یک قالب منفرد، بدون نیاز به سنبه یکی از این موارد است؛ زیرا نیروی شکل‌دهی از طریق گاز اعمال می‌شود. به عنوان مثال شکل‌دهی با نسبت عمق به ارتفاع به دلیل توزیع ضخامت یکنواخت چالش‌انگیز است. که با قالب دمش گاز می‌توان بهبودهایی در پروفیل قطعات تولیدی به صورت سوپرپلاستیک ایجاد نمود [۷].

یو وو با بهره‌گیری از این روش و قالب بهبود یافته، مشخصات تغییر شکل ورق نازک آلیاژ منیزیمی را بررسی نمود. وی به صورت تجربی نشان داد که نرخ کرنش متوسط  $10^{-2}$ ، قابل دسترسی است و هم‌چنین توزیع یکنواخت در سراسر قطعه همراه با کاهش چشم‌گیر زمان شکل‌دهی را گزارش نمود [۸]. با این وجود، این روش برخی معایب از قبیل نیاز به دما یا نیروی زیاد به منظور اطمینان از شکل‌یافتن کامل ماده درون قالب را دارد. دیگر محدودیت این روش وابستگی دما و فشار مورد استفاده است که زمان قابل توجهی را صرف می‌کند. حتی با وجود اعمال دماها و فشارهای بالاتر، این فرآیند نسبت به شکل‌دهی با سنبه و ماتریس طولانی‌تر است [۹].

هدف پژوهش حاضر، تعیین تجربی و عددی تنش پس‌ماند در مخروط ناقص تولید شده به وسیله‌ی فشار گاز در دمای نزدیک ذوب ورق آلومینیومی AA ۵۰۸۳ و هم‌چنین توزیع ضخامت ورق پس از شکل‌دهی می‌باشد.

<sup>1</sup>- General Motors

<sup>2</sup>-Super Plastic Forming

<sup>3</sup>- Hot Blow Forming

### شکل دهی فلز داغ توسط دمش گاز

به طور معمول تنش شارش با آهنگ کرنش افزایش می‌یابد و در صورت ثابت بودن کرنش، این اثر را می‌توان با رابطه‌ی (۱) تقریب زد [۱۰]:

$$\sigma = C \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

که در آن C ثابت استحکام و وابسته به کرنش، دما و جنس ماده است، و m ضریب حساسیت تنش شارش به آهنگ کرنش است. در دمای محیط اندازه‌ی m برای اغلب فلزات نسبتاً کوچک (بین صفر و ۰/۰۳) است. افزایش آهنگ کرنش سبب کرنش سختی بیش‌تر و بنابراین مقدار بزرگ‌تر ضریب حساسیت به آهنگ کرنش را منجر می‌شود. این ضریب برای هر ماده به دما نیز وابسته است؛ در دماهای گرم کاری، m معمولاً تا ۰/۲۰ افزایش می‌یابد، بنابراین اثر آهنگ کرنش بسیار بالاتر از همین اثر در دمای محیط است. در شرایط خاص، مقدار m در فلزات گوناگون تا حدود ۰/۵ یا بیش‌تر مشاهده شده است. در آلیاژهای آلومینیوم و بسیاری دیگر m در نزدیکی دمای محیط به مقدار کمینه خود می‌رسد و حتی گاهی اوقات مقدار منفی دارد. دو ویژگی تنش‌های شارش فوق‌العاده کم در دمای کاری بالا و افزایش طول‌های کششی فوق‌العاده زیاد، کاربرد فرایند شکل‌دهی فلز داغ توسط دمش گاز را برای کاربردهای خاص توجیه می‌کند [۱۰].

مکانیزم شکل‌دهی فلز داغ توسط دمش گاز مشابه فرایند هیدروفرمینگ است و تنها تفاوت آن استفاده از گاز خنثی به جای روغن می‌باشد.

در شکل‌دهی داغ ورق توسط گاز یا شکل‌دهی پلاستیک سریع، به ورق آلومینیوم تا رسیدن به درجه حرارت شکل‌دهی (۵۱۰ - ۴۰۰ درجه سانتیگراد) حرارت داده می‌شود. ورق گرم‌شده ما بین دو نیمه قالب (از جنس فولاد ابزار یا سرامیک) که آن را از محیط ورق گرفته‌اند، قرار گرفته و توسط فشار هوا یا گاز (نیترژن یا آرگون) در سطح پشتی ورق، به داخل ابزار شکل‌دهی کشیده می‌شود. فشار شکل‌دهی دائماً در یک روش کنترل‌شده از فشار محیط تا فشار نهایی شکل‌دهی در محدوده ۳۴ bar - ۱۷ یا بالاتر، افزایش می‌یابد.

در ثانیه‌های نخست تا حدود دقیقه اول با افزایش فشار، ورق خود را با سطح ابزار تطبیق می‌دهد. پس از دوره اول فشار دهی، برای شروع کشش ورق، فشار با نرخ سریع‌تری افزایش پیدا می‌کند. با توجه به اندازه و پیچیدگی بدنه‌های شکل‌گیری، شکل‌دهی معمولاً در مدت زمان ۲-۱۲ دقیقه تکمیل می‌شود، که به صورت قابل توجهی سریع‌تر از شکل‌دهی سوپرپلاستیک می‌باشد.

تکنیک شکل‌دهی داغ ورق توسط گاز مزایایی شامل یکپارچگی بهتر ساختار، کاهش هزینه تولید، زمان شکل‌دهی کم‌تر، کاهش تعداد پروسه‌های اتصال و صرفه‌جویی مواد را ارائه می‌کند. این روش برای شکل‌دهی قطعات با طرح‌های پیچیده مناسب می‌باشد. شکل‌دهی فلز داغ توسط گاز بسیاری از معایب روش‌های دیگر را برطرف ساخته است. شکل‌دهی فلز داغ توسط گاز نتیجه‌ای از مطالعه‌ی روی مفهوم فرایندی است که با کاهش زمان سیکل و سرمایه‌گذاری ثابت همراه است. شکل ۱ طرحواره‌ای از این روش را نشان می‌دهد.

مفاهیم شکل‌دهی فلز داغ توسط گاز براساس روش‌های شکل‌دهی زیر می‌باشد:

۱- روش‌های شکل‌دهی سوپرپلاستیک (SPF): این روش به وسیله‌ی صنایع هوایی جهت شکل‌دهی سازه‌های آلومینیومی و تیتانیومی توسعه یافت. شکل‌دهی سوپرپلاستیک مشخصه‌ی افزایش طول لازم برای شکل‌دهی اشکال پیچیده در فشار پایین با استفاده از ابزار سرامیکی را دارد. با این وجود، شکل‌دهی سوپرپلاستیک به شدت آرام و برای فولادهای کربنی به خوبی مناسب نمی‌باشد.

۲- روش‌های شکل‌دهی دمش داغ (HBF): این روش در صنایع پلاستیک در حجم بسیار بالا استفاده می‌شود.

۳- روش‌های حرارت‌دهی مقاومت الکتریکی (ERH): این تکنولوژی به‌طور گسترده در کاربردهای متنوعی از جوشکاری تا عملیات حرارتی استفاده می‌شود.

۴- روش‌های حرارت‌دهی القایی: این تکنولوژی به‌طور گسترده در صنایع خودروسازی برای تمپر، آنیل و حرارت‌دهی سریع فلزات آهنی استفاده می‌شود.

باشینگر<sup>۱</sup>، و سخت شوندگی جنبشی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. در سخت شوندگی جنبشی صفحه تسلیم در فضای تنشی به جای افزایش، انتقال می‌یابد.

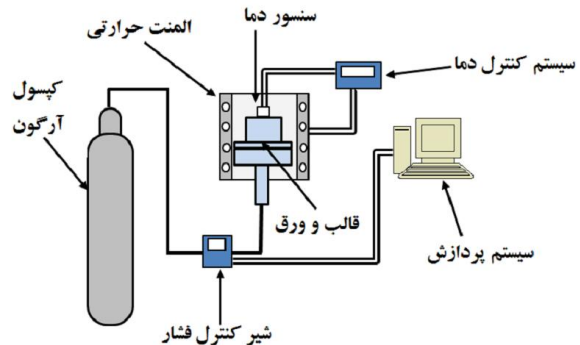
### مدل المان محدود شکل دهی ورق

در فرایندهای شکل دهی گرم، قطعه دارای دمای اولیه بالایی است که با انجام فرایند، قطعه دچار تغییر شکل پلاستیک می‌گردد. مقداری از این کار پلاستیک به حرارت تبدیل شده و دمای قطعه را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر به دلیل تماس قطعه با ابزارها و قرار گرفتن آن در محیط آزاد، دمای قطعه در اثر فرایندهای انتقال حرارت تماسی، همرفت و تابشی کاهش می‌یابد. با تغییر زیاد دمای قطعه نوع رفتار ماده نیز تغییر می‌کند. پارامتر دیگری که بر نوع رفتار ماده اثر گذار می‌باشد، نرخ کرنش اعمالی است. در نرخ کرنش‌های بالاتر ماده رفتار سخت‌تری از خود نشان می‌دهد. بنابراین برای فرایندهایی مانند شکل دهی ورق داغ با گاز که تغییرات دمای قطعه و نرخ کرنش اعمالی قابل ملاحظه است، برای انجام یک تحلیل دقیق لازم است که رفتار ماده تابعی از نرخ کرنش و دما تعریف شود.

با توجه به آنچه که گفته شد می‌توان نتیجه گرفت که شکل دهی ورق داغ با گاز، یک پدیده‌ی مکانیکی-حرارتی کوپل و کاملاً غیرخطی است که در آن ایجاد حرارت و سردسازی سبب گرادیان شدید تنشی در قطعه می‌شود.

می‌توان از نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای انجام تحلیل محاسباتی شکل دهی فلز داغ توسط دمش گاز، استفاده کرد. آباکوس از انتگرال زمانی مستقیم و صریح<sup>۳</sup> با استفاده از عملگر هایپر-هاگس<sup>۴</sup> استفاده می‌کند. از آنجایی که در این نوع شکل دهی انرژی جنبشی سهم ناچیزی از انرژی کل را داراست، این مسئله در طبقه بندی شبه استاتیکی قرار می‌گیرد.

۵- کوئنج و تمپر کردن: این فرایند در قالب برای سال‌های زیادی در فرآیند مواد جهت افزایش خواص استحکامی مواد استفاده شده است.



شکل ۱- تصویر شماتیک تجهیزات شکل دهی فلز داغ

### توسط دمش گاز

گرمایش و سرمایش شدید حاصل از فرآیندهای شکل دهی حرارتی علاوه بر ایجاد پاره‌ای خواص متالورژیکی نامطلوب سبب ایجاد تنش نیز می‌شود. این تنش‌ها بر دو نوع تنش‌های واکنشی و تنش‌های پسماند حرارتی هستند. تنش‌های واکنشی نتیجه‌ی محدودیت ایجاد شده توسط قطعات تحت بار حرارتی در مقابل انقباض و انبساط حرارتی هستند و یا اینکه این قطعات به اجزا دیگر یک مجموعه متصل و یا به هر صورت دیگر با نیروهای تکیه‌گاهی محدود شده‌اند. تنش‌های پسماند حرارتی، از نوع تنش‌هایی هستند که به واسطه‌ی حرارت دادن و انقباض و انقباض موضعی و تغییر شکل پلاستیک حاصل، در جسم تشکیل می‌شود. اساساً تنش‌های پسماند حرارتی ناشی از بارگذاری حرارتی برگشت پذیر می‌باشد.

در مورد بارگذاری افزایشی یکنواخت، اغلب فرض سخت شوندگی همسانگرد منطقی است، در حالی که برای نمونه‌هایی با بارگذاری‌های برگشت پذیر این فرض اغلب مناسب نمی‌باشد؛ زیرا سخت شوندگی همسانگرد در بارگذاری‌های برگشت پذیر منجر به ناحیه‌ی الاستیک بسیار بزرگی می‌شود که اغلب در آزمایش‌های تجربی دیده نمی‌شود. در واقع ناحیه‌ی الاستیک خیلی کوچکتری انتظار می‌رود، این نتیجه اثری است که به نام اثر

<sup>1</sup>-Bauschinger effect

<sup>2</sup>-Kinematic hardening

<sup>3</sup>- Direct, implicit time integration

<sup>4</sup>- Hilber-Hughes

قالب شکل‌دهی و ورق منطبق بر شرایط تست عملی می‌باشد. ورق دایره‌ای به قطر ۱۵۰ mm است. قطر خارجی قالب و ورق‌گیر ۱۵۰ mm و قطر داخلی آن‌ها ۱۱۵ mm می‌باشد. شعاع لبه دهانه ورودی قالب ۵ mm می‌باشد. برای قالب و ورق‌گیر نقطه مرجع<sup>۵</sup>، به منظور اعمال شرایط مرزی مکانیکی و حرارتی به اجزای صلب تعیین می‌شود. شرایط دمایی و بارگذاری در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- خواص فیزیکی و حرارتی وابسته به دمای

AA ۵۰۸۳ [۱۱]

ردیف	دما (°C)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	گرمای ویژه (J/kg.K)	هدایت گرمایی (W/m.°C)
۱	-۲۰	۲۶۷۳/۹	۹۲۴/۱	۱۱۲/۵
۲	۸۰	۲۶۴۲/۷	۹۸۴/۲	۱۲۲/۷
۳	۱۸۰	۲۶۲۹/۴	۱۰۳۹/۶	۱۳۱/۶
۴	۲۸۰	۲۶۱۱/۵	۱۰۸۱/۲	۱۴۲/۳
۵	۳۸۰	۲۵۸۹/۳	۱۱۳۶/۶	۱۵۲/۵
۶	۴۸۰	۲۵۶۷	۱۱۳۶/۶	۱۵۹/۵
۷	۵۸۰	۲۵۴۹/۲	۱۲۶۱/۴	۱۷۷/۲

<sup>5</sup>-Reference Point

ورق سوپرپلاستیک با استفاده از المان‌های پوسته‌ای چهارضلعی، از نوع M3D4 موجود در مجموعه‌ی المان‌های آباکوس، شبکه‌بندی می‌شود. در اصطلاح M3D4 برای المان پوسته‌ای، سه بعدی و چهار گره‌ای استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌های کامپیوتری فرآیند شکل‌دهی ورق گرم توسط گاز به وسیله‌ی روش المان محدود و با بهره‌گیری از المان‌های پوسته‌ای<sup>۱</sup> و یا غشایی<sup>۲</sup> انجام می‌شود. به دلیل بازدهی محاسباتی و رفتار تماسی ساده‌تر المان پوسته‌ای، استفاده از این المان نسبت به المان غشایی ترجیح داده می‌شود.

المان‌های پوسته‌ای، ورق‌هایی در فضا می‌باشند که نیروهای پوسته‌ای را تحمل می‌کنند و هیچ‌گونه ماتریس سختی برشی و یا خمشی را ندارند، بنابراین تنها مولفه‌های تنشی غیر صفر در پوسته، مولفه‌های موازی با سطح میانی پوسته می‌باشد.

شکل‌دهی گرم توسط گاز شامل مدل‌سازی قطعات با هندسه پیچیده می‌شود. بنابراین تعریف صحیح و دقیق سطح قالب پیچیده و همچنین ایجاد شبکه‌بندی المان محدود با کیفیت در سراسر آن، ضروری است. در اغلب موارد سطوح قالب از لحاظ توپوگرافی نامنظم می‌باشد که می‌توان برای مدل‌سازی این سطوح از مجموعه‌ی منظم چهارضلعی‌هایی به هم پیوسته بهره برد. استفاده از بیان سازگاری جهت ارائه‌ی دوباره‌ی سطوح غیرچهار ضلعی و تولید شبکه‌بندی با کیفیت در سراسر نواحی، در انجام دادن شبیه‌سازی المان محدود فرآیند شکل‌دهی گرم توسط گاز کاملاً تعیین کننده است.

خواص مکانیکی AA ۵۰۸۳ برحسب دما مورد استفاده در شبیه‌سازی، از نتایج بدست آمده توسط باریانی و همکارانش [۱۱] بهره گرفته می‌شود که به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۲ آورده شده است.

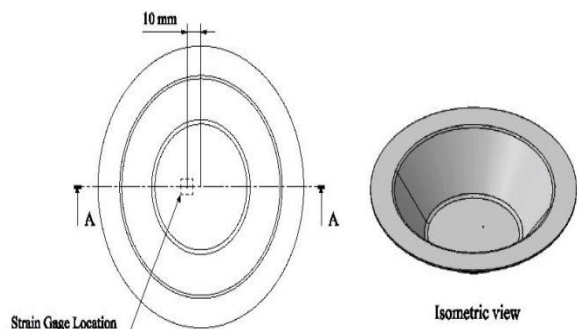
ورق تحت شکل‌دهی به صورت یک قطعه تغییرشکل‌پذیر<sup>۳</sup> تعریف‌شده و قالب به صورت قطعات صلب<sup>۴</sup> مدل‌سازی می‌شود. در تحلیل نرم‌افزاری، ابعاد دهانه

<sup>1</sup>- Membrane element

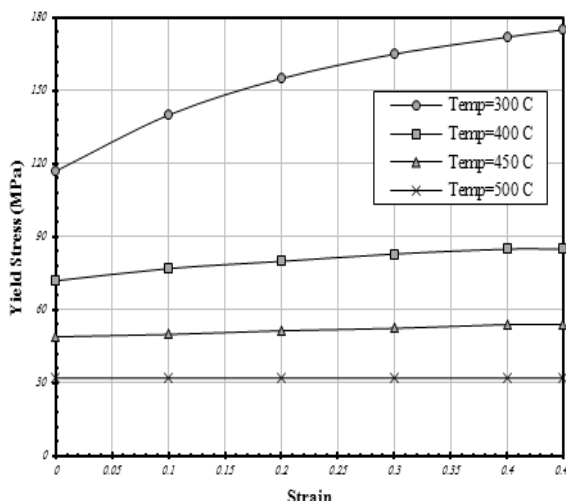
<sup>2</sup>- Shell element

<sup>3</sup>- Deformable

<sup>4</sup>- Analytical Rigid



شکل ۳- محل ایجاد سوراخ مرکزی در نمونه ها بعد از شکل دهی



شکل ۲- نمودار تغییرات تنش آلیاژ ۵۰۸۳ AA بر حسب دما [۸]

### اندازه گیری تنش پسماند

به منظور بررسی عملی تنش پسماند القایی در فرآیند شکل دهی داغ ورق توسط دمش گاز از روش سوراخ کاری مرکزی استفاده شد. در این روش جهت آزادسازی تنش های پسماند ناشی از شکل دهی گرم ورق توسط گاز از سوراخ کاری به وسیله ی مته دستی استفاده می شود. ابتدا محل سوراخ نشان گذاری شده و توسط سه پایه ی انیورسال موقعیت مته بر روی نقطه مورد نظر تنظیم می شود. در شکل ۴ دستگاه سه پایه و مته ی سوار شده بر قطعه کار نشان داده شده است.

جدول ۲- شرایط شکل دهی گرم نمونه های مورد آزمایش

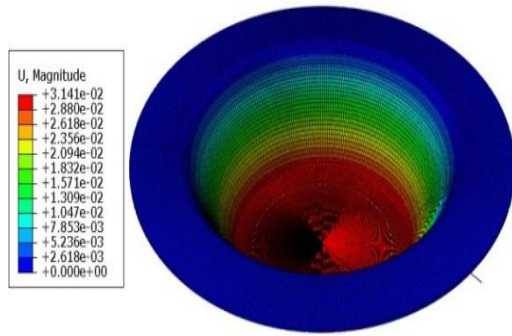
دما شکل دهی (°C)	فشار شکل دهی (bar)	زمان شکل دهی (s)
۵۰۰	۵	۱۰



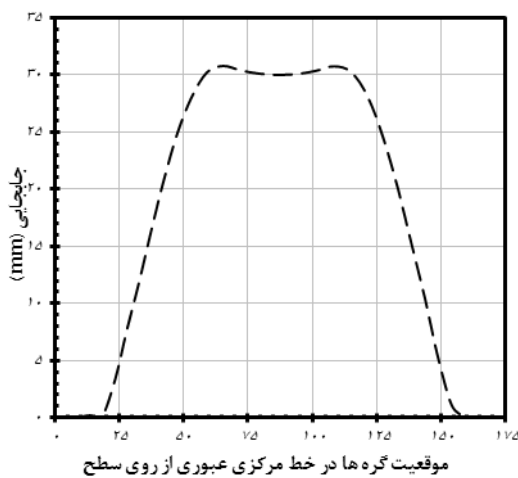
شکل ۴- آماده سازی قطعه جهت اندازه گیری تنش پسماند

برای اندازه گیری تنش پسماند در عمق با روش سوراخ کاری مرکزی، از کرنش سنج نصب شده بر روی صفحه پایینی استفاده می شود. محل قرار گرفتن کرنش سنج به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است. داده های کرنش سنج ها، کرنش های میانگینی در طول گیج هایشان<sup>۱</sup> می باشد. بنابراین برای استخراج نتایج در مدل المان محدود، از میانگین اطلاعات مربوط به گره هایی که در طول گیج کرنش سنج قرار دارد، استفاده می شود.

<sup>۱</sup> -Gage length



(الف)



(ب)

شکل ۵- (الف) کانتور جابجایی (ب) نمودار جابجایی ورق تحت شکل دهی گرم

با بررسی دقیق نمودار مشاهده می‌شود که توزیع تنش در ناحیه‌ی ورق گیر تقریباً یکنواخت می‌باشد. همان گونه که قابل پیش بینی بود در ابتدای دیواره مخروط ناقص، در محلی که حداکثر نازک شدگی رخ می‌دهد، حداکثر تنش وجود دارد. با عبور از گوشه و رسیدن به کف مخروط تنش کاهش می‌یابد. در آزمایش تجربی کرنش آزاد شده پس از ایجاد سوراخ، به ازای هر گام باربرداری ثبت شد (شکل ۷).

با استفاده از کرنش‌های بدست آمده از آزمایش تجربی، تنش پسماند موجود در قطعه و بکارگیری معادلات (۲) تا (۴) که در استاندارد ASTM-E837-92 مشخص شده است، محاسبه می‌گردد.

$$\sigma_{min}, \sigma_{max} = \frac{\epsilon_s + \epsilon_t}{4\bar{A}} \pm \frac{\sqrt{(\epsilon_s - \epsilon_t)^2 + (\epsilon_s + \epsilon_t - 2\epsilon_2)^2}}{4E}$$

)Error!

No text of specified style in document

.

)Error!

No text of specified style in document

.

)Error!

No text of specified style in document

.

$$\bar{A} = -\frac{1+\nu}{2E} \times \bar{a}$$

$$\bar{B} = -\frac{1}{2E} \times \bar{b}$$

نتایج شبیه‌سازی و تجربی نمونه‌ی آزمایش شده

نتایج استخراج شده از نرم افزار آباکوس شامل توزیع جابجایی و توزیع تنش در مسیری که از روی سطح میانی مخروط عبور می‌کند، است. شکل ۵ جابجایی ورق تحت شکل دهی را نشان می‌دهند. کانتور و نمودار بیان گر پر شدن کاملاً یکنواخت قالب است.

شکل ۶ تنش معادل مایسز پسماند ورق تحت شکل-دهی را نشان می‌دهند. در واقع تنش‌های مشخص شده، تنش‌های متوسط در طولی برابر با طول گیج‌ها کرنش سنج استفاده شده در آزمایش عملی است.

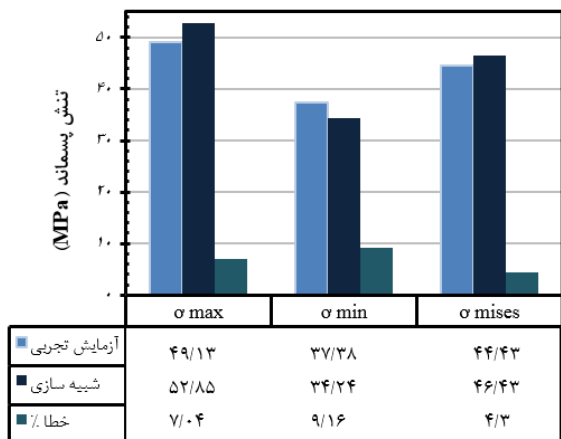
**مقایسه و بحث نتایج شبیه سازی عددی و تجربی**

به دلیل خطاهای ذاتی و محاسباتی در روش های اندازه گیری تنش پسماند (سوراخ کاری مرکزی) و همچنین خطاهای روش المان محدود، نمی توان مقدار کاملاً دقیق تنش پسماند در قطعه را پیش بینی نمود و تنها می توان تخمین قابل قبولی از تنش موجود در قطعه را بدست آورد.

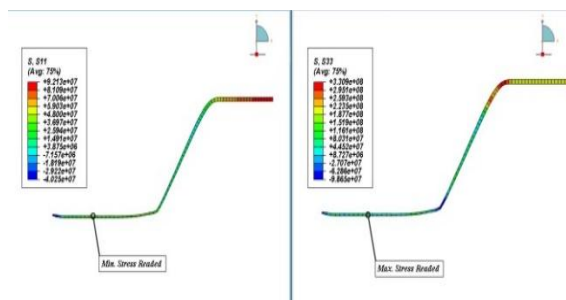
در این قسمت به بررسی و مقایسه نتایج بدست آمده پرداخته خواهد شد. در شکل ۸ تنش های بدست آمده از روش المان محدود و آزمایش تجربی مقایسه شده است.

همان گونه که در شکل ۸ دیده می شود، حداکثر خطای محاسبات المان محدود و آزمایش تجربی برای تنش بیشینه موجود در قطعه ۷٪ می باشد، که نشان دهنده تطابق بسیار خوب این دو روش اندازه گیری می باشد.

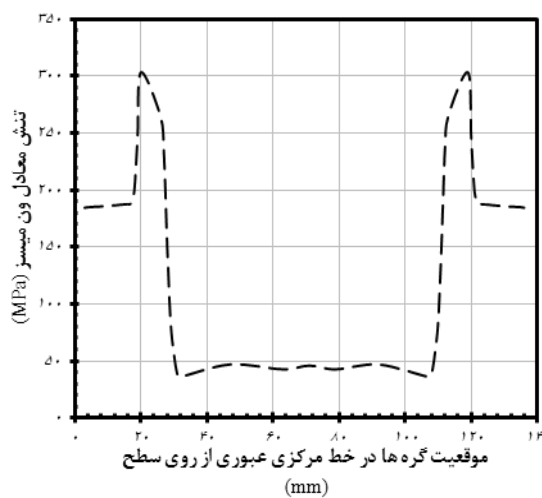
همبلی و همکاران [۱۲] بر روی بهینه سازی الگوریتم فشار در روش شکل دهی داغ ورق توسط دمش گاز مطالعه کردند. آن ها نتایج عددی و تجربی خود مربوط به حداکثر ارتفاع مخروط را با انحراف ۱۲ درصدی بیان نمودند.



شکل ۸ - مقایسه تنش پسماند حاصل از آزمایش تجربی و شبیه سازی

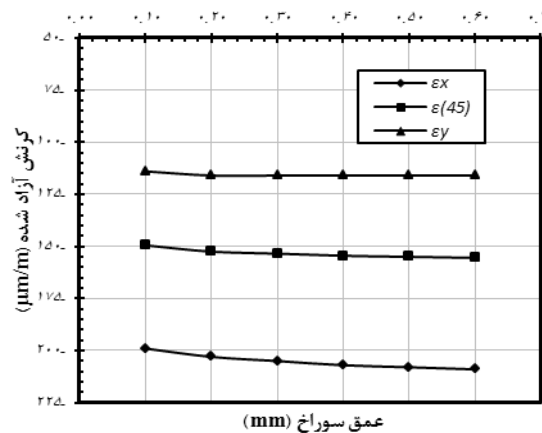


(الف)



(ب)

شکل ۶- (الف) کانتور تنش های اصلی (ب) نمودار تنش معادل مایسز



شکل ۷- نتایج کرنش آزاد شده در آزمایش تجربی



## فهرست علائم

تنش شارش	$\sigma$
نرخ کرنش	$\dot{\epsilon}$
ثابت استحکام	C
ضریب حساسیت تنش شارش به آهنگ کرنش	m
کمینه تنش اصلی، $N/m^2$	$\sigma_{min}$
بیشینه تنش اصلی، $N/m^2$	$\sigma_{max}$
کرنش آزاد شده در جهت i	$\epsilon_i$
مدول الاستیسیته، $N/m^2$	E
ضریب پواسون	$\nu$
ضرایب کالیبراسیون	$\bar{A}, \bar{B}$

می‌توان علل زیر را به عنوان منبع خطا در اندازه‌گیری تنش پسماند به روش سوراخکاری مرکزی نام برد:

- ۱- کرنش‌های آزاد شده در این روش کم است، که یکی از منابع اصلی خطا در روش سوراخکاری مرکزی است؛
- ۲- ایجاد سوراخ سبب تمرکز تنش روی شبکه گسیج می‌شود؛
- ۳- محاسبات روش سوراخکاری مرکزی بر اساس تنش صفحه‌ای است؛
- ۴- خطا در خواندن کرنش.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تنش‌های پسماند در روش نوین شکل‌دهی داغ ورق آلیاژ آلومینیوم توسط گاز، در شرایط تست عملی و تحلیل المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل المان محدود فرایند شکل‌دهی داغ فلز توسط گاز در نرم افزار آباکوس نشان داد که تطابق قابل قبول میان نتایج حاصل از آزمایش تجربی و تحلیل المان محدود منطبق بر شرایط آزمایش تجربی، برقرار می‌باشد. هم‌چنین می‌توان از نتایج شبیه‌سازی المان محدود، به عنوان روش قابل اطمینانی برای بررسی‌های امکان‌پذیری، تعیین شرایط و پارامترهای موثر فرایند استفاده نمود.

materials", Springer, New York, 2007.

6- D.Wilson, "Aluminum versus Steel in the Family Car-the Formability Factor", Journal of Mechanical Work Technology, Vol. 16, pp. 257-277, 1988.

7- J.S. Tang, Y.K. Fuh and S. Lee, "Superplastic forming process applied to aero-industrial strakelet: "wrinkling, thickness, and microstructure analysis", Journal of Advance Manufacturing Technology, pp. 279-291, 2014.

8- H.Yu Wu and T. M. Da, "Modified male die rapid gas blow forming of fine-grained Mg alloy AZ31B thin sheet", Journal of Advance Manufacturing Technology, pp. 1329-1338, 2015.

9- M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji and M. Elyasi, "Developments in sheet hydroforming for complex industrial parts", Metal Forming,

## References:

- 1- S. Toros, F. Ozturk and I. Kacar, "Review of Warm Forming of Aluminum-Magnesium Alloys", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 207, October, pp. 1-15, 2008.
- 2- F. Shehata, M.J. Painter and R. Pearce, "Warm Forming of Aluminum/Magnesium Alloy Sheet", Journal of Mechanical Work Technology, Vol. 2, pp. 279-291, 1978.
- 3- D. Sorgente and L. Tricarico, "Pressure Profile Designing in Superplastic Forming Based on the Strain Rate and on Post-forming Properties", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol 23, pp. 2025-2033, 2014.
- 4- N.J. Nieh, J. Wadsworth and O.D. Sherby, "Superplasticity in Metals and Ceramics", Cambridge University Press, New York, 1997.
- 5- J. Roesler, H. Harders and M. Baeker, "Mechanical behaviour of engineering

Vol. 3, pp. 55-84, 2012.

10- Hosford W. F., "Fundamentals of Engineering Plasticity", Cambridge University Press, New York, 1997.

11- P.F. Bariani, "Hot Stamping of AA5083 Aluminum Alloy Sheets", Journal of Manufacturing Technology, Vol. 63, pp. 251-254, 2013.

12- R. Hambli, A. Potiron, F. Guerin and B. Dumon, "Numerical Pressure Prediction Algorithm of Superplastic Forming Proceed Using 2D and 3D Modles", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 112, October, pp. 83-90, 2004.