

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشکده‌ی مهندسی مکانیک  
رشته مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مطالعه‌ی عددی و تجربی لبه‌دار کردن ورق‌های فلزی با استفاده از فرآیند شکل‌دهی نموی

نگارنده

رضا سعیدنژاد

استاد راهنما

دکتر سید هادی قادری

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۳۰۲۸۶/۱۳۹  
تاریخ: ۹۶/۸/۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای رضا سعیدنژاد با شماره دانشجویی ۹۳۰۹۴۶۴ رشته مهندسی مکانیک - ساخت و تولید تحت عنوان مطالعه عددی و تجربی لبه دار کردن ورق های فلزی با استفاده از فرایند شکل دهی نموی که در تاریخ ۹۶/۶/۲۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۹۰٪ درجه مکمل)  مردود   
نوع تحقیق: نظری  عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر سید هادی قادری	۱- استاد راهنمای اول
			۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر هادی پروز	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر سید وحید حسینی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر مهدی وحدتی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



## تقدیم‌نامه

این پایان‌نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می‌نمایم به پدر و مادر مهربان که به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت، محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده‌اند. تقدیم و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند.

تقدیم بہ ہمسفر مہربانم

## سپاس‌گزاری

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود. اکنون بر خود لازم می‌دانم از راهنمایی‌های جناب دکتر قادری کمال تشکر و قدردانی را نمایم که در مراحل متعدد پایان‌نامه همراه همیشگی بنده بودند. همچنین از تمامی اساتید و مسئولان فرزانه و فرهیخته که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و معرفت و فضائل اخلاقی یاری نموده‌اند تقدیر و تشکر نمایم. در انتها لازم می‌دانم از زحمات جناب آقای پولادسنج، مرکز فنی و حرفه‌ای شاهرود که در تمامی مراحل مرا یاری نمودند تشکر نمایم. خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کهن‌سال عنایت فرما.

## تعهد نامه

اینجانب رضا سعیدنژاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-ساخت و تولید دانشکده مهندسی

مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه:

### مطالعه‌ی عددی و تجربی لبه‌دار کردن سوراخ ورق فلزی با استفاده از فرآیند شکل‌دهی

#### تدریجی

تحت راهنمایی دکتر سید هادی قادری متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا چینی‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

#### تاریخ

#### امضای دانشجو

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.





## چکیده

شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای یک روش جدید برای نمونه‌سازی سریع قطعات ورقی، بدون نیاز به قالب و تجهیزات گران‌قیمت است. این فن‌آوری، به دلیل هزینه کم و سرعت بالا، برای تولید نمونه‌ی اولیه قطعات ورقی پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مسائل مهم در شکل‌دهی تدریجی کنترل نازک‌شدگی ورق می‌باشد. این پایان‌نامه، اثر پنج راهبرد مختلف مسیر حرکت ابزار را بر ضخامت و ارتفاع دیواره در فرایند لبه‌کاری تدریجی ورق آلیاژ آلومینیوم AA1060 و AA3105، به روش شبیه‌سازی اجزای محدود و تجربی مطالعه می‌کند. توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره به‌دست آمده از شبیه‌سازی المان محدود با سه مسیر ابزار مارپیچ استوانه، مارپیچ مخروط با شعاع قاعده ثابت و متغیر در سرعت ثابت شکل‌دهی، در مطابقت قابل قبولی با نتایج تجربی پژوهش‌های پیشین می‌باشد. سپس دو راهبرد جدید مسیر ابزار شامل مارپیچ نمایی برای لبه‌کاری ورق در تحلیل المان محدود و کار آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این دو روش نشان می‌دهند با به‌کارگیری این دو راهبرد جدید، می‌توان شکل‌پذیری ورق را افزایش داد به نحوی که در سرعت شکل‌دهی ثابت، توزیع ضخامت ۲۵٪ بهبود می‌یابد. نیز، ارزیابی نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی و روش تجربی در سرعت شکل‌دهی ثابت و متغیر نشان می‌دهد که سرعت ثابت شکل‌دهی توزیع ضخامت یکنواخت‌تری را ایجاد می‌نماید. همچنین، مطالعه تاثیر قطر ابزار در لبه‌کاری تدریجی نشان داد با افزایش قطر ابزار، توزیع ضخامت یکنواخت‌تر و ارتفاع لبه بیشتری حاصل می‌شود.

**واژگان کلیدی:** شکل‌دهی تدریجی، لبه‌کاری ورق فلزی، روش المان محدود، راهبرد مسیر ابزار، نازک‌شدگی ورق فلزی.

## مقالات مستخرج از پایان نامه/رساله

- ۱- رضاسعیدنژاد، سیده‌ادی قادری، شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند لبه‌دار کردن سوراخ ورق فلزی به کمک شکل‌دهی تدریجی. بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی سالانه مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۶.

## فهرست عنوان‌ها

### فصل ۱ مقدمه..... ۱

- ۱-۱- فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی..... ۱
- ۲-۱- تعاریف..... ۲
- ۳-۱- استفاده از روش‌های نوین در شکل‌دهی ورق‌های فلزی..... ۵
- ۴-۱- شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی..... ۶
- ۱-۴-۱- لبه‌کاری ورق‌های فلزی با استفاده از شکل‌دهی تدریجی..... ۷
- ۲-۴-۱- کاربردها..... ۷
- ۳-۴-۱- مزایا و معایب شکل‌دهی تدریجی برای ایجاد لبه در ورق‌های فلزی..... ۸
- ۵-۱- مروری بر تحقیقات پیشین..... ۸
- ۶-۱- ساختار پایان‌نامه..... ۱۱

### فصل ۲ شبیه‌سازی اجزای محدود..... ۱۳

- ۱-۲- نرم‌افزار آباکوس..... ۱۳
- ۲-۲- شبیه‌سازی فرآیند در نرم‌افزار آباکوس..... ۱۴
- ۱-۲-۲- مدل هندسی ورق‌های فلزی..... ۱۵
- ۲-۲-۲- مشخصات و خواص مکانیکی ورق..... ۱۶
- ۳-۲-۲- تعیین نوع تماس سطوح اجزای باهم..... ۱۶
- ۴-۲-۲- شرایط مرزی و تعیین مسیر ابزار..... ۱۷
- ۵-۲-۲- مطالعه‌ی همگرایی مش..... ۲۲
- ۶-۲-۲- مدل‌سازی ورق‌های FML..... ۲۴

### فصل ۳ آزمایش‌های تجربی..... ۲۵

- ۱-۳- ورق فلزی..... ۲۵
- ۲-۳- آزمون کشش..... ۲۵
- ۳-۳- شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق..... ۲۶
- ۱-۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها..... ۲۶
- ۲-۳-۳- ابزار شکل‌دهی..... ۲۷
- ۳-۳-۳- قالب شکل‌دهی..... ۲۸
- ۴-۳- ماشین تراش کنترل عددی..... ۳۰
- ۵-۳- ساخت ورق‌های دولایه فلزی الیاف‌دار..... ۳۱
- ۱-۵-۳- معرفی مواد و تجهیزات مورد نیاز برای ساخت FML..... ۳۲

۳۲	..... ۳-۵-۲- قالب و اجزای آن
۳۴	..... ۳-۵-۳- الیاف شیشه
۳۴	..... ۳-۵-۴- ورق فلزی
۳۵	..... ۳-۵-۵- ورق پلی اورتان
۳۶	..... ۳-۵-۶- ساخت ورق های FML

## فصل ۴ نتایج و بحث..... ۳۹

۳۹	..... ۴-۱- مقدمه
۳۹	..... ۴-۲- نتایج شبیه سازی اجزای محدود
۳۹	..... ۴-۲-۱- ارزیابی نتایج شبیه سازی اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی کویی [۴]
۴۳	..... ۴-۲-۲- تأثیر قطر ابزار شکل دهی بر توزیع ضخامت
۴۴	..... ۴-۲-۳- تأثیر راهبردهای مسیر ابزار در توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره
	..... ۴-۲-۴- نتایج توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در مسیر ابزار پیوسته با سرعت ثابت و سرعت متغیر
۵۸	..... ابزار
۶۰	..... ۴-۲-۵- نتایج جدایش لایه ها در ورق های FML
۶۱	..... ۴-۳- نتایج آزمایش های تجربی
۶۱	..... ۴-۳-۱- نتایج آزمون کشش تک محوره
۶۳	..... ۴-۳-۲- بررسی تجربی تأثیر راهبردهای مسیر ابزار در توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره
۶۴	..... ۴-۳-۳- بررسی تأثیر کیفیت سطح و دقت لبه سوراخ اولیه ایجاد شده
۶۵	..... ۴-۳-۴- تأثیر روانکار بر کیفیت سطح ایجاد شده
۶۶	..... ۴-۳-۵- تأثیر سرعت شکل دهی بر خرابی لبه ورق های FML و ارتفاع دیواره ورق های فلزی
۶۷	..... ۴-۳-۶- بررسی تأثیر جهت دوران بر ارتفاع دیواره ایجاد شده
۶۸	..... ۴-۳-۷- بررسی قطر سوراخ اولیه بر ارتفاع ایجاد شده و خرابی لبه دیواره

## فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها..... ۷۱

۷۱	..... ۵-۱- نتیجه گیری
۷۲	..... ۵-۲- پیشنهادها

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ شکل دهی تدریجی (الف)- تک نقطه‌ای (ب)- با پشتیبان اضافی (شکل دهی دو نقطه‌ای)..... ۲
- شکل ۲-۱ توزیع کرنش در دیواره ورق فلزی شکل دهی شده..... ۳
- شکل ۳-۱ انواع مسیر حرکت ابزار پیوسته و ناپیوسته. (الف)- مارپیچ استوانه‌ای (ب)- مارپیچ مخروطی (ج)- مخروط ناپیوسته (پروفیلی) (د)- استوانه ناپیوسته..... ۴
- شکل ۴-۱ چیدمان ورق‌های چندلایه کامپوزیتی..... ۵
- شکل ۵-۱: کاربردهای لبه‌کاری در ورق‌های فلزی در صنعت خودروسازی [۹]..... ۸
- شکل ۱-۲ (الف) مدل هندسی و (ب) ابعاد قالب، ابزار، ورق‌گیر و ورق..... ۱۵
- شکل ۲-۲ راهبردهای مسیر ابزار (الف)- راهبرد ۱ مسیر ابزار (ب)- راهبرد ۲ مسیر ابزار (ج)- راهبرد ۳ مسیر ابزار (د)- راهبرد ۴ مسیر ابزار (ه)- راهبرد ۵ مسیر ابزار..... ۱۹
- شکل ۳-۲ پارامترهای مسیر حرکت ابزار..... ۲۰
- شکل ۴-۲ تغییرات نیروی شکل‌دهی در طی فرایند برای تعداد المان‌های مختلف در مطالعه همگرایی مش..... ۲۳
- شکل ۵-۲ روش‌های ایجاد گره‌ها و المان‌بندی در نرم‌افزار آباکوس (الف)- المان‌بندی با فاصله یکنواخت (ب)- المان‌بندی با فاصله غیر یکنواخت..... ۲۳
- شکل ۱-۳ نمونه استاندارد ASTM-E8 برای آزمون کشش..... ۲۶
- شکل ۲-۳ دستگاه آزمون کشش اینسترون ۸۸۰۲..... ۲۶
- شکل ۳-۳ (الف) ورق فلزی قبل از شکل‌دهی تدریجی (ب) ورق فلزی بعد از شکل‌دهی تدریجی..... ۲۷
- شکل ۴-۳ ابزار صلب سرکروی کارباید تنگستن با ابزارگیر مخصوص تراش CNC..... ۲۸
- شکل ۵-۳ مونتاژ شده قالب شکل‌دهی تدریجی..... ۲۸
- شکل ۶-۳ طرح‌واره‌ی اجزای قالب به صورت سه بعدی..... ۳۰
- شکل ۷-۳ دستگاه تراش CNC سه محور مدل D-802..... ۳۱
- شکل ۸-۳ حین عملیات شکل‌دهی تدریجی برای ایجاد لبه در ورق فلزی..... ۳۱

- شکل ۳-۹ اجزای پرس گرم هیدرولیک و قالب آن..... ۳۳
- شکل ۳-۱۰ اجزای قالب گرمکار برای ساخت ورق‌های FML..... ۳۳
- شکل ۳-۱۱ انواع الیاف شیشه دو جهته برای ساخت ورق FML..... ۳۴
- شکل ۳-۱۲ سطح ورق آلومینیومی پس از سمباده زدن و زبر کردن..... ۳۵
- شکل ۳-۱۳ نحوه قرارگیری لایه‌ها در قالب برای ساخت ورق FML..... ۳۶
- شکل ۳-۱۴ مراحل ساخت ورق FML در دما و فشار بالا..... ۳۶
- شکل ۳-۱۵ مواد اضافی اطراف ورق FML پس از خروج از قالب..... ۳۸
- شکل ۴-۱ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد مسیر ۱ ابزار با سرعت ثابت..... ۴۱
- شکل ۴-۲ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد مسیر ۲ ابزار با سرعت ثابت..... ۴۱
- شکل ۴-۳ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد مسیر ۳ ابزار با سرعت ثابت..... ۴۲
- شکل ۴-۴ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد مسیر ۲ و ۴ ابزار با سرعت ثابت..... ۴۲
- شکل ۴-۵ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد مسیر ۳ و ۵ ابزار با سرعت ثابت..... ۴۳
- شکل ۴-۶ اثر قطر ابزار بر توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره با استفاده از راهبرد مسیر ۱ ابزار..... ۴۴
- شکل ۴-۷ مسیرهای تحلیل برای بررسی توزیع ضخامت در دیواره ایجاد شده..... ۴۵
- شکل ۴-۸ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره پنج راهبرد مسیر ابزار در شبیه‌سازی اجزای محدود با سه مرحله شکل‌دهی..... ۴۶
- شکل ۴-۹ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره پنج راهبرد مسیر ابزار در شبیه‌سازی اجزای محدود با شش مرحله شکل‌دهی..... ۴۶
- شکل ۴-۱۰ توزیع ضخامت در شش مرحله شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی با راهبرد مسیر ۱ ابزار..... ۴۷
- شکل ۴-۱۱ توزیع ضخامت در شش مرحله شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی با راهبرد مسیر ۲ ابزار..... ۴۸
- شکل ۴-۱۲ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در سه مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۱ مسیر ابزار..... ۴۹
- شکل ۴-۱۳ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۱ مسیر ابزار..... ۴۹
- شکل ۴-۱۴ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در سه مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۲ مسیر ابزار..... ۵۰

- شکل ۴-۱۵ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۲ مسیر ابزار..... ۵۱
- شکل ۴-۱۶ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در سه مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۳ مسیر ابزار..... ۵۲
- شکل ۴-۱۷ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۳ مسیر ابزار..... ۵۲
- شکل ۴-۱۸ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در سه مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۴ مسیر ابزار..... ۵۳
- شکل ۴-۱۹ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۴ مسیر ابزار..... ۵۳
- شکل ۴-۲۰ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در سه مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۵ مسیر ابزار..... ۵۴
- شکل ۴-۲۱ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۵ مسیر ابزار..... ۵۵
- شکل ۴-۲۲ توزیع ضخامت در ورق شکل‌دهی شده (الف)-توزیع ضخامت در راهبرد مسیر ۱ ابزار (ب)-  
توزیع ضخامت در راهبرد مسیر ۲ ابزار(ج)- توزیع ضخامت در راهبرد مسیر ۳ ابزار (د)- توزیع ضخامت  
در راهبرد مسیر ۴ ابزار (ه)- توزیع ضخامت در راهبرد مسیر ۵ ابزار..... ۵۷
- شکل ۴-۲۳ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۱ مسیر ابزار در سرعت‌های  
ثابت و متغیر ابزار شکل‌دهی..... ۵۸
- شکل ۴-۲۴ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۲ مسیر ابزار در سرعت‌های  
ثابت و متغیر ابزار شکل‌دهی..... ۵۹
- شکل ۴-۲۵ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۳ مسیر ابزار در سرعت‌های  
ثابت و متغیر ابزار شکل‌دهی..... ۵۹
- شکل ۴-۲۶ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۴ مسیر ابزار در سرعت‌های  
ثابت و متغیر ابزار شکل‌دهی..... ۶۰
- شکل ۴-۲۷ مدل شبیه‌سازی اجزای محدود ورق‌های FML..... ۲۴
- شکل ۴-۲۸ شبیه‌سازی جدایی المان‌های چسب از ورق فلزی در نرم‌افزار آباکوس..... ۶۰
- شکل ۴-۲۹ منحنی تنش-کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیوم AA3105..... ۶۱
- شکل ۴-۳۰ منحنی نیرو-جابجایی در آزمون کشش ورق فلزی آلیاژ آلومینیوم AA3105..... ۶۲

### شکل ۴-۳۱ منحنی نیرو-جابجایی در آزمون کشش ورق‌های FML ۶۳

شکل ۴-۳۲ نمونه‌های FML پس از آزمون کشش..... ۶۳

شکل ۴-۳۳ نتایج تجربی توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در پنج راهبرد مسیر ابزار با سه مرحله شکل‌دهی. ۶۴

شکل ۴-۳۴ نتایج تجربی توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در پنج راهبرد مسیر ابزار با شش مرحله

شکل‌دهی..... ۶۴

شکل ۴-۳۵ کیفیت سطح سوراخ اولیه بر روی ورق فلزی - الف کیفیت مناسب و پلیسه‌گیری لبه سوراخ

اولیه ب و کیفیت نامطلوب و وجود پلیسه بر روی لبه سوراخ..... ۶۵

شکل ۴-۳۶ بررسی تأثیر روانکار بر کیفیت سطح شکل‌دهی شده الف- بدون استفاده از روانکار ب- استفاده از

روانکار..... ۶۶

شکل ۴-۳۷ تأثیر سرعت شکل‌دهی بر خرابی لبه ایجاد شده (الف) - شکل‌دهی با سرعت ۲۰۰ rev/min

(ب) - شکل‌دهی با سرعت ۱۰۰ rev/min (ج) - شکل‌دهی با سرعت ۵۰ rev/min..... ۶۷

شکل ۴-۳۸ بررسی قطر سوراخ اولیه بر ارتفاع دیواره در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای الف- قطر سوراخ

اولیه ۳۰ mm ب- قطر سوراخ اولیه ۲۶ mm..... ۶۸



## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ مشخصات ورق آلیاژ آلومینیوم AA3105 ..... ۱۶
- جدول ۲-۲: راهبردهای مسیر ابزار و نوع معادله استفاده شده در آن‌ها ..... ۱۹
- جدول ۱-۴ مشخصات ورق آلیاژ آلومینیوم AA1060 [۴] ..... ۴۰
- جدول ۲-۴ پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی اجزای محدود ..... ۴۵
- جدول ۳-۴ تاثیر جهت دوران قالب بر ارتفاع دیواره ..... ۶۸
- جدول ۴-۴ راهبردهای مسیر مختلف ابزار و تاثیر تعداد مراحل شکل‌دهی بر ارتفاع دیواره ..... ۶۹

## فهرست نشانه‌ها

$d_p$	قطر سوراخ اولیه
$d_F$	قطر سوراخ نهایی
$E$	مدول کشسان
$F$	سرعت پیشروی
$h$	ارتفاع دیواره
$i$	مرحله شکل‌دهی
$r$	شعاع
$S$	سرعت دورانی
$t$	زمان
$t_i$	ضخامت اولیه
$t_f$	ضخامت نهایی
$u_x$	جابجایی در راستای $x$
$u_z$	جابجایی در راستای $z$
$u_y$	جابجایی در راستای $y$
$v$	سرعت خطی
$\varepsilon_t$	کرنش ضخامتی
$\varepsilon_l$	کرنش طولی
$\varepsilon_\theta$	کرنش محیطی
$\omega$	سرعت زاویه‌ای
$\nu$	ضریب پواسون
$\theta$	زاویه حرکت ابزار

## فصل ۲ مقدمه

### ۲-۱- فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی

امروزه شکل‌دهی فلزات به‌عنوان یکی از روش‌های مهم در تولید قطعات صنعتی به‌شمار می‌رود. از این‌رو شناخت دقیق‌تر آن، صنعتگران را به سمت تولید قطعات باکیفیت بالاتر سوق می‌دهد. در علم شکل‌دهی، فلزات تحت اثر نیرو شکل می‌گیرند. فرآیندهای شکل‌دهی فلزات به دو دسته شکل‌دهی حجمی<sup>۱</sup> و شکل‌دهی ورق‌های فلزی<sup>۲</sup> تقسیم می‌شود. شکل‌دهی ورق‌های فلزی بر روی قطعاتی انجام می‌شود که نسبت مساحت سطح قطعه به ضخامت آن بزرگ‌تر است و عمده این روش‌ها بر مبنای استفاده از سنبه و ماتریس پایه گذاری شده است. در این فرآیندها، به دلیل سطح تماس گسترده سنبه و ورق، نیروی بسیار زیادی از طرف سنبه و قالب به ورق وارد می‌شود. اعمال نیروی زیاد به ورق فلزی، محدوده شکل‌پذیری آن را به شدت کاهش می‌دهد [۱]. برشکاری، خم‌کاری و کشش عمیق را می‌توان جزء روش‌های سنتی شکل‌دهی ورق‌های فلزی نام برد که این روش‌ها عموماً برای تولید با حجم بالا است و در بیشتر موارد نیاز به ابزارها و تجهیزات پیچیده و گران‌قیمت می‌باشد.

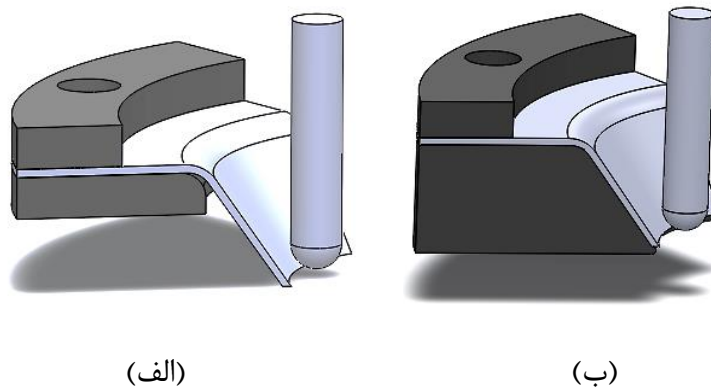
---

<sup>1</sup> Bulk Metal Forming

<sup>2</sup> Sheet Metal Forming

## ۲-۲- تعاریف

در فرآیندی که با حرکت تدریجی و برنامه‌ریزی شده، ابزار در یک مسیر خاص، تغییر فرم موردنظر در ورق فلزی را به صورت موضعی ایجاد کند اصطلاحاً فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق با استفاده از دستگاه فرز یا تراش CNC سه محوره یا چند محوره می‌تواند انجام شود. حال فرایند شکل‌دهی تدریجی از لحاظ تعداد نقاط تماس بین ابزار، ورق و قالب خود به دو روش تک نقطه‌ای<sup>۲</sup> و دو نقطه‌ای<sup>۳</sup> تقسیم می‌شود. هرگاه از هیچ پشتیبانی در شکل‌دهی استفاده نشود و تماس ورق با ابزار در یک نقطه باشد به آن شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای گویند (شکل ۱-۱-الف)) و هرگاه از پشتیبانی در شکل‌دهی استفاده شود و ورق در هنگام شکل‌دهی، تحت تاثیر دو نقطه باشد به آن شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای ورق فلزی گویند. شکل ۱-۱-الف) شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای و شکل ۱-۲-ب) شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای را نشان می‌دهد [۲ و ۳].



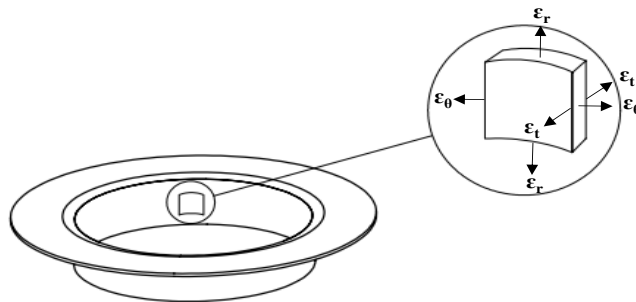
شکل ۱-۲ شکل‌دهی تدریجی (الف)- تک نقطه‌ای (ب)- با پشتیبان اضافی (شکل‌دهی دو نقطه‌ای).

<sup>۱</sup> Incremental Sheet Forming (ISF)

<sup>۲</sup> Single Point Incremental Forming (SPIF)

<sup>۳</sup> Two Point Incremental Forming (TPIF)

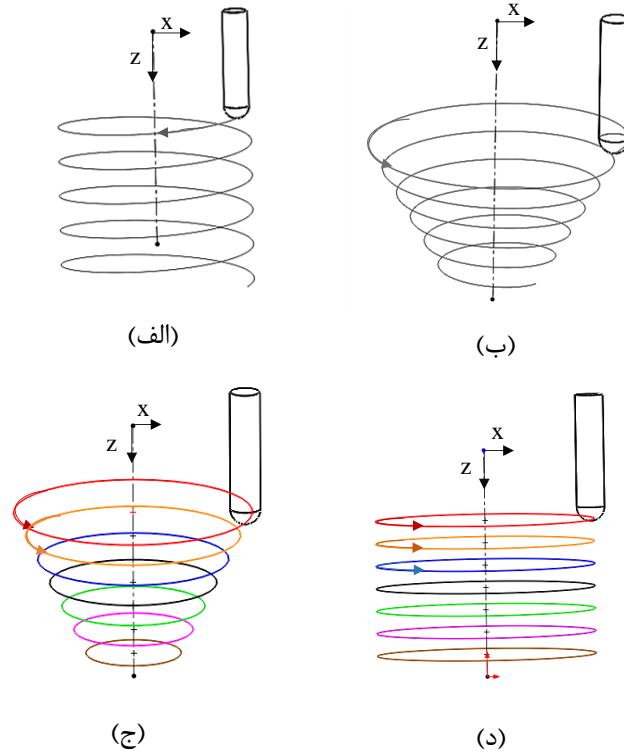
هرگاه از دو انتها، ورق فلزی را ثابت نگاه داریم و با ابزار شکل‌دهی نیرویی بر روی ورق فلزی اعمال کنیم به صورتی که ورق تنها کش آید و کرنش شعاعی  $\epsilon_r$  و کرنش ضخامتی  $\epsilon_t$  در آن ایجاد شود، به آن کش آمدن<sup>۱</sup> ورق گویند. در کش آمدن کرنش‌های بیشتری در ورق مشاهده می‌شود و درصد کاهش ضخامت قابل توجه می‌باشد. در فرآیند شکل‌دهی تدریجی کرنش ضخامتی  $\epsilon_t$  زیادی نسبت به کرنش‌های محیطی  $\epsilon_\theta$  به دلیل تغییر شکل موضعی بر روی ورق وجود دارد و میزان نازک شدگی ورق اهمیت بسزایی دارد. اما در خم شدن ورق کرنش ضخامتی  $\epsilon_t$  و کرنش محیطی  $\epsilon_\theta$  کمتری وجود دارد بنابراین کاهش ضخامت ورق ناچیز می‌باشد. افزایش کرنش محیطی  $\epsilon_\theta$  و کرنش شعاعی  $\epsilon_r$  باعث کاهش ضخامت در ورق می‌شود. باید در نظر داشت که در نهایت مجموع این سه کرنش صفر می‌شود [۴]. در خم شدن ورق کرنش ضخامتی  $\epsilon_t$  ناچیز و عموماً در قسمت شعاع قالب ایجاد می‌شود. شکل ۱-۲ توزیع کرنش را در راستای شعاعی، محیطی و ضخامتی نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲ توزیع کرنش در دیواره ورق فلزی شکل‌دهی شده.

حرکت مسیر ابزار برای شکل‌دهی تدریجی می‌تواند به صورت حرکت مارپیچ پیوسته و حرکت به صورت ناپیوسته یا حرکت پروفیلی باشد (شکل ۱-۳). شکل ۱-۳ (الف) و (ب) حرکت مارپیچ پیوسته ابزار به صورت پیوسته در راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  مسیر را تا انتها طی می‌کند می‌توان گفت که ابزار هم‌زمان در سه بعد حرکت می‌کند. اما در روش مسیر ناپیوسته، ابزار به صورت پلکانی و پروفیلی تعریف شده و ناپیوسته مسیر را طی می‌کند. ابزار یک دور در راستای  $x$  و  $y$  حرکت می‌کند و سپس در راستای  $z$ ، یک گام جابجا می‌شود (شکل ۱-۳-ج) و (د) [۳].

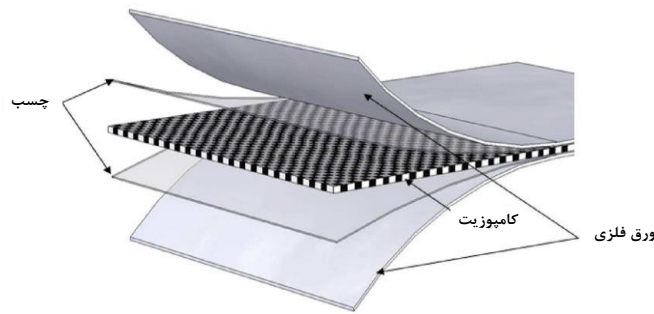
<sup>۱</sup> Stretch



شکل ۲-۳ انواع مسیر حرکت ابزار پیوسته و ناپیوسته. (الف) - مارپیچ استوانه‌ای (ب) - مارپیچ مخروطی (ج) - مخروط ناپیوسته (پروفیلی) (د) - استوانه ناپیوسته.

به‌طور کلی<sup>۱</sup> FML نوعی ساختار کامپوزیت ترکیبی هستند که از به هم چسبیدن ورق‌های نازک آلیاژهای فلزی و لایه‌های مواد کامپوزیت به‌همراه مقداری چسب به وجود آمده‌اند. FML ها نسبت به ورق‌های فلزی دارای مقاومت خستگی و مقاومت در برابر ضربه‌های بالاتری هستند [۵]. لذا امروزه به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است. شکل ۲-۴ چیدمان ورق‌های چندلایه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Fiber Metal Laminate (FML)



شکل ۲-۴ چیدمان ورق‌های چندلایه کامپوزیتی

### ۲-۳- استفاده از روش‌های نوین در شکل‌دهی ورق‌های فلزی

امروزه با توجه به گسترش صنایع پیشرفته، تولید تجهیزات فلزی با استفاده از فناوری‌های نوین اهمیت ویژه‌ای یافته است. در میان تجهیزات صنعتی، قطعات پوسته‌ای شکل به دلیل کاربردهای متعدد و بروز چالش‌های جدی در حین عملیات شکل‌دهی توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. افزایش تنوع در تقاضای مشتریان، تولید در دسته‌های کوچک و نمونه‌سازی سریع منجر به یک چالش جدید در صنایع شکل‌دهی برای ماندگاری در میدان رقابت شده است. صنعت ساخت به دنبال پیدا کردن روشی برای افزایش انعطاف‌پذیری فرآیند و همچنین نیاز کمتر به ابزار و تجهیزات برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی با سرعت بالا می‌باشد. به‌منظور کاهش نیروهای اعمال‌شده به ورق فلزی، افزایش محدوده شکل‌پذیری ورق، تولید قطعات با ضخامت‌های نازک و با شکل‌های پیچیده و نامتقارن، استفاده از فرآیندهای نوین در شکل‌دهی ورق‌های فلزی امری اجتناب‌ناپذیر است [۶ و ۷]. نحوه طراحی این فرآیند جدید به‌گونه‌ای است که از بروز بسیاری از معایب و محدودیت‌ها در حین عملیات شکل‌دهی جلوگیری می‌کند.

از طرفی روش‌های جدید شکل‌دهی به‌سوی کاهش هزینه‌ها و حداقل رساندن زمان تولید قطعات تمایل دارند. بنابراین برای افزایش تنوع در تولید و رقابت در صنعت، علم و دانش فنی روش‌های نوین شکل‌دهی در مرحله اول ضروری می‌باشد. امروزه استفاده از رایانه در فرآیندهای تولید، روش‌های جدیدی مانند شکل‌دهی تدریجی را ممکن ساخته است. فرآیند شکل‌دهی تدریجی یکی از روش‌های شکل‌دهی است که

به دلیل عدم نیاز به تجهیزات و قالب خاص، برای تولید قطعات با تعداد کم و محصولات سفارشی و همچنین مدل‌سازی مورد توجه قرار گرفته و تلاش‌های زیادی برای بهبود این فرآیند انجام شده است [۷].

## ۲-۴- شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی روش‌های شکل‌دهی تدریجی و انواع مختلف ورق‌های مورد استفاده در آنها از سوی محققان صورت گرفته است. در روش‌های متداول و سنتی شکل‌دهی ورق‌ها، از قالب و پانچ استفاده می‌شود که برای ساخت قطعات پیچیده و یا برای نمونه اولیه مقرون به‌صرفه نیستند [۳]. فرآیند شکل‌دهی تدریجی، یکی از روش‌های شکل‌دهی انعطاف‌پذیر جهت تولید انواع قطعات از ورق‌های فلزی است که ورق فلزی به تدریج با حرکت ابزار استوانه‌ای سرکروی در امتداد مسیرهای طراحی شده به وسیله ماشین کنترل عددی رایانه‌ای<sup>۱</sup> تغییر شکل موردنظر در ورق را به وجود می‌آورد [۷]. در ISF با توجه به اینکه ورق به‌صورت موضعی شکل‌دهی می‌شود، انعطاف‌پذیری فرآیند زیاد می‌شود. این روش برای شرکت‌هایی که در بازارهای جهانی رقابت می‌کنند از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا در روش شکل‌دهی تدریجی می‌توان با کمترین هزینه و انعطاف‌پذیری بالا در تولید، برای ساخت قطعاتی از جنس ورق‌های فلزی اقدام نمود و از بروز بسیاری از محدودیت‌ها در شکل‌دهی جلوگیری کرد. از طرفی برای ساخت نمونه اولیه قطعات صنعتی، طراحی قالبی با تجهیزات آن مقرون به‌صرفه نمی‌باشد. یکی دیگر از برتری‌های این روش بر سایر روش‌های موجود، انجام فرآیند شکل‌دهی بدون نیاز به قالب‌های گران قیمت و تنها با استفاده از یک ابزار ساده‌ی سرکروی و یک دستگاه CNC می‌باشد. در این روش از شکل‌دهی ورق‌های فلزی، ابزاری برای شکل‌دهی و نگه‌دارنده‌ای برای ثابت نمودن ورق وجود دارد. همچنین طراحی قالب حذف شده به‌صورتی که طراحی هندسه قطعه تغییر یابد، کافی است مسیر ابزار داده شده به ماشین CNC تغییر کند که در نتیجه نیازی به صرف زمان و هزینه زیاد برای طراحی قالب نیست.

<sup>۱</sup> Computer Numerical Control (CNC)



## ۲-۴-۱- لبه‌کاری<sup>۱</sup> ورق‌های فلزی با استفاده از شکل‌دهی تدریجی

لبه‌کاری سوراخ بر روی ورق‌های فلزی یکی دیگر از عناصر مهم و کاربردی برای افزایش استحکام و یا افزایش صلبیت آنها می‌باشد. همچنین از این روش برای سهولت در انجام مونتاژ قطعات صنعتی و یا به‌عنوان راهنما برای مونتاژ از آن‌ها استفاده می‌شود. این عملیات بر روی ورق‌های فلزی با سوراخ اولیه معمولاً با استفاده از قالب‌های اختصاصی انجام می‌شود که نیازمند صرف هزینه و زمان می‌باشد. این فرآیند با استفاده از روش شکل‌دهی تدریجی به دلیل کوچک بودن ابزار و تغییر شکل موضعی و همچنین چند مرحله‌ای بودن فرآیند، می‌تواند ارتفاع دیواره و قطر سوراخ نهایی ورق را بدون قالب مخصوص کنترل نماید. در این فرآیند جدید می‌توان به حداکثر نسبت شکل‌دهی و ضخامت یکنواخت در دیواره ایجاد شده با شکل‌های متقارن رسید. همچنین در شکل‌دهی ورق‌های فلزی و لبه‌کاری میزان نازک شدگی بر استحکام و کیفیت قطعات تأثیر می‌گذارد در نتیجه شکل‌دهی تدریجی می‌تواند به‌طور مؤثر میزان نازک شدگی ورق را با انتخاب پارامترهای مناسب کنترل نماید و قطعه‌ای با کمترین عیب و با سرعت بالایی تولید شود [۳].

## ۲-۴-۲- کاربردها

از روش ISF در ساخت سریع انواع قطعات اعم از قطعات مربوط به صنایع خودرویی، پزشکی و ... استفاده شده است [۹]. شکل ۲-۵ کاربردهای لبه‌کاری در ورق‌های فلزی برای صنایع خودرو سازی را نشان می‌دهد. فرآیند لبه‌کاری ورق‌های فلزی یکی از روش‌های شکل‌دهی است که به‌طور وسیعی در صنایع خودروسازی، هوانوردی و فضاوردی استفاده می‌شود [۴]. در این صنایع قطعاتی با دیواره و یا لبه شکل‌دهی شده، وجود دارد که برای افزایش استحکام قطعات و یا صلبیت ورق ساخته شده است. همچنین لبه‌کاری قطعات فلزی در شکل‌دهی ورق‌ها بسیار دیده می‌شود که عموماً برای از بین بردن تمرکز تنش در لبه ورق و سوراخ‌ها استفاده می‌شود. شکل‌دهی بعضی از مواد اولیه استفاده شده در این صنایع، به‌دلیل جنس ورق و نازک بودن آن و یا دارای استحکام تسلیم بالا ورق و یا به‌دلیل شکل پیچیده آن‌ها بسیار دشوار می‌باشند و به‌راحتی به‌وسیله فرآیندهای سنتی قابل شکل‌دهی نیستند [۴ و ۹]. فرآیند شکل‌دهی تدریجی به دلیل تغییر شکل موضعی قطعه، قابلیت

<sup>۱</sup> Hole-flanging

شکل‌دهی اشکال پیچیده و نازک را افزایش می‌دهند. امروزه شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی به دلیل اهمیت آن در صنایع برای رقابت و انعطاف‌پذیری در تولید، در حال توسعه است.



شکل ۲-۵: کاربردهای لبه‌کاری در ورق‌های فلزی در صنعت خودروسازی [۹].

### ۲-۴-۳- مزایا و معایب شکل‌دهی تدریجی برای ایجاد لبه در ورق‌های فلزی

هزینه کم فرآیند، قابلیت شکل‌پذیری بهتر، ابزارهای ساده بدون نیاز به قالب‌های اختصاصی برای هر مرحله از شکل‌دهی، انعطاف‌پذیری در فرآیند، نیروی پایین شکل‌دهی به دلیل تغییر شکل موضعی را می‌توان از مزایای شکل‌دهی تدریجی نام برد. عیب نازک شدگی ورق را در روش شکل‌دهی تدریجی، با کنترل پارامترها مخصوصاً مسیر ابزار مناسب می‌توان به حداقل رساند [۳]. همچنین تحقیقات زیادی بر روی شکل‌پذیری ورق با روش شکل‌دهی تدریجی در مواد مختلف از جمله آلیاژهای آلومینیوم و مس و ... بررسی شده است [۱۰ و ۱۱] و به این نتیجه رسیدند که شکل‌پذیری در این روش، بیشتر از سایر فرآیندهای سنتی شکل‌دهی در ورق‌های فلزی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین موارد در شکل‌دهی ورق‌های فلزی به حداقل رساندن تغییرات ضخامت و یا توزیع ضخامت یکنواخت در طول فرآیند می‌باشد. کیفیت سطح نامناسب، چند مرحله بودن شکل‌دهی برای جداره با شیب‌های زیاد و برگشت فنری و همچنین زمان طولانی پروسه را می‌توان از معایب این فناوری نام برد.

### ۲-۵- مروری بر تحقیقات پیشین

ایده اولیه شکل‌دهی تدریجی در کشور آمریکا و توسط لسزاک [۱۲] در سال ۱۹۶۷ به صورت اختراع ثبت شد. به دلیل محدودیت ماشین‌های کنترل‌عددی در آن زمان، این روش چندان مورد استقبال واقع نشد تا اینکه در

اوایل سال‌های ۱۹۹۰ و مخصوصاً در کشور ژاپن مورد توجه قرار گرفت. ماتسوبارا [۱۱] در سال ۱۹۹۴، از این روش برای شکل‌دهی و تولید قطعاتی با ورق‌های فلزی استفاده کرد. شیم و پارک [۱۳] اولین مطالعات را بر روی تعیین منحنی‌های حد شکل‌دهی (FLD) در فرآیند شکل‌دهی تدریجی انجام و با تعیین FLD برای آلیاژ آلومینیوم نشان دادند که میزان شکل‌پذیری در فرآیند شکل‌دهی تدریجی فراتر از روش‌های سنتی است. فراتینی و همکاران [۱۰] قابلیت شکل‌پذیری ورق را در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای مطالعه کردند. آنها نشان دادند که با ضریب کرنش سختی بیشتر قابلیت شکل‌پذیری ورق بیشتر خواهد شد. همچنین نمودار حد شکل‌دهی را ترسیم نموده و پارامترهای آن را بررسی کردند. بامباچ و همکاران [۱۴] قابلیت شکل‌پذیری با یک نگه‌دارنده سازگار<sup>۱</sup> را بررسی کردند. آنها امکان لبه‌دار کردن سوراخ را با روش تدریجی و با سرعت بالا فراهم نمودند و به قابلیت شکل‌پذیری بالایی رسیدند. تان و همکاران [۱۵] از ورق تیتانیومی با استفاده از فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای بر روی پرتز جمجمه انسان، مطالعه کردند. فان و همکاران [۱۶] از گرم کردن الکتریکی برای بالا بردن قابلیت شکل‌پذیری ورق تیتانیوم به روش شکل‌دهی تدریجی استفاده کردند و نشان دادند که با افزایش جریان الکتریکی قابلیت شکل‌پذیری ورق افزایش و همچنین با افزایش نرخ پیشروی و قطر ابزار، شکل‌پذیری ورق کاهش می‌یابد. فیوروتو و همکاران [۱۷] شکل‌دهی ورق کامپوزیت را با استفاده از روش نموی بررسی کردند. آنها توانستند فرآیند شکل‌دهی تدریجی را بر روی ورق کامپوزیت با خواص مکانیکی خوب و همچنین جلوگیری از جدایش لایه‌ها و گوشواره‌ای شدن در لبه دیواره انجام دهند. میرنیا و ملائی داریانی [۱۸] شکل‌دهی تک نقطه‌ای چند مرحله‌ای یک مخروط ناقص با زاویه دیواره  $70^\circ$  از جنس آلیاژ آلومینیوم با هدف کاهش نازک‌شدگی مورد مطالعه قرار دادند. آنها توانستند میزان نازک‌شدگی را از ۷۴٪ در حالت شکل‌دهی تک مرحله‌ای به ۶۰٪ در حالت شکل‌دهی دو مرحله‌ای بهبود یافته، کاهش دهند که نسبت به راهبردهای متداول در حالت‌های دو و سه مرحله‌ای دارای بهبود است. قاسمی و سلطانی [۱۹] به مطالعه برخی پارامترهای موثر بر روی تغییر ضخامت قطعه تغییر شکل یافته و نیروها در فرآیند شکل‌دهی تدریجی پرداختند و نشان دادند که با افزایش سرعت پیشروی نیروی عمودی کاهش می‌یابد و با افزایش سرعت چرخشی

<sup>۱</sup> Adaptive Blank Holder

ابزار نیروی افقی کاهش می‌یابد. همچنین نتیجه گرفتند که با کاهش سرعت چرخشی ابزار توزیع یکنواخت تر ضخامت حاصل می‌شود. وحدتی و همکاران [۲۰] پدیده برگشت فنری را در فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق به صورت شبیه‌سازی اجزای محدود و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش قطر ابزار، افزایش ضخامت ورق و کاهش گام عمودی بیشترین تأثیر را بر روی کاهش برگشت فنری دارد؛ همچنین افزایش سرعت پیشروی و افزایش دور اسپیندل نیز باعث کاهش میزان برگشت فنری می‌شود. شجاعی و همکاران [۲۱] اثر شعاع ابزار در روش شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای برای ورق بدنه خودرو را مطالعه نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که هرچه شعاع ابزار بیشتر شود توزیع ضخامت یکنواخت‌تری حاصل می‌شود و از طرفی افزایش شعاع ابزار باعث کاهش کیفیت سطح ورق به دلیل افزایش اصطکاک در ناحیه شکل‌دهی می‌شود. کارینو و همکاران [۲۲] تأثیر قطر ابزار در روش شکل‌دهی تدریجی را بررسی کردند و نشان دادند با افزایش قطر ابزار نیروی شکل‌دهی افزایش می‌یابد و میزان شکل‌دهی قطعات با هندسه پیچیده ممکن می‌باشد. باوقاریان و همکاران [۲۳] شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای را با دو مسیر حرکت ابزار به صورت پلکانی و پیوسته بررسی نمودند و مسیر پیوسته را به عنوان مسیر مناسب برای تولید قطعات با شیب دیواره زیاد گزارش دادند. لی و همکاران [۲۴] شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای را در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی کردند. آنها نتیجه گرفتند که مسیر ابزار مارپیچ پیوسته نسبت به مسیر ابزار ناپیوسته توزیع ضخامت بهتری را می‌دهد و به عمق بیشتری می‌توان دست یافت و افزایش شعاع ابزار سبب بهبود توزیع ضخامت و نازک‌شدگی می‌شود در حالی که گام عمودی تأثیر قابل توجهی بر ضخامت کمینه ندارد. محمدی و همکاران [۲۵] نشان دادند در این روش شکل‌دهی، افزایش قطر ابزار و گام عمودی باعث نازک‌شدگی بیشتر در ورق فلزی می‌شود. لویی و همکاران [۲۶] با استفاده از ابزار دوار<sup>۱</sup> به شکل‌دهی تدریجی با کیفیت سطح و شکل‌پذیری بالا رسیدند. آنها توانستند با استفاده از این ابزار دوار، کمترین اصطکاک را در فرایند شکل‌دهی تدریجی بر روی ورق‌های فلزی از آلیاژهای آلومینیوم اعمال کنند. سنتنو و همکاران [۲۷] خرابی و گلویی شدن را در لبه‌کاری سوراخ با استفاده از روش تدریجی تک نقطه‌ای به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی کردند و سپس نتیجه گرفتند که

<sup>۱</sup> Oblique Roller-Ball Tool (ORB)

خرابی و شکست در نزدیکی لبه سوراخ در ورق فلزی شکل‌دهی شده اتفاق می‌افتد. کائو و همکاران [۲۸] با استفاده از ابزار جدید به قابلیت شکل‌پذیری بهتری رسیدند. آنها با ابزار صلب جدید توانستند از نازک‌شدگی بیش از حد در ضخامت جلوگیری کنند و تغییرات ضخامت یکنواخت‌تری را گزارش دهند. حسین و همکاران [۲۹] ابعاد قطر سوراخ اولیه برای بسط دادن سوراخی به روش شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای را به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مطالعه کردند. آنها نتیجه گرفتند که تنش‌ها بر روی لبه دیواره افزایش می‌یابد و همچنین در مراحل نهایی شکل‌دهی به دلیل افزایش کار سختی نیروهای شکل‌دهی افزایش می‌یابند. آنها تاثیر قطر سوراخ اولیه را بر روی توزیع ضخامت در دیواره بررسی کردند.

## ۲-۶- ساختار پایان‌نامه

در این پایان‌نامه فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای بر روی ورق آلیاژ آلومینیوم AA3105 به صورت شبیه‌سازی اجزای محدود و روش تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. یکی از نوآوری‌های این پایان‌نامه بررسی دو مسیر ابزار جدید برای ایجاد لبه به صورت مارپیچ پیوسته‌نمایی با شعاع قاعده ثابت و مارپیچ پیوسته‌نمایی با شعاع قاعده متغیر می‌باشد. پایان‌نامه حاضر شامل پنج فصل می‌باشد. در فصل دوم شبیه‌سازی فرآیند در نرم‌افزار آباکوس بیان می‌شود و راهبردهای مختلف مسیر ابزار بررسی خواهد شد. در فصل سوم این پایان‌نامه مواد و تجهیزات و روش استفاده شده در آزمون تجربی بیان می‌شود. فصل چهارم تاثیر راهبردهای مسیر ابزار بر روی توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره مورد بحث و ارزیابی قرار می‌گیرد و در انتها، فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه کار ارائه شده است.



### فصل ۳ شبیه‌سازی اجزای محدود

امروزه استفاده از روش اجزای محدود<sup>۱</sup> در تحلیل مسائل پیچیده و متنوع برای کاهش زمان، هزینه و افزایش بهره‌وری گسترش فراوانی یافته است و در میان نرم‌افزارهایی که از این روش استفاده می‌کنند نرم‌افزار آباکوس<sup>۲</sup> از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. شبیه‌سازی اجزای محدود روشی عددی برای حل معادلات دیفرانسیل است. برای شناخت پارامترهای مختلف فرآیند و کنترل آن‌ها و رسیدن به قطعه مورد نظر با کمترین سعی و خطا، نیاز است که شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای اجزای محدود انجام شود.

#### ۳-۱- نرم‌افزار آباکوس

نرم‌افزار آباکوس از جمله نرم‌افزارهای قدرتمند مهندسی به کمک رایانه در زمینه تحلیل به روش اجزای محدود در بازار است. در دنیای صنعتی امروز، حل مسائل مهندسی هر روز بیش از پیش خود را وابسته به روش‌های حل عددی همچون FEM می‌بیند. محیط کاربری آسان برای کاربر، خروجی‌های جامع گرافیکی، توانایی حل مسائل استاتیکی و دینامیکی و کتابخانه وسیعی از المان‌ها را می‌توان از خصوصیات نرم‌افزار آباکوس نام برد.

---

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

<sup>۲</sup> Abaqus

برای حل مسائل دینامیکی و استاتیکی، معمولاً دو روش در نرم‌افزارهای اجزای محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد: روش ضمنی<sup>۱</sup> و روش صریح<sup>۲</sup>. روش ضمنی در بیش‌تر تحلیل‌ها بهترین گزینه در خصوص حل مسائل استاتیکی یا شبه‌استاتیکی است. در این روش، مجموعه معادلات سیستم به روش مستقیم حل می‌شود، به عبارت دیگر در این روش، ماتریس سفتی برای کل سازه تشکیل شده و برای هر گره جابجایی متناظر با آن به‌دست می‌آید و حل مسئله بر مبنای معکوس کردن ماتریس سختی استوار است. در روش صریح اگر سرعت حرکت موج در سازه که همان سرعت صوت است از سرعت حل نرم افزار بیشتر شود، جواب‌ها ناپایدار و نادرست خواهد بود. به عبارت بهتر بازه‌های زمانی حل باید به قدری کوچک باشد که بتواند روند حرکت موج را کاملاً دنبال کند. اگر  $\Delta t$  بزرگ در نظر گرفته شود امکان ناپایدار بودن تحلیل و درست نبودن حل وجود دارد. لذا باید  $\Delta t$  را بر اساس سائز کوچک‌ترین المان تنظیم کرد.

در این تحقیق از روش حل گر دینامیکی صریح<sup>۳</sup> استفاده شده است. جابجایی هر گره را با توجه به شتاب آن گره، در هر گام بارگذاری محاسبه می‌کند. در این روش، تأثیر نیروهای خارجی بر روی جسم به شکل انتشار امواج تنشی خواهد بود و مسئله به‌صورت دینامیکی حل می‌شود. یکی از مزایای روش صریح نسبت به روش ضمنی، سرعت بالاتر حل در مسائل پیچیده تماس است. دیگر مزیت استفاده از این روش نیاز کمتر به فضای ذخیره‌سازی در یک مسئله یکسان نسبت به روش ضمنی در رایانه است [۳۱].

### ۳-۲- شبیه‌سازی فرآیند در نرم‌افزار آباکوس

شناخت فرآیندهای شکل‌دهی از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود به‌عنوان یک فاکتور اساسی برای کاهش زمان و هزینه‌ها می‌باشد. همچنین با استفاده از این روش می‌توان پارامترهای مهم قبل از تولید را کنترل نمود و از هدر رفتن مواد در کار تجربی جلوگیری و در جهت کیفیت قطعات و سودآوری در تولید قدم برداشت.

<sup>۱</sup> Implicit

<sup>۲</sup> Explicit

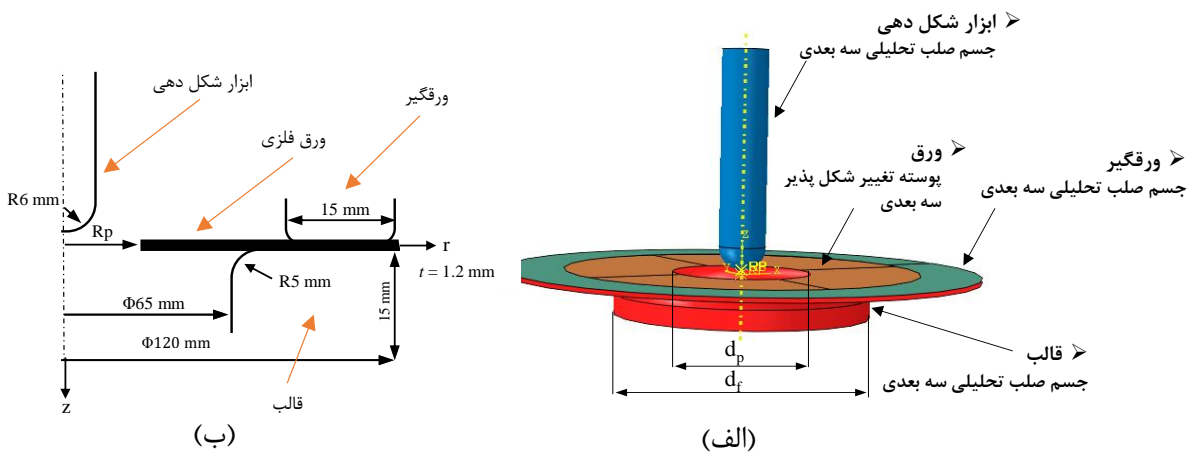
<sup>۳</sup> Dynamic/Explicit



استفاده از روش‌های اجزای محدود و شبیه‌سازی فرآیند باعث شناخت بهتر فرآیند و پارامترهای مؤثر در شکل‌دهی ورق‌های فلزی شده است.

### ۳-۲-۱- مدل هندسی ورق‌های فلزی

برای مدل‌سازی این روش در نرم‌افزار اجزای محدود سعی بر آن است که قطعات در ساده‌ترین هندسه ممکن ترسیم شوند تا زمان لازم برای تحلیل توسط رایانه کاهش یابد. قالب، ورق‌گیر و ابزار به صورت جسم صلب تحلیلی سه‌بعدی مدل‌سازی شده‌اند. ابزار با قطر ۱۲ mm طراحی شده و نقطه مرجعی<sup>۱</sup> در مرکز ابزار برای تعریف شرایط مرزی در نظر گرفته شده است. قالب از استوانه تو خالی با قطر داخلی ۶۵ mm و قطر خارجی ۱۲۰ mm و با ضخامت ۱۵ mm مدل شده است. ورق آلومینیومی می‌تواند به صورت جامد سه‌بعدی یا به صورت جسم پوسته سه‌بعدی مدل شود. در این قسمت از جسم پوسته تغییر شکل‌پذیر سه‌بعدی استفاده شده است. جسم پوسته سه‌بعدی هم حجم محاسبات پایین‌تری در برخواهد داشت و هم دقت قابل قبولی برای این نوع تحقیق نسبت به جسم جامد سه‌بعدی دارد. قطر سوراخ اولیه ورق به جز در مواقعی که ذکر شده باشد  $d_p = ۳۵\text{mm}$  می‌باشد اما قطر سوراخ نهایی  $d_f = ۶۵\text{mm}$  ثابت می‌باشد. ورق با قطر سوراخ اولیه  $d_p$  به تدریج به قطر سوراخ نهایی  $d_f$  می‌رسد. ابعاد ابزار شکل‌دهی، قالب و ورق در شکل ۳-۱ آورده شده است.



شکل ۳-۱ (الف) مدل هندسی و (ب) ابعاد قالب، ابزار، ورق‌گیر و ورق

<sup>۱</sup> Reference Point

## ۳-۲-۲- مشخصات و خواص مکانیکی ورق

فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای برای شکل‌دهی بر روی ورقی به ضخامت  $1/2$  mm از جنس آلیاژ آلومینیوم AA3105 بررسی می‌شود که مشخصات ورق فلزی در جدول ۱-۲ پس از آزمون کشش ارائه شده است. قابل ذکر است که ورق به صورت همسانگرد فرض شده است.

جدول ۱-۳ مشخصات ورق آلیاژ آلومینیوم AA3105

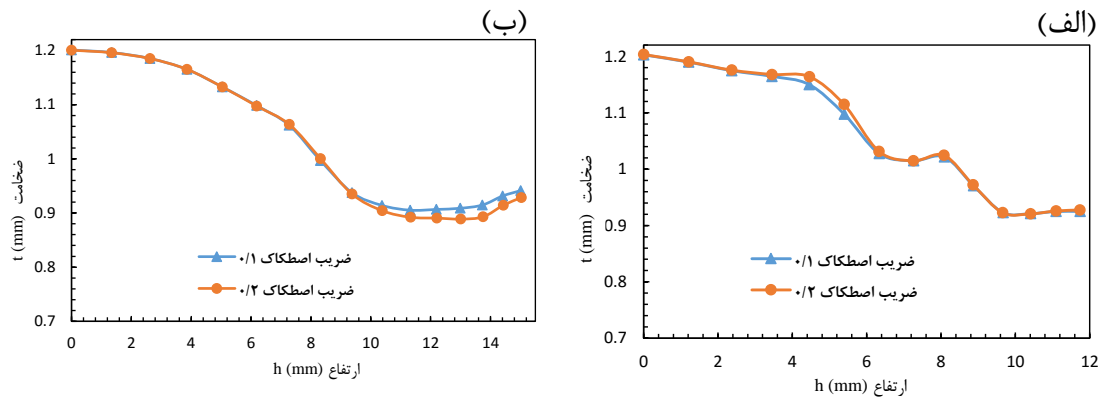
چگالی [۳۲] (Kg/m <sup>3</sup> )	ضریب پواسون [۳۲]	حداکثر افزایش طول (%)	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)
۲۷۰۰	۰/۳۳	۱۱	۱۸۲	۱۶۷	۷۱

## ۳-۲-۳- تعیین نوع تماس سطوح اجزای باهم

تماس از نوع سطح به سطح<sup>۱</sup> بین ورق و ابزار، قالب و ورق گیر می‌باشد. با توجه به نوع تماس بین ابزار و ورق، اصطکاک از نوع پنالته<sup>۲</sup> است و تغییرات ضخامت در دو مسیر ابزار مختلف به‌عنوان متغیر هدف در نظر گرفته شد و با ضریب اصطکاک  $\mu=0/1$  و  $\mu=0/2$  شبیه‌سازی اجزای محدود انجام شد [۲۴ و ۳۵] و تغییرات قابل چشم‌گیری مشاهده نشد. در تمامی سطوح، ضریب اصطکاک برای ادامه تحلیل و شبیه‌سازی‌ها  $\mu=0/2$  می‌باشد [۳۵].

<sup>1</sup> Surface-to-surface contact

<sup>2</sup> Penalty



شکل ۳-۲ بررسی اثر ضربه اصطکاک بر توزیع ضخامت در سه مرحله شکل‌دهی (الف) راهبرد مسیر ۱ ابزار (ب) راهبرد مسیر ۲ ابزار

### ۳-۲-۴- شرایط مرزی و تعیین مسیر ابزار

تمامی درجات آزادی قالب و ورق‌گیر گرفته شده است و ثابت می‌باشند. شرایط مرزی ابزار با استفاده از زیر برنامه VDISP که آباکوس فراخوانی می‌کند و مسیر را طی می‌نماید، نوشته می‌شود. VDISP یکی از انواع زیربرنامه‌های آباکوس صریح<sup>۱</sup> می‌باشد که برای جابجایی و یا دوران یک گره از آن استفاده می‌شود در این نوع زیربرنامه<sup>۲</sup> JBCType مشخص کننده نوع متغیرهای مسئله است. اگر JBCType برابر صفر، یک و دو باشد به ترتیب بیان کننده متغیرهای جابجایی، سرعت و شتاب می‌باشد [۳۳] که در این پژوهش از معادلات جابجایی برای حرکت ابزار استفاده شده است.

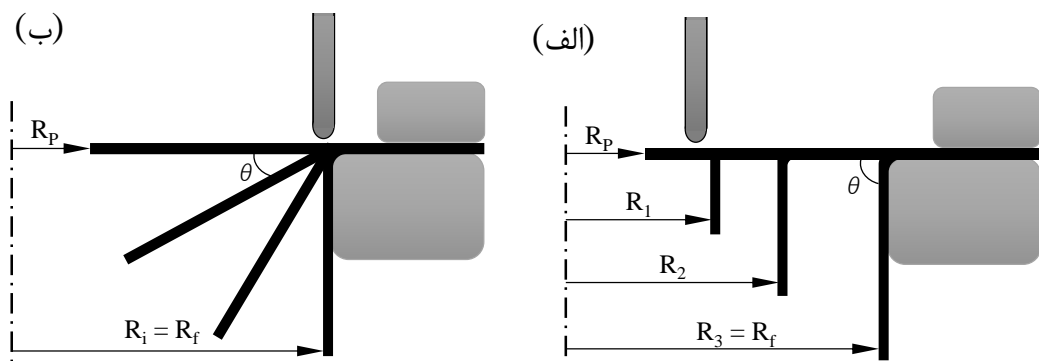
### راهبردهای مختلف مسیر حرکت ابزار

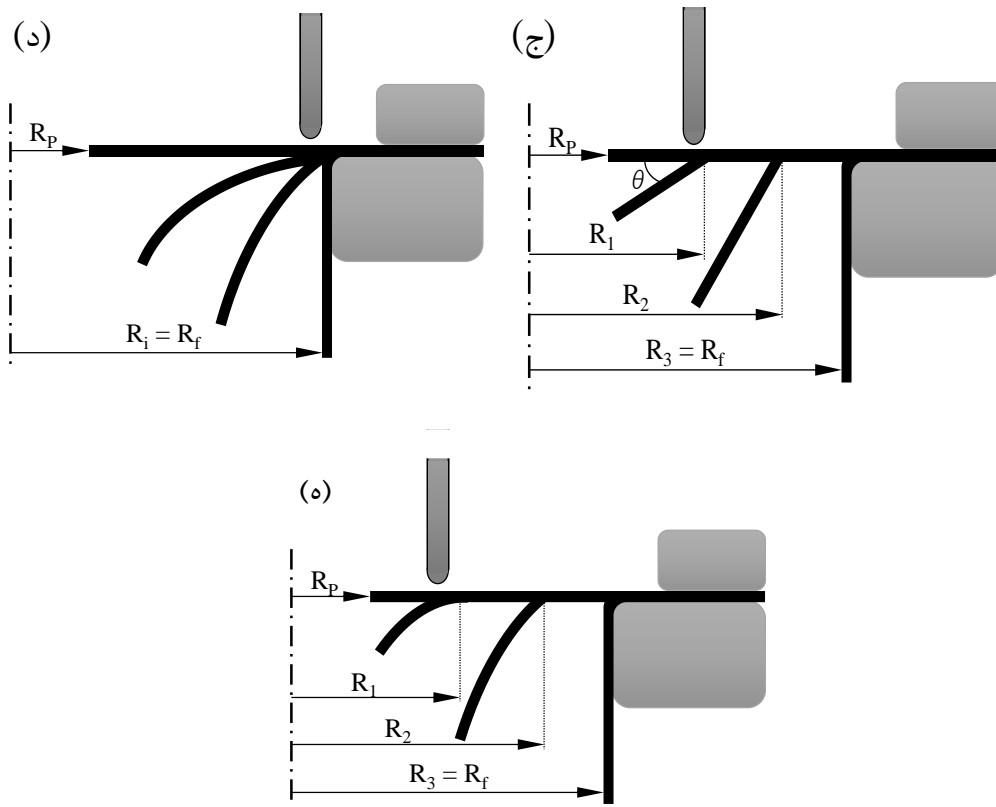
در میان پارامترهای شکل‌دهی تدریجی، مسیر ابزار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۴]. بنابراین انتخاب مسیر ابزار مناسب برای تولید قطعات صنعتی با استفاده از شکل‌دهی تدریجی بسیار مهم می‌باشد. مسیر حرکت ابزار تاثیر قابل توجهی بر روی دقت ابعادی قطعه، کیفیت سطح، زمان انجام فرآیند و تغییرات ضخامت در ورق می‌گذارد [۲ و ۲۱]. برای هر کدام از راهبردهای مسیر حرکت ابزار در نرم‌افزار آباکوس یک زیر برنامه VDISP توسعه داده شده است. کویی و گائو [۴] به صورت تجربی به بررسی سه مسیر مختلف برای لبه‌دار کردن ورق فلزی از جنس آلیاژ آلومینیوم AA1060 با قطر سوراخ اولیه متفاوت پرداختند و قطر سوراخ ۳۵ mm را قطر

<sup>۱</sup> Abaqus/Explicit Subroutines

<sup>۲</sup> Indicator for type of prescribed variable

سوراخ اولیه بهینه پیشنهاد کردند. مسیرهای جدید شکل‌دهی در لبه‌کاری ورق فلزی برای رسیدن به توزیع ضخامت یکنواخت‌تر در دیواره ورق پیشنهاد می‌شود. خاطر نشان می‌شود که تمامی مسیرها به صورت مارپیچ و پیوسته است و هدف تولید قطعه با زاویه دیواره قائم می‌باشد. شکل ۲-۳-الف) راهبرد مسیر ۱ ابزار به صورت استوانه مارپیچ پیوسته را نشان می‌دهد، که مسیر حرکت ابزار با زاویه دیواره  $\theta = 90^\circ$  ثابت، و همچنین با موقعیت شعاع اولیه متغیر در هر مرحله استفاده شده است. در شکل ۲-۳-ب) راهبرد مسیر ۲ ابزار تعریف شده است که مسیر مخروطی شکل را نشان می‌دهد. زاویه دیواره  $\theta$  در هر یک از مراحل شکل‌دهی این راهبرد، مختلف می‌باشد و موقعیت ابزار با شعاع ثابت  $R_i$  استفاده شده است که در انتها زاویه دیواره محصول به  $90^\circ$  می‌رسد. شکل ۲-۳-ج) راهبرد مسیر ۳ ابزار می‌باشد که ترکیبی از دو راهبرد قبلی است. شعاع اولیه  $R_i = \theta$  و زاویه دیواره  $\theta$  در هر یک از مراحل شکل‌دهی متفاوت است و در انتها محصول با زاویه دیواره  $\theta = 90^\circ$  شکل‌دهی می‌شود. شکل ۲-۳-د) راهبرد مسیر ۴ ابزار با استفاده از توابع نمایی را نشان می‌دهد. در این مسیر حرکت ابزار بر روی منحنی با موقعیت ثابت اولیه ابزار و با زاویه دیواره مختلف می‌باشد که در پایان مرحله شکل‌دهی، راهبرد مسیر ۱ به صورت استوانه‌ای شکل تکرار شده و دیواره قائم شکل‌دهی می‌شود. شکل ۲-۳-ه) نشان دهنده راهبرد مسیر ۵ ابزار و مانند راهبرد قبلی حرکت بر روی منحنی است، با این تفاوت که موقعیت اولیه ابزار بر روی ورق فلزی در هر مرحله از شکل‌دهی متفاوت می‌باشد. مرحله آخر هر ۵ راهبرد مسیر ابزار به دیواره قائم و مسیر استوانه‌ای شکل می‌رسد.





شکل ۳-۳ راهبردهای مسیر ابزار (الف) - راهبرد ۱ مسیر ابزار (ب) - راهبرد ۲ مسیر ابزار (ج) - راهبرد ۳ مسیر ابزار (د) - راهبرد ۴ مسیر ابزار (ه) - راهبرد ۵ مسیر ابزار

جدول ۲-۲ انواع راهبردهای مسیر ابزار و معادله مسیر ابزار برای شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق‌های فلزی براساس زاویه دیواره و موقعیت شعاع ابزار در یک نگاه کلی را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۳ راهبردهای مسیر ابزار و نوع معادله استفاده شده در آن‌ها

نوع راهبرد مسیر ابزار	مسیر حرکت	زاویه دیواره ( $\theta$ )	موقعیت شعاع اولیه ابزار ( $R_i$ )
راهبرد مسیر ابزار ۱	استوانه مارپیچ	ثابت $90^\circ$	متغیر $R_i$
راهبرد مسیر ابزار ۲	مخروط مارپیچ	متغیر $\theta_i$	ثابت $R_i = R_f$
راهبرد مسیر ابزار ۳	مخروط مارپیچ	متغیر $\theta_i$	متغیر $R_i$
راهبرد مسیر ابزار ۴	نمایی مارپیچ	متغیر $\theta_i$	ثابت $R_i = R_f$
راهبرد مسیر ابزار ۵	نمایی مارپیچ	متغیر $\theta_i$	متغیر $R_i$

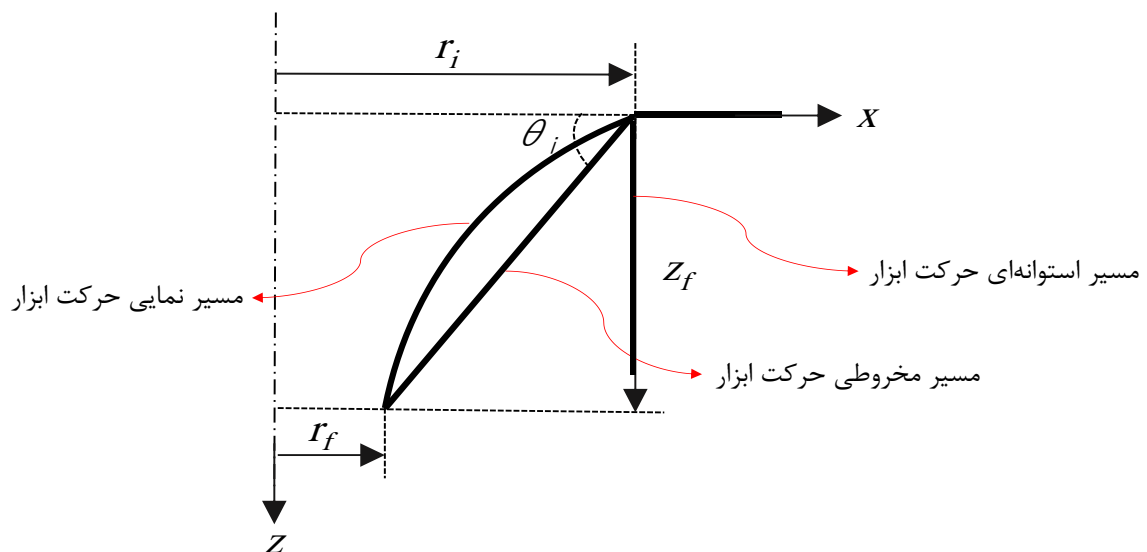
### تعریف مسیر حرکت ابزار با استفاده از سابروتین VDISP

هدف از این پایان‌نامه بررسی مسیرهای مختلف ابزار برای لبه‌دار کردن سوراخی با استفاده از شکل‌دهی تدریجی می‌باشد. مطالعاتی به صورت تجربی بر روی مسیر ابزار و قطر سوراخ اولیه با استفاده از روش شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای انجام شده است اما به دلیل اهمیت مسیر ابزار نیاز به تحقیق بیشتر در این زمینه احساس شد. در نتیجه راهبردهای جدید شکل‌دهی برای لبه‌دار کردن ورق فلزی پیشنهاد می‌شود که به صورت اجزای محدود و تجربی بررسی شده است. همانطور که بیان شد در شرایط مرزی ابزار از زیر برنامه VDISP استفاده شده است. در این زیربرنامه جابجایی نقطه مرجع ابزار در هر کدام از راستاهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  به نحوی تعیین شده که ابزار روی مسیر خواسته شده حرکت کند. ابزار با استفاده از زیر برنامه‌ای که آباکوس فراخوانی می‌کند مسیر را طی می‌نماید. همچنین در این زیر برنامه معادله حرکت ابزار برای تمامی راهبردها به صورت حرکت پیوسته در آن نوشته شده است.

شکل ۳-۴ پارامترهای مسیر حرکت ابزار را نشان می‌دهد. سرعت خطی ابزار در صفحه‌ی  $xy$  از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید که شعاع  $r$  مسیر حرکت ابزار می‌باشد.

(۱-۲)

$$v = r\omega = \frac{r\alpha}{t}$$



شکل ۳-۴ پارامترهای مسیر حرکت ابزار

معادله حرکت در راهبرد ۱ که مسیر ابزار به صورت استوانه‌ای شکل است با استفاده از معادلات (۲-۲) نوشته شده است. شعاع در مراحل مختلف شکل‌دهی مسیر ۱ تغییر نمی‌کند اما در مسیر ۲ ابزار، شعاع اولیه متغیر می‌باشد. معادلات (۳-۲) برای راهبرد مسیرهای ۲ و ۳ ابزار استفاده می‌شود با این تفاوت در راهبرد مسیر ۳ موقعیت اولیه ابزار تغییر می‌کند.

$$\begin{cases} r = r_i \\ u_x = r \cos(\omega t) \\ u_y = r \sin(\omega t) \\ u_z = -v_z t \end{cases} \quad (۲-۲)$$

$$\begin{cases} r = r_i + \frac{u_z}{\tan \theta_i} \\ u_x = r \cos(\omega t) \\ u_y = r \sin(\omega t) \\ u_z = -v_z t \end{cases} \quad (۳-۲)$$

معادلات (۴-۲) مورد استفاده در حرکت منحنی و تابع نمایی می‌باشد.

$$\begin{cases} u_x = e^{\frac{u_z - k}{q}} \cos(\omega) \\ u_y = e^{\frac{u_z - k}{q}} \sin(\omega) \\ u_z = -v_z t \end{cases} \quad (۴-۲)$$

که در آن روابط زیر برای حل معادلات استفاده می‌شود.

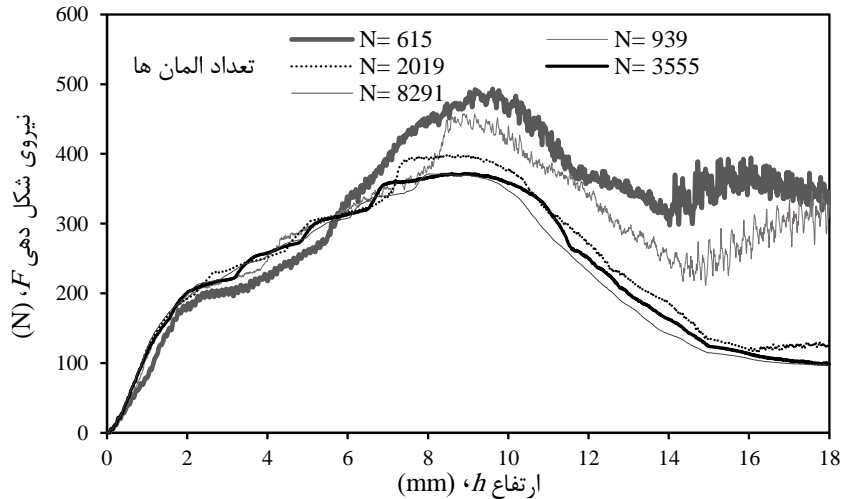
$$q = \frac{h}{\ln\left(\frac{r_f}{r_i}\right)} \quad (5-2)$$

$$k = q \ln(r_f)$$

### ۳-۲-۵- مطالعه‌ی همگرایی مش

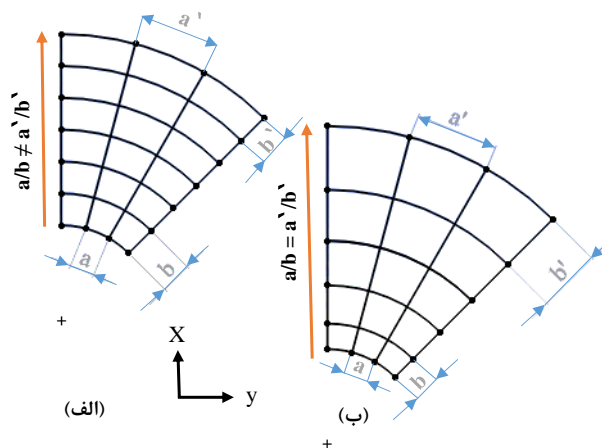
در این پژوهش از المان‌های پوسته چهار گرهی S4R برای شبکه‌بندی ورق استفاده شده است. انتخاب اندازه یا تعداد المان موجود در تحلیل، بر حجم محاسبات و درستی نتایج تأثیر می‌گذارد. برای اطمینان از درستی تعداد المان انتخاب شده مطالعه همگرایی مش برای یک شکل‌دهی با مسیر ابزار استوانه ماریچ انجام شد. نیروی شکل‌دهی به‌عنوان متغیر هدف در نظر گرفته شده است. مطالعه مش با تعداد المان ۶۱۵، ۹۳۹، ۲۰۱۹، ۳۵۵۵، ۸۲۹۱ انجام شده است. همان‌طور که در شکل ۲-۵ دیده می‌شود با افزایش تعداد المان نیروهای شکل‌دهی کاهش می‌یابند و با کاهش تعداد المان نیروی شکل‌دهی افزایش و هندسه قطعه شکل‌دهی شده با هندسه محصول هدف متفاوت می‌شود. تعداد المان ۶۱۵ و ۹۳۹ نیرو شکل‌دهی بسیار متفاوتی نسبت به تعداد المان ۲۰۱۹ دارد. اما از تعداد المان بیشتر از ۲۰۱۹، نیروها به هم نزدیک می‌شوند و تغییرات نیرو بسیار اندک است. بنابراین افزایش تعداد المان بر درستی نتایج تأثیری ندارد و فقط حجم محاسبات افزایش می‌یابد. تعداد المان ۳۵۵۵ برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی تدریجی انتخاب شد. این تعداد المان به دلیل درست بودن هندسه محصول و نیروی شکل‌دهی مناسب، به‌عنوان تعداد المان مناسب در این تحقیق استفاده شده است.





شکل ۳-۵ تغییرات نیروی شکل‌دهی در طی فرایند برای تعداد المان‌های مختلف در مطالعه همگرایی مش

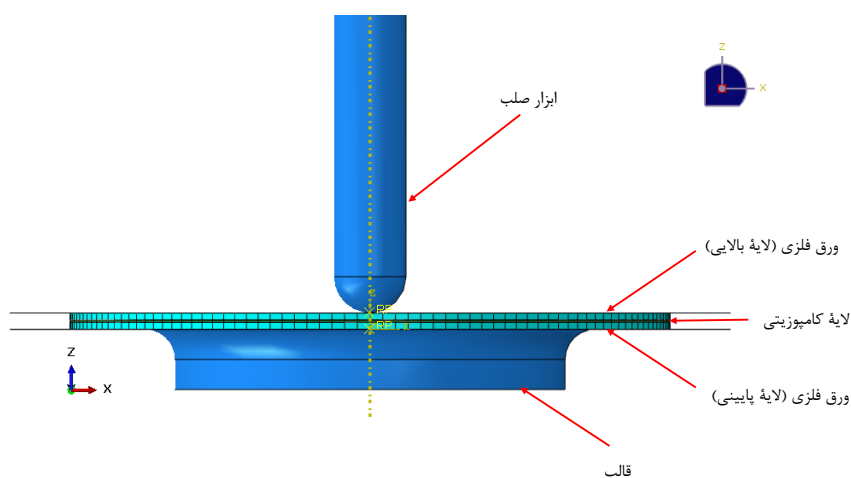
شکل ۲-۶ نشان دهنده دو روش متفاوت برای ایجاد گره‌ها و المان‌ها در آباکوس می‌باشد. شکل ۲-۶-الف) قسمتی از ورق را نشان می‌دهد که اندازه  $b$  برای هر المان مقداری ثابت است. گره‌ها در راستای  $x$  به صورت موازی و با اندازه ثابت ایجاد شده است که مقدار  $b$  با اندازه  $b'$  برابر می‌باشد. اما در این تحقیق مطابق شکل ۲-۶-ب) مقادیر از مقدار مرجع (اندازه  $b$ ) فاصله می‌گیرند. نسبت  $a/b$  با  $a'/b'$  برابر می‌باشد که در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از گزینه بایاس بیشترین اندازه  $2/11$  mm و کمترین اندازه  $0.75$  mm در نظر گرفته شد. با این روش تعداد المان‌ها کمتر شده و زمان تحلیل فرآیند بهینه می‌شود.



شکل ۳-۶ روش‌های ایجاد گره‌ها و المان‌بندی در نرم‌افزار آباکوس - الف) المان‌بندی با فاصله یکنواخت (ب) - المان‌بندی با فاصله غیر یکنواخت

## ۳-۲-۶- مدل‌سازی ورق‌های FML

استفاده از المان‌های چسب<sup>۱</sup> مبحث بسیار گسترده در شبیه‌سازی اجزای محدود می‌باشد اما در این تحقیق یک نمونه شبیه‌سازی اجزای محدود ورق‌های FML در راهبرد مسیر ۱ ابزار و با سرعت متغیر و سه مرحله شکل‌دهی در نرم‌افزار آباکوس انجام شد. ضرایب مورد استفاده در شبیه‌سازی اجزای محدود برای ورق FML با استفاده از مرجع [۳۴] داده شده است. در ورق‌های FML عموماً جدایی لایه‌ها برای مطالعه و شبیه‌سازی دارای اهمیت است. برای شبیه‌سازی جدایش لایه‌ها از المان‌های چسب استفاده شد. مدل شبیه‌سازی ورق FML از سه لایه تشکیل شده است. ابعاد قالب و ورق مشابه شبیه‌سازی ورق‌های فلزی می‌باشد و فقط خواص لایه کامپوزیتی از مرجع گرفته شده است. شکل ۳-۷ اجزای مدل‌سازی ورق‌های FML را نشان می‌دهد. برای حذف المان‌ها، بحث تکامل آسیب<sup>۲</sup> مهم می‌باشد. خواص الاستیک لایه کامپوزیتی از نوع Traction می‌باشد. همچنین رفتار جدایی لایه‌ها از نوع تکامل آسیب می‌باشد که در همین بخش می‌توان به دو روش با جابجایی و یا با انرژی شکست رفتار خرابی را مشاهده نمود. در این تحقیق از نوع انرژی شکست استفاده شده است.



شکل ۳-۷ مدل شبیه‌سازی اجزای محدود ورق‌های FML

<sup>۱</sup> Cohesive Element

<sup>۲</sup> Damage Evolution

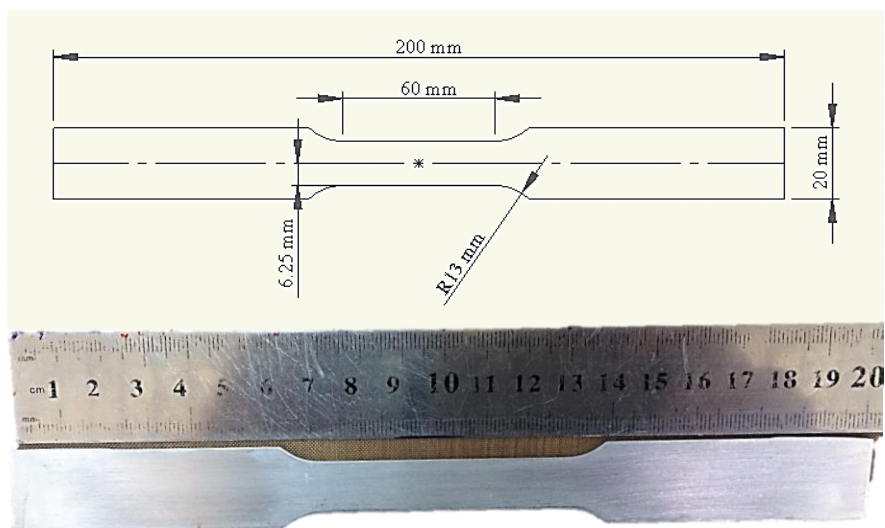
## فصل ۴ آزمایش‌های تجربی

### ۴-۱- ورق فلزی

ورق مورد استفاده در این پژوهش از ورق فلزی آلیاژ آلومینیوم AA3105 با ضخامت  $1/2$  mm و ورق‌های چندلایه کامپوزیتی به ضخامت  $2/85$ ،  $2/65$  و  $2/35$  mm می‌باشد. خواص پلاستیک این ورق‌ها با آزمایش کشش تک‌محوره به دست می‌آید.

### ۴-۲- آزمون کشش

ورق با آزمایش کشش به وسیله‌ی دستگاه آزمون کشش سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده است. شکل ۱-۳ یک نمونه کشش جهت آزمایش، مطابق استاندارد ASTM-E8 را نشان می‌دهد. این نمونه‌ها مطابق شکل با دستگاه CNC فرز ماشین‌کاری شده است. شکل ۲-۳ دستگاه آزمون کشش را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴ نمونه استاندارد ASTM-E8 برای آزمون کشش.



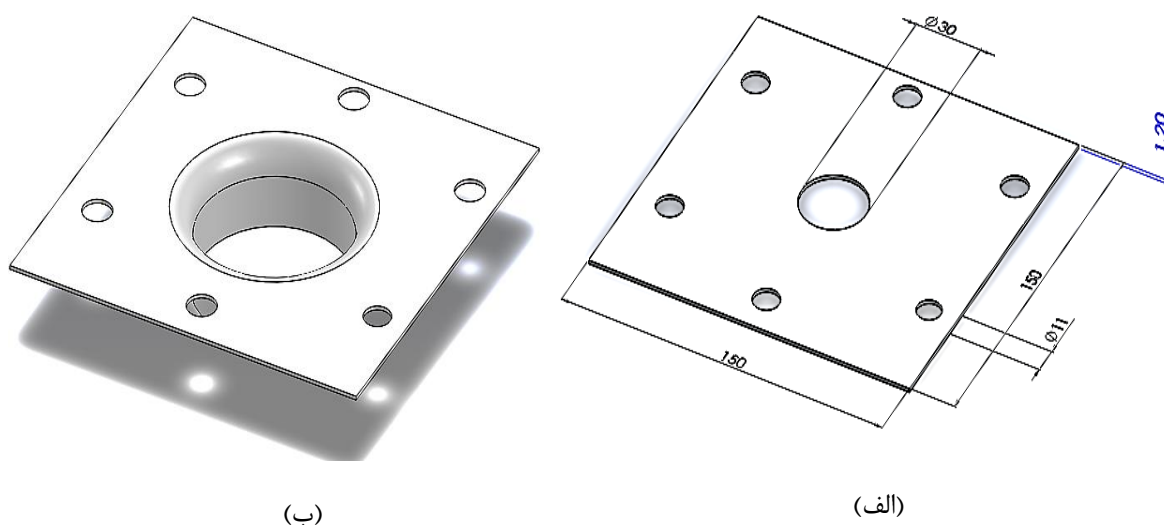
شکل ۲-۴ دستگاه آزمون کشش اینسترون ۸۸۰۲.

#### ۳-۴- شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق

##### ۱-۳-۴ آماده‌سازی نمونه‌ها

ورق آلومینیومی مربعی شکل با ابعاد ۱۵۰ mm که دارای شش سوراخ با قطر ۶ mm مطابق شکل ۳-۳ در گوشه‌ها برای ثابت شدن ورق بین قالب و ورق‌گیر طراحی شده است. این شش سوراخ بر روی ورق با پیچ آلن

بین ورق گیر و قالب بسته می‌شود. همچنین در مرکز ورق سوراخی با قطر اولیه مدنظر وجود دارد که برای هر یک از آزمایش‌ها می‌تواند متفاوت باشد. این سوراخ با استفاده از پیش مته و یک ابزار داخل تراش بر روی دستگاه تراش CNC به قطر هدف می‌رسد. در این پژوهش سوراخ اولیه برای بررسی توزیع ضخامت ۳۵ mm در نظر گرفته شده است و پس از داخل تراشی و رساندن به قطر اصلی باید مرحله پلیسه‌گیری صورت گیرد. سپس عملیات شکل‌دهی بر روی آن انجام می‌شود. شکل ۳-۳ ورق فلزی قبل از شکل‌دهی تدریجی و شکل ۳-۳ ورق فلزی بعد از شکل‌دهی تدریجی در چند مرحله را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴ (الف) ورق فلزی قبل از شکل‌دهی تدریجی (ب) ورق فلزی بعد از شکل‌دهی تدریجی.

#### ۴-۳-۲- ابزار شکل‌دهی

ایجاد لبه در فرآیند شکل‌دهی تدریجی در ورق فلزی با استفاده از یک ابزار استوانه صلب سرکروی و یا ابزار دوار که توسط ساچمه کروی شکل بر روی ورق می‌غلند استفاده می‌شود. از آنجاکه عامل اصطکاک و در نتیجه سایش مهم‌ترین عامل وارد بر ابزار در این روش شکل‌دهی می‌باشد، عموماً ابزار با سختی بالا برای مقاومت در مقابل سایش استفاده می‌شود. مطابق شکل ۴-۳ در این تحقیق از یک ابزار استوانه صلب سرکروی با قطر ۱۲ mm و شعاع ۶ mm از جنس کارباید تنگستن استفاده شده است. این ابزار بر روی ماشین CNC قرار می‌گیرد و ابزار حرکت خطی برای انجام عملیات شکل‌دهی نیز انجام می‌دهد.



شکل ۴-۴ ابزار صلب سرکروی کارباید تنگستن با ابزارگیر مخصوص تراش CNC.

#### ۴-۳-۳- قالب شکل‌دهی

قالب شکل‌دهی تدریجی قالبی است که ماتریس، دنباله قالب و ورق‌گیر برای ثابت کردن ورق وجود دارد که این قالب را برای شکل‌دهی ورقی تا قطر ۶۵ mm مناسب می‌باشد. طراحی قالب به گونه‌ای است که قالب می‌تواند بر روی ماشین تراش CNC قرار گیرد و عملیات شکل‌دهی به راحتی انجام شود. قالب به سه نظام دستگاه تراش بسته می‌شود و قالب حرکت دورانی انجام می‌دهد. شکل ۳-۵ تصویر مونتاژ قسمت‌های مختلف قالب ساخته شده را نشان می‌دهد که در ادامه هر یک از اجزای آن توضیح داده می‌شود.

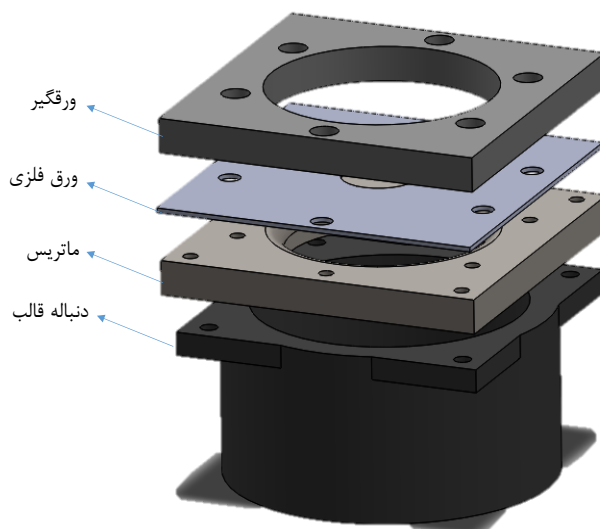


شکل ۴-۵ مونتاژ شده قالب شکل‌دهی تدریجی.

ماتریس بخشی از قالب شکل‌دهی است که ورق بر روی آن قرار می‌گیرد و دارای حفره‌ایی است که ورق را توسط سنبه و یا ابزار شکل‌دهی با نیرو درون آن هدایت نموده و عملیات شکل‌دهی را انجام می‌دهد. در این مطالعه ماتریس از فولاد SPK ساخته شده و دارای طول و عرض مساوی ۲۵۲ mm و ارتفاع ۱۲ mm می‌باشد. دو سطح بالا و پایین آن سنگ زده شده و صاف و صیقلی شده‌است. ماتریس در مرکز دارای حفره‌ای به قطر ۶۵ mm می‌باشد. بر روی این حفره که همان لبه ماتریس است، با دستگاه تراش CNC شعاعی به اندازه ۹ mm ایجاد شده است. همچنین دارای شش سوراخ برای عبور پیچ‌ها از ورق‌گیر و ورق و ثابت نمودن آن وجود دارد.

ورق‌گیر یک تسمه‌ی فلزی است که ورق را از چهار طرف محکم نگه می‌دارد تا فرآیند شکل‌دهی با دقت صورت پذیرفته و از کشش ناخواسته‌ی ورق و جریان فلز به درون ناحیه شکل‌دهی جلوگیری شود. در این مطالعه ورق‌گیر همانند ماتریس از فولاد SPK ساخته شده و دارای طول و عرض مساوی ۲۵۲ mm و ارتفاع ۲۵ mm می‌باشد. در ضمن دو سطح بالا و پایین آن سنگ زده شده و صاف و صیقلی شده است.

دنباله‌ی قالب قسمتی از قالب است که مجموعه‌ی ماتریس، ورق و ورق‌گیر بر روی آن قرار می‌گیرد و بر روی سه نظام دستگاه تراش CNC و یا میز فرز CNC محکم بسته و نگه داشته می‌شود تا فضای کافی برای حرکت ابزار شکل‌دهی بر روی ورق ایجاد شود و عملیات شکل‌دهی صورت گیرد. در این مطالعه از یک لوله‌ی آهنی به قطر بیرونی ۲۵۲ mm، قطر داخلی ۲۱۲ mm و ارتفاع ۱۲ mm برای ساخت دنباله‌ی قالب استفاده گردید. ورق‌گیر، ماتریس و دنباله‌ی قالب پس از ساخته شدن توسط پیچ‌های آلن به یکدیگر محکم بسته می‌شوند تا به عنوان قالب شکل‌دهی تدریجی برای ورق‌های فلزی قابل استفاده گردد. شکل ۴-۶ طرح‌واره‌ی اجزای قالب به صورت نمای جدا شده نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶ طرح‌واره‌ی اجزای قالب به صورت سه بعدی

#### ۴-۴- ماشین تراش کنترل عددی

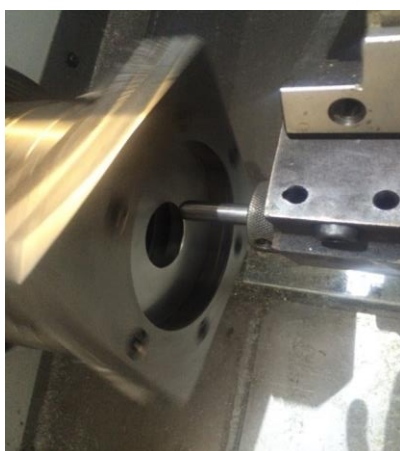
ماشین تراش CNC استفاده شده در فرآیند SPIF، که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است، ماشین تراش مدل TC-20 ساخت ماشین‌سازی تبریز است که سیستم کنترل آن مدل D-802 زیمنس می‌باشد. ابزار شکل‌دهی به ابزارگیر دستگاه بسته شده و دارای حرکت خطی می‌باشد و ورق آلومینیومی که به قالب شکل‌دهی بسته شده بر روی سه نظام دستگاه قرار گرفته و دارای حرکت دورانی است. از ترکیب حرکت دورانی قالب و حرکت خطی ابزار شکل‌دهی به صورت مارپیچ پیوسته انجام می‌شود. شکل ۳-۸ حین عملیات شکل‌دهی تدریجی برای ایجاد لبه در ورق فلزی را نشان می‌دهد.

برای تعیین مسیر ابزار در تراش CNC در نرم‌افزار Mastercam طراحی‌ها انجام شده است و قبل از فرستادن برنامه به کنترلر دستگاه، کد اجرا می‌شود تا مسیر ابزار را به صورت شبیه‌سازی مشاهده شود و از درستی آن کد اطمینان حاصل شود [۳].





شکل ۴-۷ دستگاه تراش CNC سه محور مدل D-802.



شکل ۴-۸ حین عملیات شکل‌دهی تدریجی برای ایجاد لبه در ورق فلزی.

#### ۴-۵- ساخت ورق‌های دولایه فلزی الیاف‌دار

در دو دهه گذشته محققین بسیاری در زمینه توسعه موادی که بتوانند خواص خستگی و مکانیکی خوبی در مقایسه با آلومینیوم داشته و وزن پایینی را دارا باشند تلاش‌های فراوانی انجام دادند. این تلاش‌ها منجر به ساخت ورق‌های فلزی الیاف‌دار FML شد. نخستین بار مواد مرکب کامپوزیتی به صورت گسترده در زمان جنگ جهانی دوم در نیروی دریایی مورد استفاده قرار گرفت. ورق‌های چندلایه کامپوزیتی که جدیداً مورد توجه قرار گرفته است به دلیل نسبت استحکام به وزن بسیار بالای آن در صنایع مختلفی مانند هوا و فضا، اتومبیل‌سازی، صنایع دریایی، ورزشی، نظامی، پزشکی و... به کار می‌روند. این ورق‌ها می‌تواند از چندلایه ورق فلزی و چندلایه

الیاف شیشه<sup>۱</sup> و یا کربن استفاده شوند. این اجزا با استفاده از چسب مناسب در دما و فشار بالا به هم متصل می‌شوند.

#### ۴-۵-۱- معرفی مواد و تجهیزات مورد نیاز برای ساخت FML

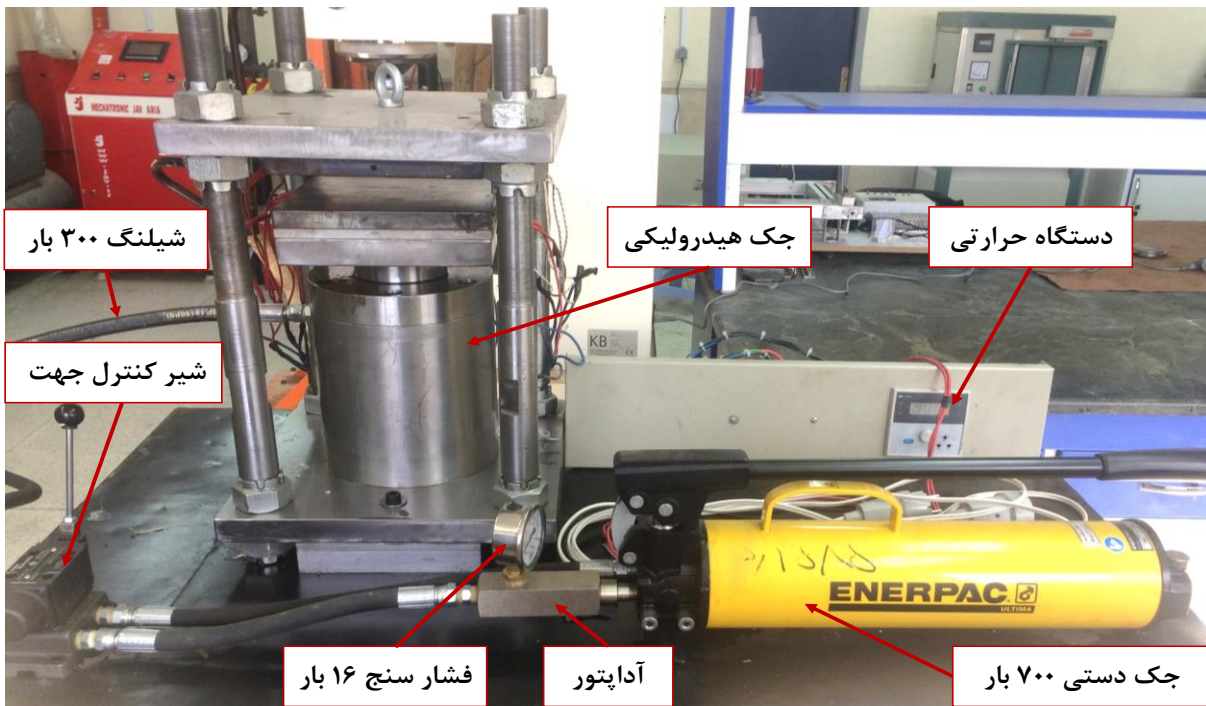
در این پایان‌نامه برای ساخت FML ها از قالبی گرم‌کار استفاده شده است که ساخت ورق‌های چندلایه کامپوزیتی در دما و فشار بالا را ممکن ساخته است. همچنین از ورق فلزی آلیاژ آلومینیوم AA3105 با ضخامت ۱/۲ mm و ضخامت ۰/۵ mm و ورق پلی اورتان با ضخامت ۱ mm و الیاف شیشه دو جهته با ضخامت‌های ۰/۳ mm و ۰/۱ mm برای ساخت FML استفاده شده است.

#### ۴-۵-۲- قالب و اجزای آن

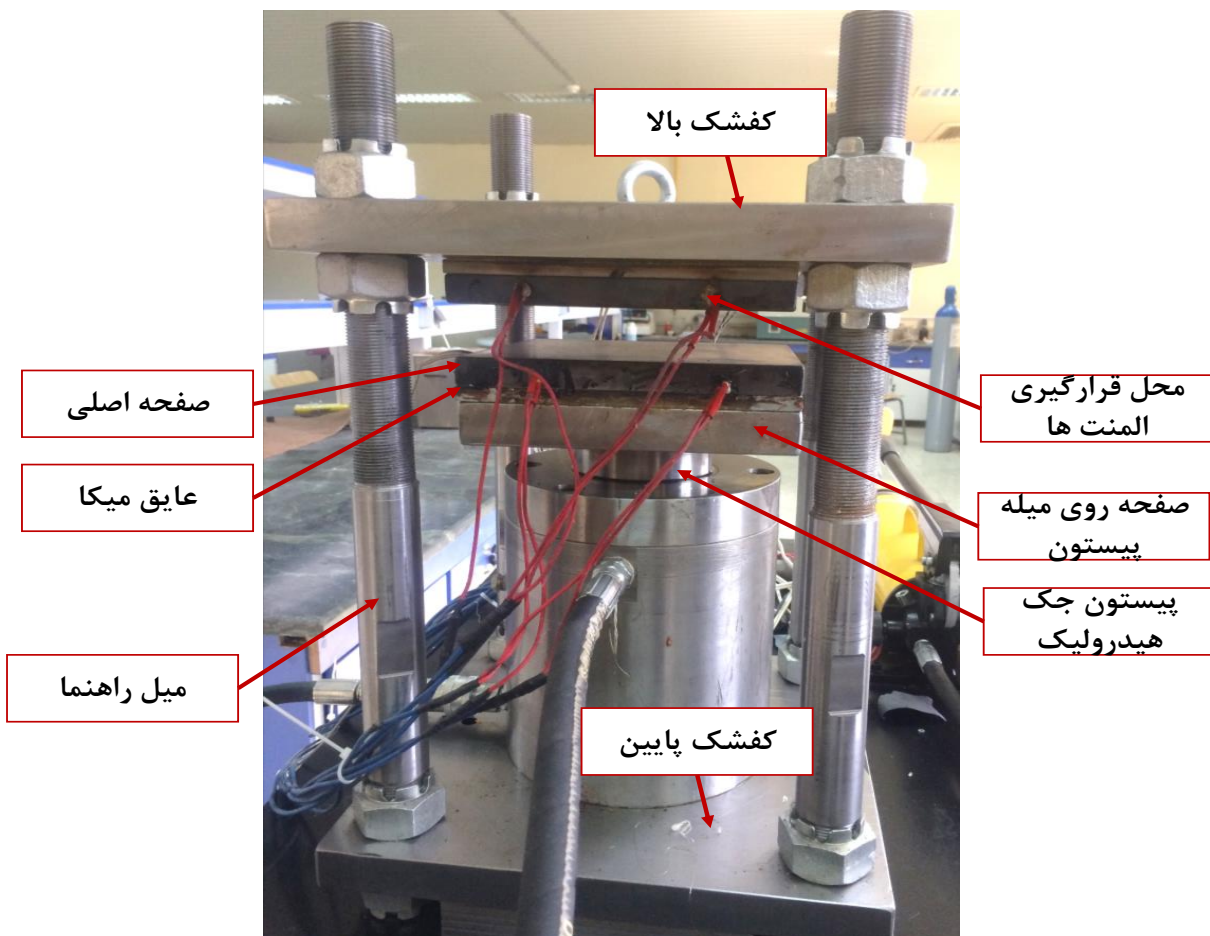
شکل ۳-۹ قالب و پرس مورد استفاده برای ساخت FML را نشان می‌دهد. این قالب از دو بخش قسمت تحتانی و قسمت فوقانی تشکیل شده است. قسمت تحتانی از یک کفشک، صفحه اصلی و صفحه بالایی پیستون و چهار گرم‌کننده (المنت) مونتاژ شده است. برای ساخت کامپوزیت‌های چندلایه پس از لایه چینی اولیه و قرارگرفتن آن به ترتیب روی هم، ورق‌ها را در دما، فشار و زمان مناسب تحت پرس قرار می‌دهند. در این تحقیق یک پرس هیدرولیکی با نیروی نامی ۱۰ تن استفاده شده است. از یک جک هیدرولیک دستی با ظرفیت ۷۰۰ بار و سیستم حرارت دهی الکتریکی با ۸ گرم‌کننده فشنگی و یک ترموکوپل در صفحات قالب بالا و پایین که از فولاد MO40 می‌باشد استفاده شده است. برای عایق بندی صفحات پرس، از دو صفحه عایق میکا مورد استفاده قرار گرفت.

اجزای پرس گرم و اجزای قالب گرم‌کار را به ترتیب در شکل‌های ۳-۹ و شکل ۳-۱۰ معرفی شده است.

<sup>1</sup> Glass Fiber



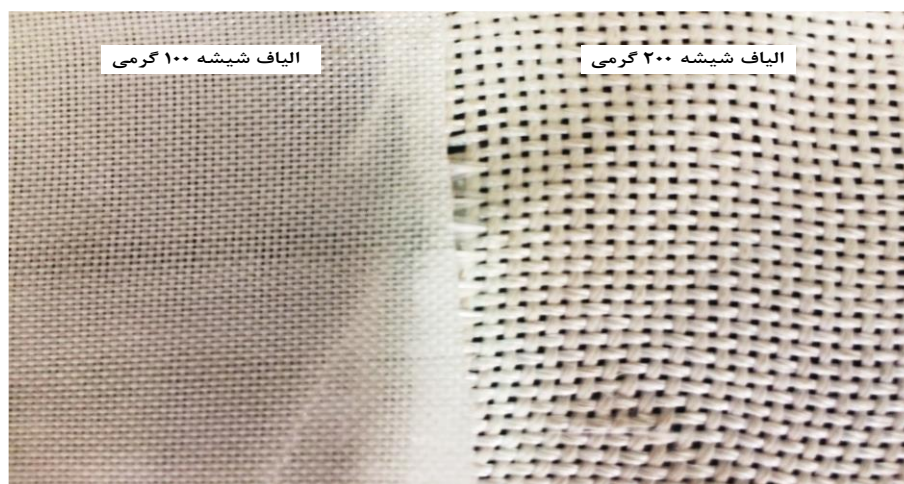
شکل ۴-۹ اجزای پرس گرم هیدرولیک و قالب آن



شکل ۴-۱۰ اجزای قالب گرمکار برای ساخت ورق‌های FML

## ۴-۵-۳- الیاف شیشه

باتوجه به ساختار لایه‌های FML، می‌توان انتخاب‌های متنوعی از فلز، فیبر و رزین تشکیل دهنده آن داشت که با تغییر هر یک از این لایه‌ها خواص مکانیکی متفاوتی به دست آورد. در این پژوهش از الیاف شیشه به دلیل کاربرد گسترده آن در صنایع و در دسترس بودن آن استفاده شده است. الیاف‌های شیشه، الیاف‌های ظریف و خمش پذیری هستند که از شیشه ساخته می‌شوند. الیاف شیشه تارهای بسیار باریک از جنس شیشه با قطر ثابت و طول نامحدود می‌باشد. الیاف شیشه در بازار انواع مختلفی با ضخامت و میزان فشردگی آنها وجود دارد. میزان فشردگی الیاف شیشه عموماً با وزن شناخته می‌شود. از الیاف شیشه در بالا بردن مقاومت کششی و تقویت کامپوزیت‌ها استفاده شده است. مطابق شکل ۳-۱۱ در این پژوهش از الیاف شیشه دو جهته با ضخامت‌های  $0/3$  mm و  $0/1$  mm و به ترتیب دارای تراکم  $200$  گرمی و  $100$  گرمی برای ساخت FML استفاده شده است.



شکل ۴-۱۱ انواع الیاف شیشه دو جهته برای ساخت ورق FML

## ۴-۵-۴- ورق فلزی

برای ساخت ورق‌های دولایه از دو ورق فلزی آلومینیومی AA3105 با ضخامت  $0/5$  mm و  $1/2$  mm استفاده شده است. تمامی نمونه‌ها به صورت مربعی شکل در ابعاد  $160$  mm برش داده شده است و سطح ورق

آلومینیومی مطابق شکل ۳-۱۲ با سمباده ۱۰۰ به صورت دستی زبر شده است. این زبری سطح برای چسبیدن بهتر پلی اورتان در دمای بالا بر روی سطح ورق می‌باشد.



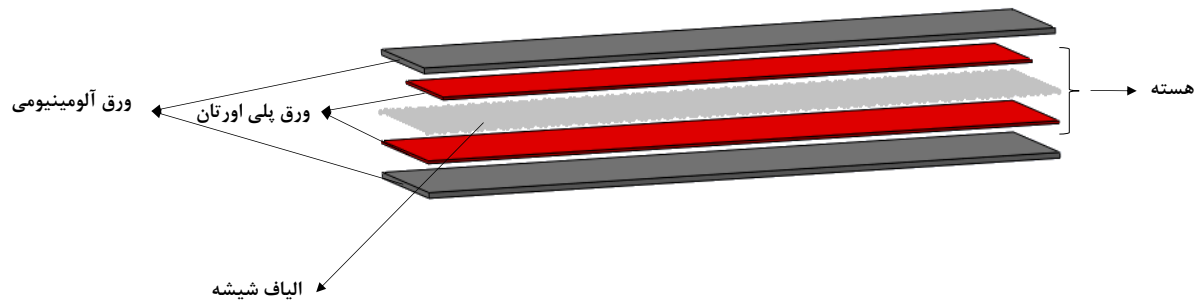
شکل ۴-۱۲ سطح ورق آلومینیومی پس از سمباده زدن و زبر کردن

#### ۴-۵-۵- ورق پلی اورتان

پلی اورتان به شکل‌های مختلف از جمله پودر، فوم‌های نرم، فوم‌های سخت، الاستومرها، ورق، گرانول، رزین، رنگ، پوشش، چسب، انواع جلادهنده و... در صنعت کاربرد دارند. مقاومت پلی اورتان‌ها در برابر سایش ضربه و ترک خوردگی بسیار خوب است، از جمله ویژگی‌های آنها پخت سریع و کامل در دمای محیط است. از پلی اورتان‌ها به دلیل خواص مطلوب آن در صنایع مختلف برای عایق، کف پوش‌ها، در صنعت پزشکی، صنایع خودرو و پاک‌سازی آلودگی‌های نفتی با فوم پلی اورتان استفاده می‌شود. در این پژوهش از ورق پلی اورتان با ضخامت ۱ mm و با درجه سختی ۸۵ شور<sup>۱</sup> به کار گرفته شده است.

شکل ۳-۱۳ نحوه قرارگیری لایه‌ها برای ساخت ورق‌های FML را نشان می‌دهد که می‌تواند از دو ورق آلومینیومی و دو ورق پلی اورتان و یک لایه الیاف شیشه تشکیل شده باشد. الیاف شیشه و لایه‌های پلی اورتان هسته را تشکیل می‌دهند. هسته بین دولایه ورق آلومینیومی نازک با دما و فشار بالا به ورق‌های آلومینیومی متصل می‌شوند.

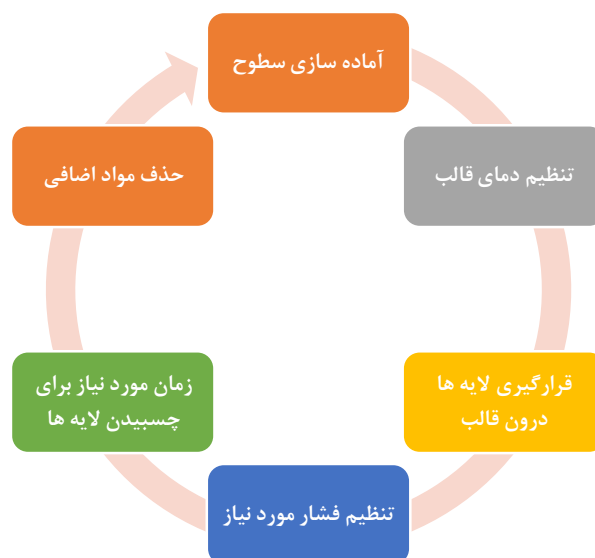
<sup>۱</sup> Shore A



شکل ۴-۱۳ نحوه قرارگیری لایه‌ها در قالب برای ساخت ورق FML

#### ۴-۵-۶- ساخت ورق‌های FML

ورق پلی اورتان می‌تواند در یک مرحله در قالب قرار گیرد و تولید شود. یا می‌توان هسته را آماده نمود و سپس بین دو ورق آلومینیومی قرار داد. اما در این پایان‌نامه تمامی لایه‌ها بر روی هم قرار می‌گیرند و سپس در سه مرحله با فشار بالا تولید می‌شوند که نتایج خوبی به دست آمده است. ورق‌های FML در سه ضخامت ۲/۸۵، ۲/۶۵ و ۲/۳۵ mm ساخته شده است. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته اگر لایه در قالب با یک مرحله در فشار و دمای بالا قرار داده شود به دلیل ذوب شدن لایه پلی‌اورتان و فشار بالا الیاف شیشه از بین قالب سر خورده و پلی‌اورتان همراه با الیاف به یک سمت کشیده می‌شود. برای ساخت ورق FML به ترتیب نمودار شکل ۴-۱۴ مراحل را انجام گرفته شده که توضیحات آن در ادامه ارائه شده است.



شکل ۴-۱۴ مراحل ساخت ورق FML در دما و فشار بالا

۱- ابتدا باید از تمیزی تمامی سطوح تماس بین ورق آلومینیومی و ورق‌های پلی اورتان اطمینان حاصل شود. سطح ورق آلومینیوم را پس از زبر نمودن و همچنین سطح ورق پلی اورتان با استون تمیز شده است.

۲- دمای قالب را تنظیم نموده که در این پژوهش مناسب با جنس پلی اورتان و درجه سختی آن ۱۷۵C قرار گرفته است.

۳- سپس لایه‌ها را پس از برش به اندازه مورد نیاز مطابق شکل ۳-۷ به ترتیب روی هم گذاشته و داخل قالب گذاشته می‌شود.

۴- با استفاده از جک هیدرولیک فشار مورد نیاز که ۱۰ bar انتخاب شده، تنظیم شود اما این فشار به دلیل ذوب شدن و حالت خمیری شدن لایه‌های پلی اورتان، افت پیدا می‌کند.

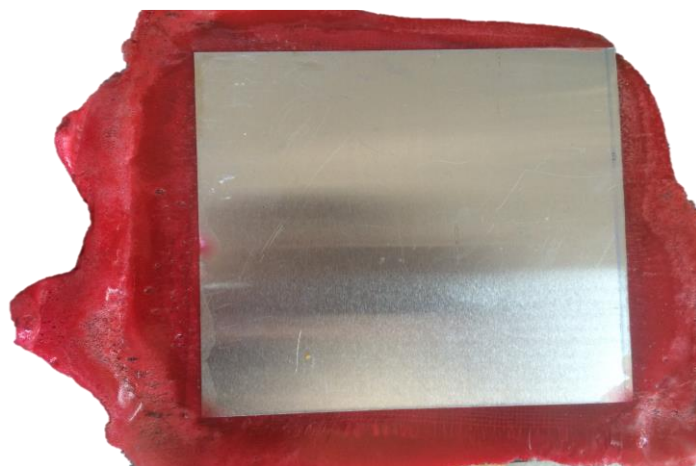
۵- در مرحله بعد با زمان مورد نیاز برای نفوذ کامل خمیر پلی اورتان به درون الیاف‌های شیشه و چسبیدن آن به سطح ورق آلومینیومی انجام می‌شود. زمان مورد نیاز در مرحله اول ۸ الی ۱۰ دقیقه انتخاب شده است.

۶- پس از دادن زمان، فشار و حرارت مورد نیاز قالب را باز نموده و ورق FML تولید شده که مواد اضافی در اطراف ورق مطابق شکل ۳-۱۶ مشاهده می‌شود که می‌توان مواد اضافی را در هر مرحله از قرار گرفتن در قالب برش داد تا مانع کار نشود.

۷- ورق برای رسیدن به ضخامت مناسب مجدد وارد قالب پرس گرم می‌شود. به دلیل سرخوردن الیاف شیشه و دقیق نبودن ضخامت ورق در تمامی نقاط در یک مرحله نمی‌توان ورق FML مناسب را تولید نمود. بنابراین در سه مرحله پیشنهاد می‌شود که ساخت این ورق‌ها انجام گیرد.

ورق‌های FML با انتخاب پارامترهای دما، فشار، زمان و جنس مواد استفاده شده تولید می‌شوند و با تغییر هر یک از این پارامترها رفتار مکانیکی متفاوتی و نتایج مختلفی در آزمون‌های شکل‌دهی مشاهده خواهد شد. چون اهداف این پایان‌نامه شکل‌دهی تدریجی و ایجاد لبه می‌باشد، برای ساخت این ورق‌ها

در تمامی مراحل پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است. هرچند در ابتدا با سعی و خطا نمونه‌هایی با شکست مواجه شد، اما در انتها پارامترهای مناسب انتخاب و ارائه شد. این ورق‌ها برای انجام آزمایش‌های تجربی، مناسب با قالب شکل‌دهی تدریجی و همچنین آزمون کشش آماده شده است.



شکل ۴-۱۵ مواد اضافی اطراف ورق FML پس از خروج از قالب



## فصل ۵ نتایج و بحث

### ۵-۱- مقدمه

در این فصل، نتایج آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی به همراه نمودارها و تصاویر مربوطه ارائه می‌شود. ابتدا نتایج شبیه‌سازی توزیع ضخامت در دیواره و ارتفاع لبه ایجاد شده ارائه می‌شود. همچنین آزمون‌های تجربی کشش تک‌محوره و سپس نتایج آزمون تجربی فرآیند شکل‌دهی تدریجی برای لبه‌کاری سوراخ در ورق‌های فلزی شامل میزان نازک شدگی ورق و ارتفاع دیواره در هر یک از راهبردها، با سرعت ثابت و متغیر ابزار شکل‌دهی برای ورق‌های آلومینیوم و ورق‌های FML بررسی می‌شود. و در انتها نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود با نتایج تجربی ارزیابی می‌شوند.

### ۵-۲- نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود

#### ۵-۲-۱- ارزیابی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی کویی [۴]

برای اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، ابتدا کار تجربی آقایان کویی و گائو [۴] مورد تحلیل قرار گرفته شده است و تطابق قابل قبولی بین نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود و کار تجربی حاصل شد. آقایان کویی و گائو شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای با سرعت ثابت انجام دادند. آن‌ها تاثیر مسیر ابزار را بر روی توزیع ضخامت بررسی کردند. همچنین تاثیر قطر سوراخ اولیه  $d_p$  را بر خرابی دیواره گزارش دادند. در این پژوهش

برای ارزیابی با پژوهش‌های قبلی تمامی تحلیل‌ها با سرعت ثابت شکل‌دهی و در دو مرحله شکل‌دهی انجام گرفته است. ضخامت اولیه ورق ۱ mm و از جنس آلیاژ آلومینیوم AA1060 می‌باشد که خواص مکانیکی آن در جدول ۱-۵ ارائه شده است.

جدول ۱-۵ مشخصات ورق آلیاژ آلومینیوم AA1060 [۴]

مدول یانگ (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	حداکثر استحکام شکست (MPa)	حداکثر افزایش طول (%)
۷۵	۱۴۸	۱۵۱	۱۳

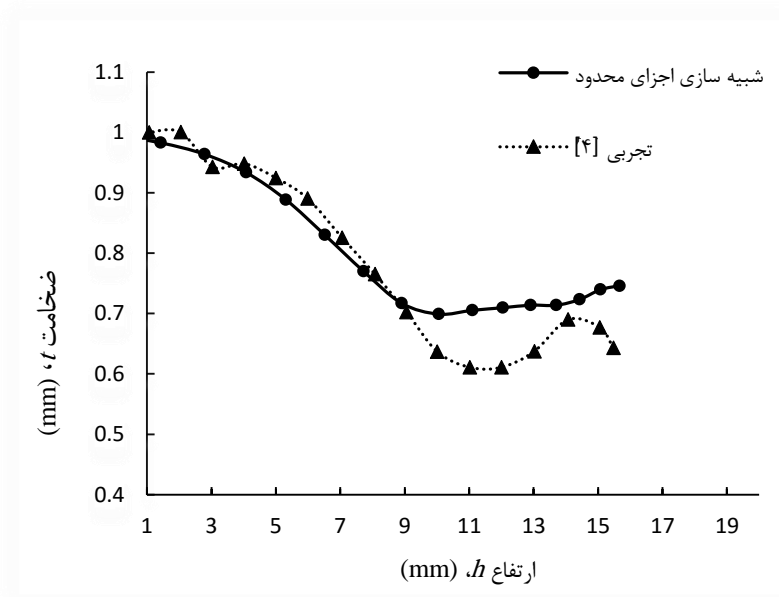
معمولاً جهت اعتبار سنجی ضخامت ورق از قانون سینوس استفاده می‌شود. این قانون برای اولین بار توسط ماتسوبارا در سال ۱۹۹۴ در شکل‌دهی نموی مورد استفاده قرار گرفت [۳۶] اما در این پژوهش به دلیل آنکه هدف تولید قطعه با دیواره  $\theta = 90^\circ$  می‌باشد از این فرمول به طور مستقیم نمی‌توان استفاده نمود.

$$t_f = t_i \sin \alpha$$

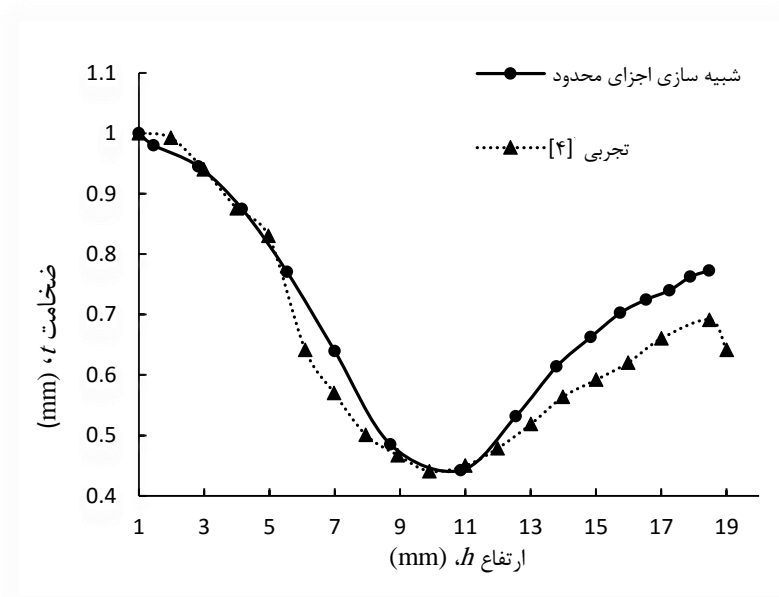
شکل ۱-۵ تا شکل ۳-۵ نتایج شبیه‌سازی سه راهبرد مسیر ابزار را نشان می‌دهد که با نتایج تجربی [۴] ارزیابی شد و مطابقت قابل قبولی مشاهده می‌شود. کمترین توزیع ضخامت در دیواره در راهبرد مسیر ۲ ابزار با سرعت‌های ثابت شکل‌دهی می‌باشد که در نتیجه کرنش‌های ضخامتی زیاد است و گلوبی شدن در وسط دیواره ایجاد می‌شود.

شکل ۴-۵ مقایسه تغییرات توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد ۴ مسیر ابزار با راهبرد ۲ مسیر ابزار در شبیه‌سازی اجزای محدود را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود راهبرد پیشنهادی مسیر ۴ ابزار نازک‌شدگی در دیواره را حدود ۲۵٪ نسبت به مسیر ۲ بهبود داده و از گلوبی شدن و خرابی در قطعه شکل‌دهی شده جلوگیری می‌کند. قسمتی از دیواره که در آن شکست و خرابی رخ می‌دهد ممکن است تغییر یابد [۴]. همانطور که از نتایج توزیع ضخامت مشخص می‌شود محدوده گلوبی شدن وابسته به راهبرد مسیر ابزار می‌باشد. در شکل ۵-۵ مقایسه شبیه‌سازی اجزای محدود مسیر ۳ ابزار با مسیر ۵ ابزار به علت ماهیت تقریباً یکسان

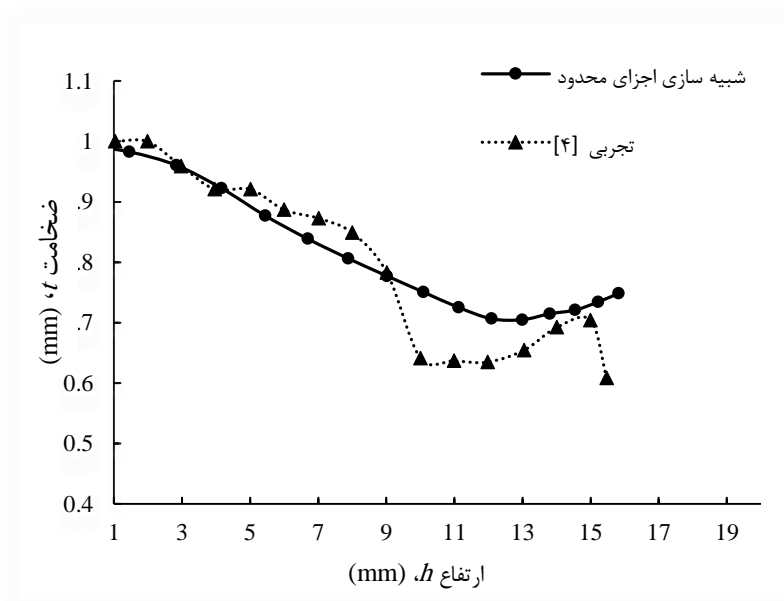
(موقعیت شعاع اولیه ابزار متفاوت) مقایسه شده است. این مسیر پیشنهادی حدود ۲۰٪ توزیع ضخامت بهتری نسبت به مسیر ۳ را نشان می‌دهد.



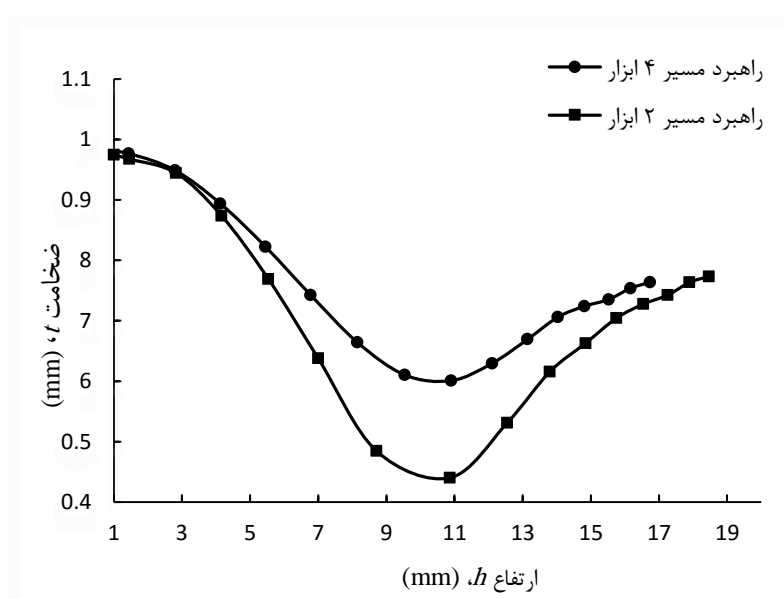
شکل ۵-۱ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد مسیر ۱ ابزار با سرعت ثابت



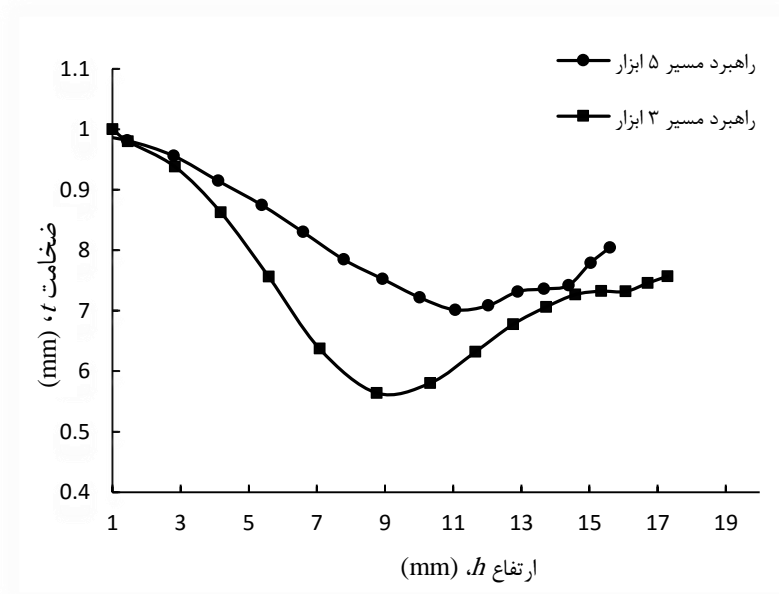
شکل ۵-۲ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد مسیر ۲ ابزار با سرعت ثابت



شکل ۳-۵ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد مسیر ۳ ابزار با سرعت ثابت



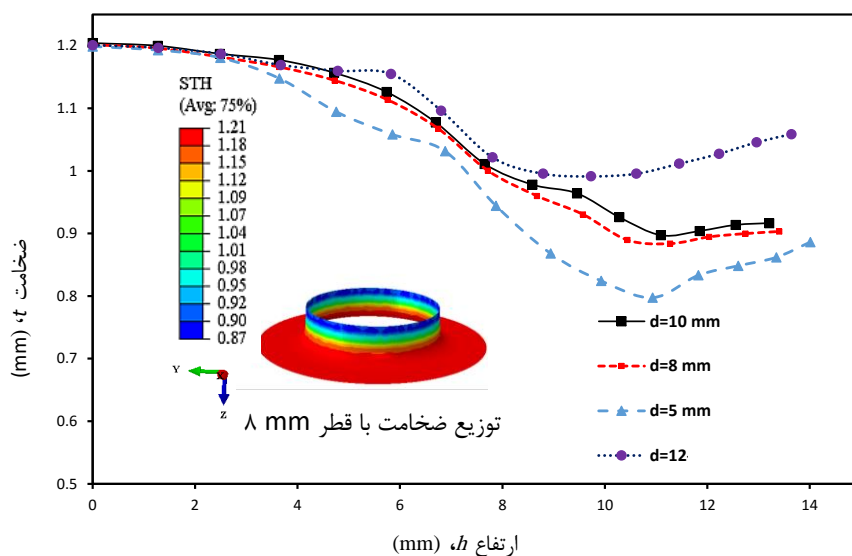
شکل ۴-۵ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد مسیر ۲ و ۴ ابزار با سرعت ثابت



شکل ۵-۵- توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد مسیر ۳ و ۵ ابزار با سرعت ثابت

#### ۵-۲-۲- تأثیر قطر ابزار شکل‌دهی بر توزیع ضخامت

تحلیل‌های اجزای محدود با ابزار سرکروی قطر ۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ mm نیز انجام شده است. تمامی این تحلیل‌ها با سرعت ثابت، ۳ مرحله شکل‌دهی و در مسیر ۱ ابزار بررسی شده است. افزایش شعاع ابزار سبب بزرگ‌تر شدن ناحیه شکل داده شده ورق در سطوح تماس ابزار می‌شود و به همین دلیل نیروهای شکل‌دهی در سطح بیشتری انتشار یافته و فشار وارد از ابزار به ورق کمتر شده که این خود به کاهش تغییرات در ضخامت ورق می‌انجامد [۲۰ و ۲۲]. هرچه قطر ابزار کمتر می‌شود شکل‌دهی به صورت موضعی‌تر شده و کرنش‌های ضخامتی و طولی بیشتر بر روی ورق اعمال می‌شود. ابزار سرکروی با قطر ۱۲ mm بهترین توزیع ضخامت در این فرآیند را دارد بنابراین ادامه کار تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود با این قطر انجام شده است (شکل ۵-۶).



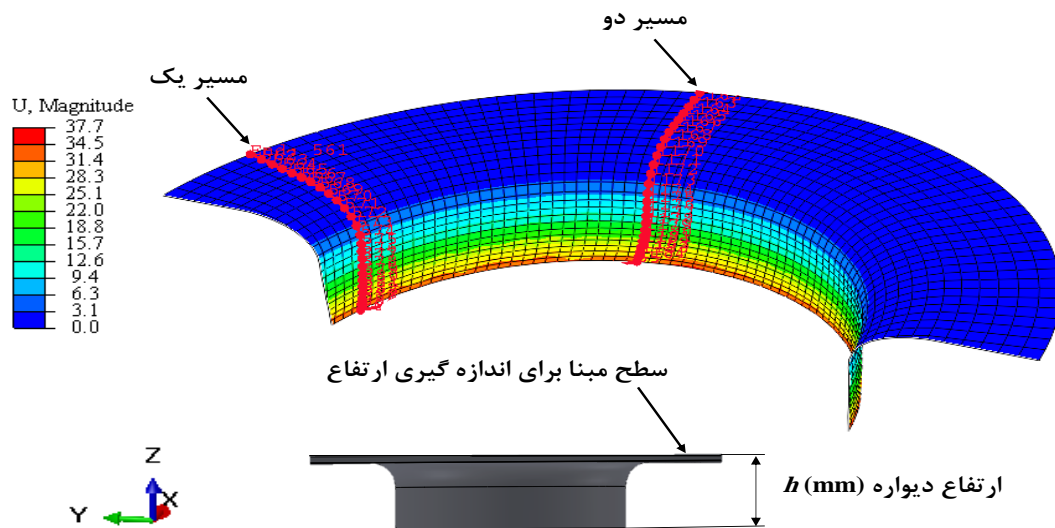
شکل ۵-۶ اثر قطر ابزار بر توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره با استفاده از راهبرد مسیر ۱ ابزار

### ۵-۲-۳- تأثیر راهبردهای مسیر ابزار در توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره

تغییرات ضخامت و کاهش ضخامت در شکل‌دهی ورق‌های فلزی پارامتر مهم بر استحکام محصول می‌باشد. در نتیجه کنترل ضخامت و جلوگیری از گلوبی شدن و ایجاد عیب در قطعات امری ضروری است. همچنین پیش‌بینی ارتفاع دیواره مناسب در شکل‌دهی می‌تواند میزان شکل‌پذیری قطعات و دقت در تولید را افزایش دهد. نمودارهای توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در هر یک از راهبردهای مسیر ابزار به صورت مجزا در سه و شش مرحله شکل‌دهی ارائه می‌شود. پارامترهای مورد استفاده در این تحلیل مطابق جدول ۴-۲ تعریف شده است. قابل ذکر است برای اندازه‌گیری ارتفاع دیواره سطح بالایی ورق، سطح مبنا در نظر گرفته شده است. بر روی قطعه شکل‌دهی شده، دو مسیر برای به دست آوردن توزیع ضخامت در هر تحلیل تعریف شده و میانگین نتایج این دو مسیر ارائه شده است (شکل ۵-۷).

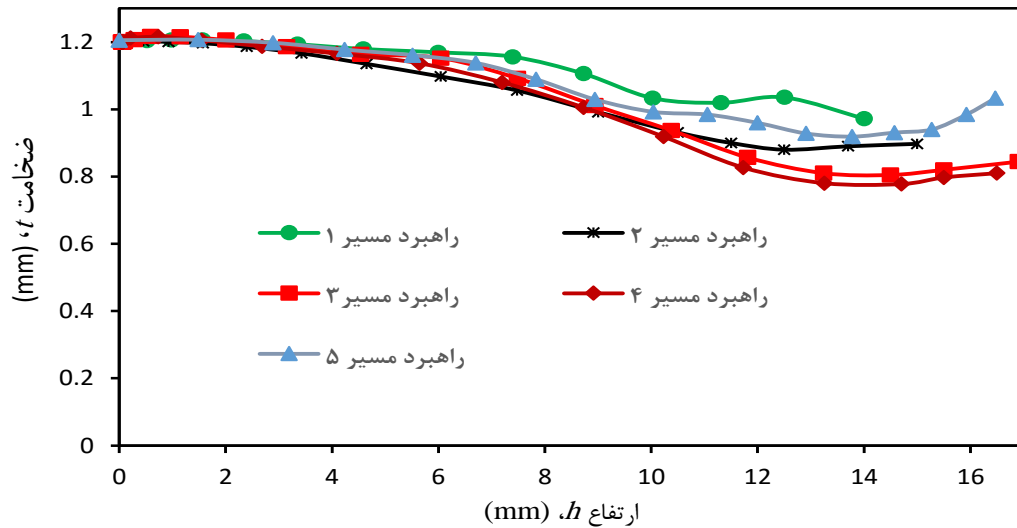
جدول ۲-۵ پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی اجزای محدود

تعداد مراحل شکل دهی	قطر سوراخ اولیه (mm)	سرعت دورانی قالب (rev/min)	سرعت پیشروی ابزار (mm/rev)
۳ و ۶	۳۵	۱۰۰	۰/۵

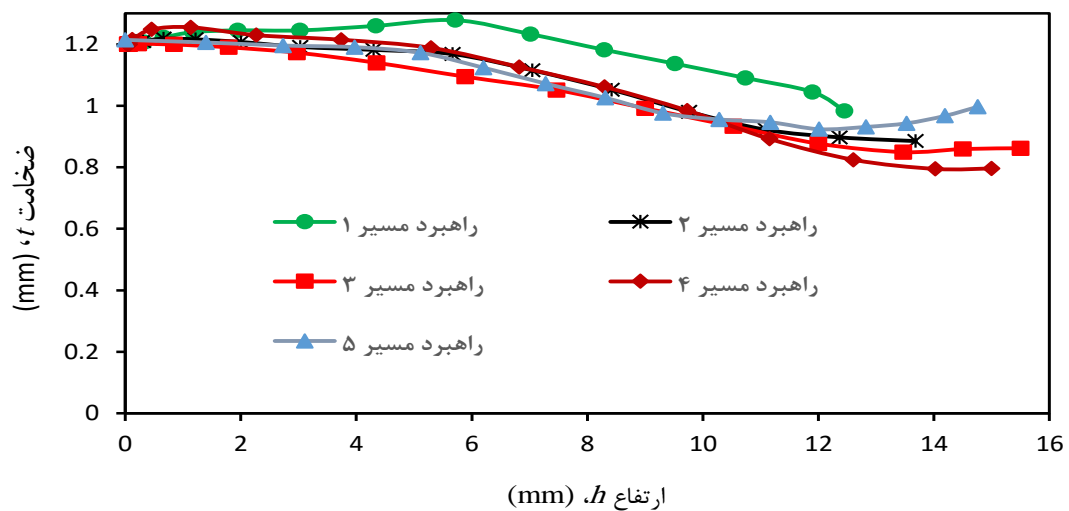


شکل ۷-۵ مسیرهای تحلیل برای بررسی توزیع ضخامت در دیواره ایجاد شده

شکل ۸-۵ نتایج توزیع ضخامت شبیه‌سازی اجزای محدود با سرعت‌های متغیر ابزار را در سه مرحله شکل‌دهی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است راهبرد ۱ مسیر ابزار بهترین توزیع ضخامت را دارد اما از طرفی کمترین ارتفاع در دیواره را دارا می‌باشد. راهبرد ۵ مسیر ابزار هم توزیع ضخامت خوبی دارد و هم دارای ارتفاع بهتری نسبت به دیگر راهبردهای مسیر ابزار می‌باشد. شکل ۹-۵ نشان دهنده توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد هرچه تعداد مراحل شکل‌دهی بالاتر می‌رود توزیع ضخامت یکنواخت‌تر می‌شود و همچنین پراکندگی تاثیر مسیر ابزار بر توزیع ضخامت کمتر می‌شود [۴].



شکل ۵-۸ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره پنج راهبرد مسیر ابزار در شبیه‌سازی اجزای محدود با سه مرحله شکل‌دهی

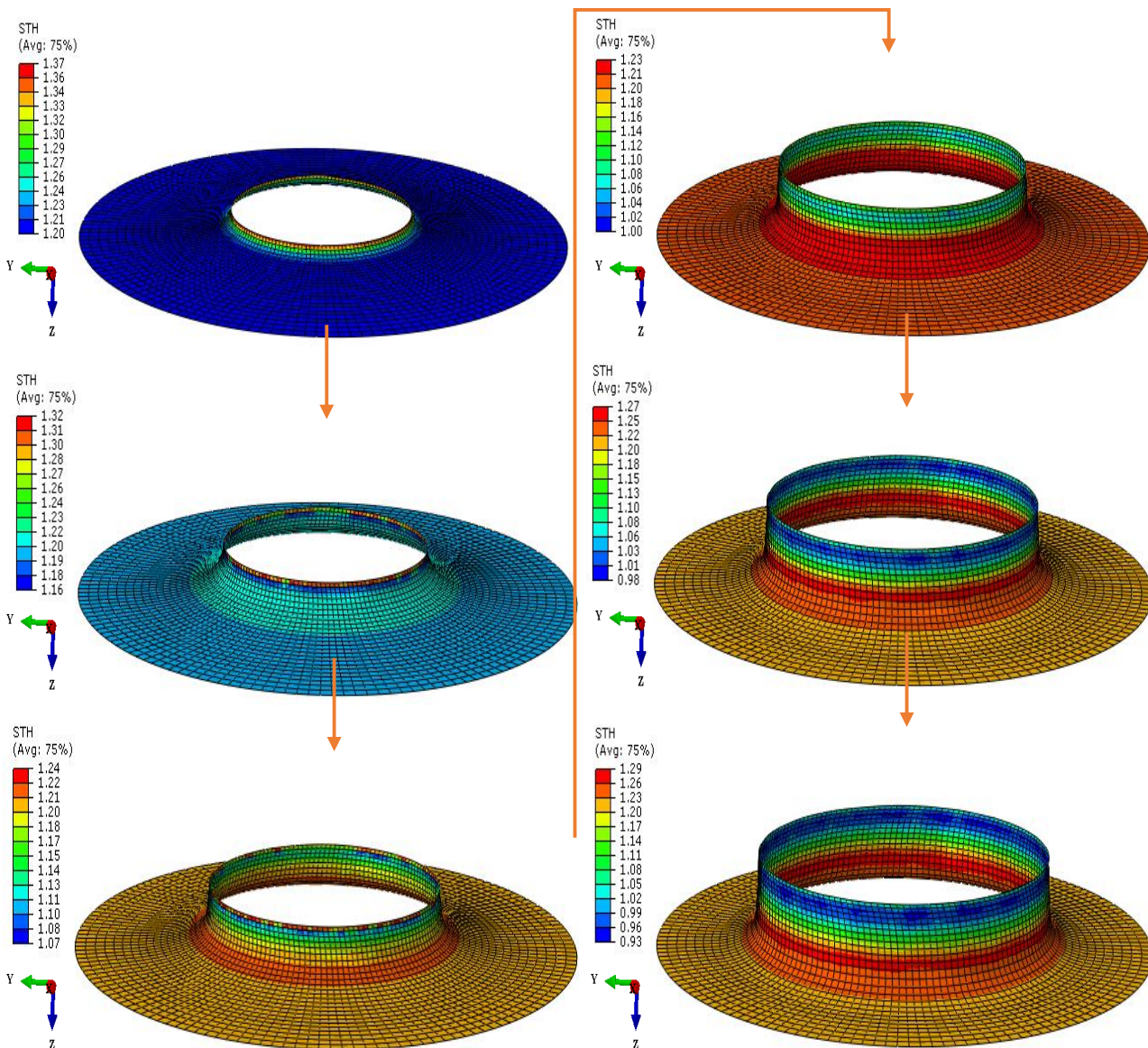


شکل ۵-۹ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره پنج راهبرد مسیر ابزار در شبیه‌سازی اجزای محدود با شش مرحله شکل‌دهی

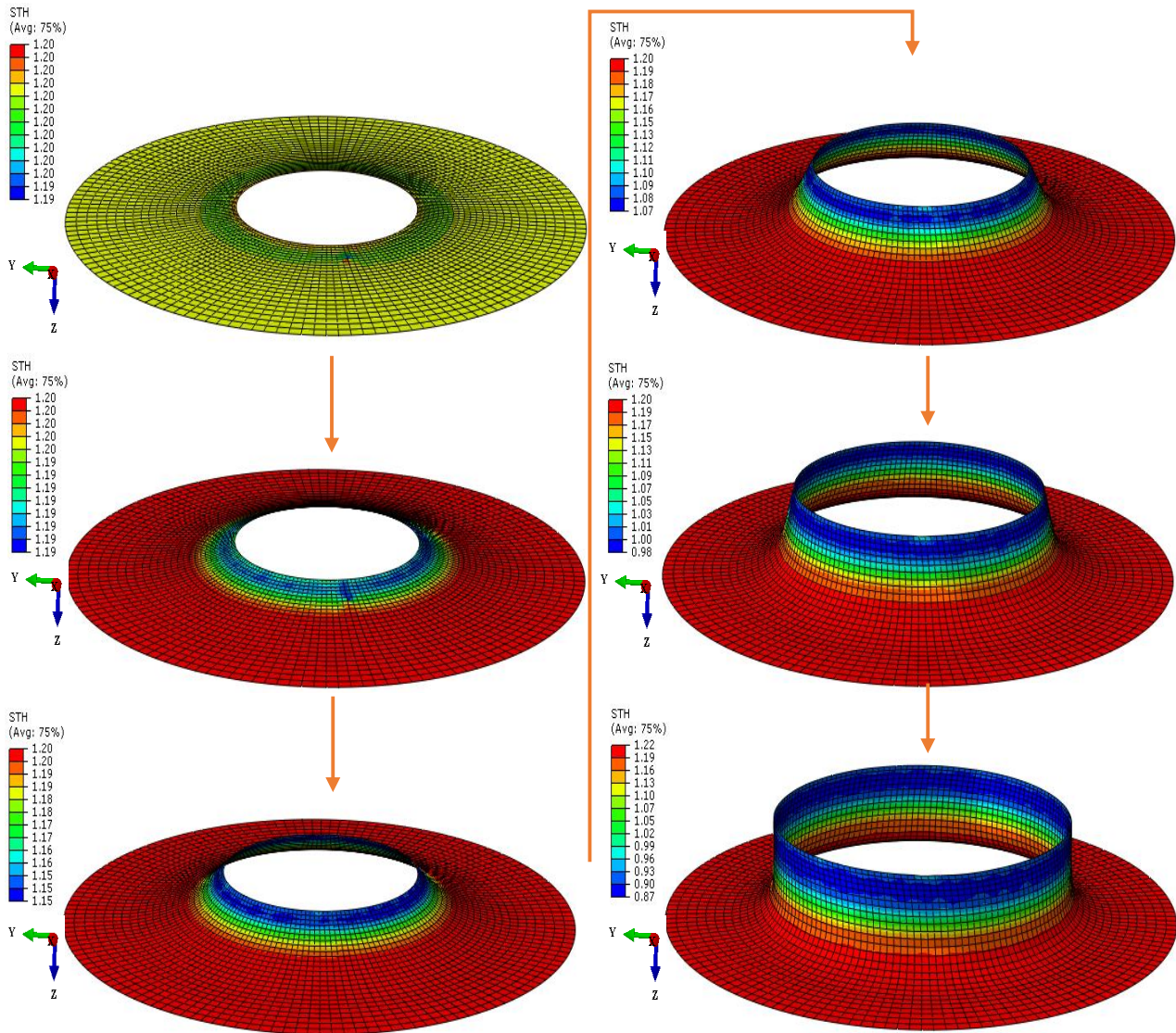
در شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی میزان نازک‌شدگی در هر مرحله از شکل‌دهی متفاوت می‌باشد. بنابراین برای درک درستی از مقدار تغییرات ضخامتی در هر مرحله شکل‌دهی نیازمند مشاهده تغییرات ضخامت در پایان هر گام از تحلیل می‌باشیم. شکل ۵-۱۰ توزیع ضخامت در شش مرحله شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی با راهبرد مسیر ۱ ابزار شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی برای ایجاد دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد مسیر ۱ ابزار به صورت کانتورهای رنگی را نشان می‌دهد. کمترین ضخامت در مرحله آخر شکل‌دهی  $0.93 \text{ mm}$



می‌باشد. شکل ۵-۱۱ توزیع ضخامت در شش مرحله شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی با راهبرد مسیر ۲ ابزار توزیع ضخامت در شش مرحله شکل‌دهی را با راهبرد مسیر ۲ ابزار نشان می‌دهد. ضخامت تا زاویه  $45^\circ$  یکنواخت است و کاهش ضخامت قابل توجه نمی‌باشد اما از زاویه  $45^\circ$  به بعد کاهش ضخامت کاملاً مورد توجه قرار می‌گیرد و همانطور که مشاهده می‌شود شکل‌دهی بحرانی از لحاظ توزیع ضخامت در مرحله آخر می‌باشد که دیواره به  $90^\circ$  می‌رسد.



شکل ۵-۱۰ توزیع ضخامت در شش مرحله شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی با راهبرد مسیر ۱ ابزار

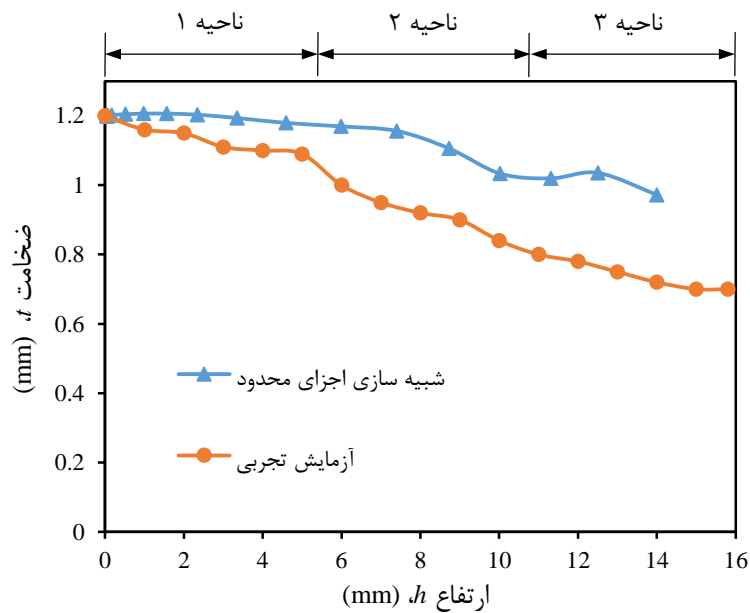


شکل ۵-۱۱ توزیع ضخامت در شش مرحله شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی با راهبرد مسیر ۲ ابزار

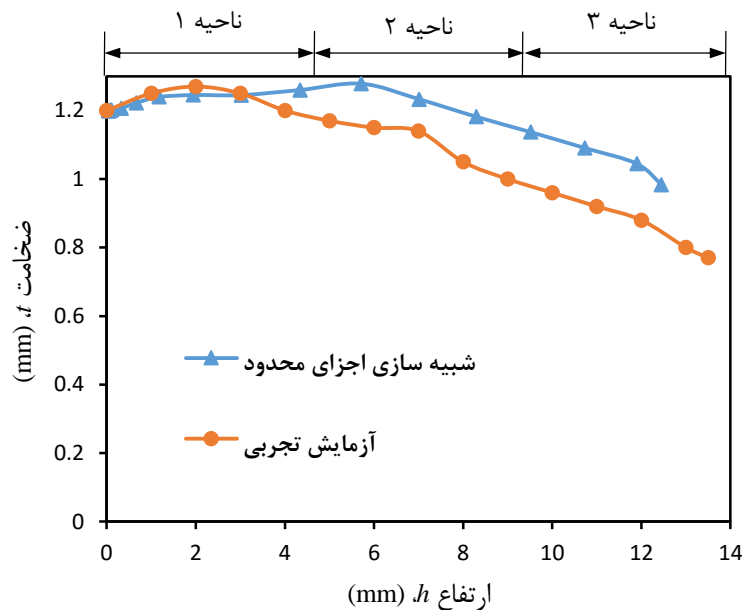
### نتایج توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد ۱ مسیر ابزار

در این پژوهش لبه‌کاری در قطعات ورقی با استفاده از روش شکل‌دهی تدریجی در چند مرحله انجام می‌شود. شکل ۵-۱۲ نشان دهنده نتایج تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود توزیع ضخامت در دیواره با استفاده از سه مرحله شکل‌دهی در سرعت‌های متغیر ابزار است. شکل ۵-۱۳ ارتفاع دیواره و توزیع ضخامت در شش مرحله‌ی شکل‌دهی را نشان می‌دهد. قطعه شکل‌دهی شده را از لحاظ توزیع ضخامت در دیواره می‌توان به سه ناحیه تقسیم نمود. در ناحیه ۱ ضخامت دیواره بزرگتر از دیگر نقاط می‌باشد و می‌توان گفت تقریباً تغییرات آن در ناحیه ۱ و ۲ ناچیز می‌باشد. ضخامت دیواره ورق به تدریج پس از عبور از ناحیه ۲ کاهش پیدا می‌کند و سپس

در ناحیه ۳ به کمترین مقدار می‌رسد. در این راهبرد ارتفاع دیواره ۱۶ mm مشاهده می‌شود و کرنش طولی کمتری وجود دارد که موجب خم شدن بیشتر ورق می‌شود که در نتیجه کرنش‌های کمتر و ارتفاع دیواره کمتری را خواهد داشت [۴]. همچنین با افزایش تعداد مراحل شکل‌دهی ارتفاع دیواره در ورق کاهش یافته و به ۱۴ mm می‌رسد. بنابراین با تعداد مراحل شکل‌دهی بیشتر کرنش‌های کمتری وجود دارد و تطابق بهتری بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود.



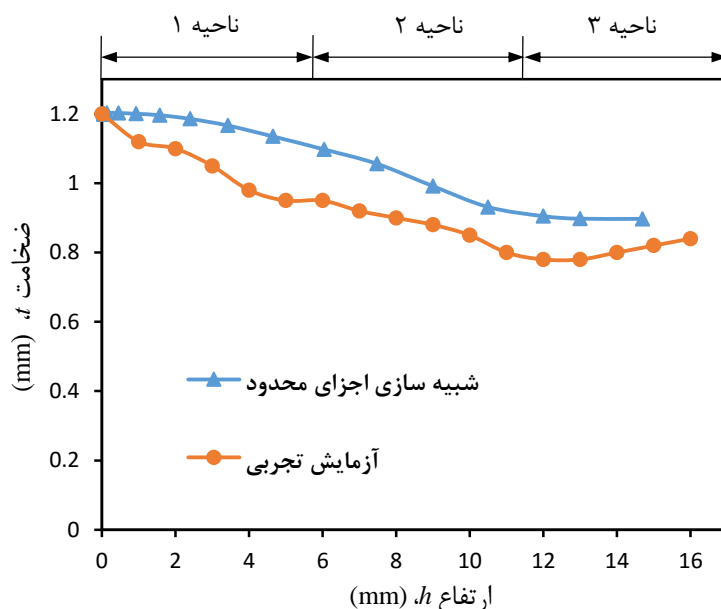
شکل ۵-۱۲ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در سه مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۱ مسیر ابزار



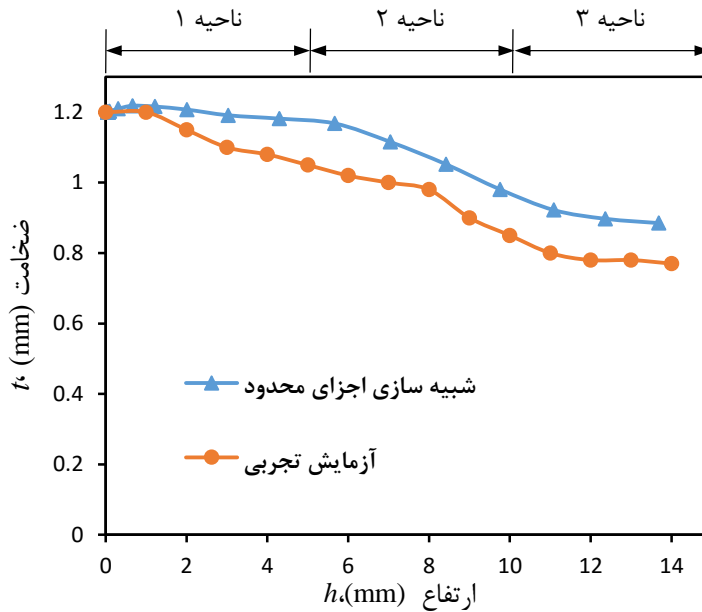
شکل ۵-۱۳ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۱ مسیر ابزار

### نتایج توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد ۲ مسیر ابزار

توزیع ضخامت ورق و ناحیه‌های موجود در راهبرد ۲ با راهبرد ۱ متفاوت می‌باشد. شکل ۵-۱۴ و شکل ۵-۱۵ به ترتیب نشان دهنده توزیع ضخامت در راهبرد مسیر ۲ با سه و شش مرحله شکل‌دهی می‌باشد. ضخامت از ابتدای ناحیه ۱ تا انتهای ناحیه ۲ به تدریج کاهش یافته است و سپس در ناحیه ۳ تغییرات ضخامت تقریباً ثابت می‌شود. بنابراین کمترین ضخامت در ناحیه ۳ می‌باشد که در این ناحیه خرابی رخ می‌دهد و قطعه دچار شکست و پارگی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵-۱۵ مشخص است با افزایش مراحل شکل‌دهی به توزیع ضخامت یکنواخت‌تری رسیده و میزان کرنش طولی در ورق کاهش می‌یابد و ورق بیشتر خم می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد با تعداد مراحل شکل‌دهی بیشتر ارتفاع دیواره کمتر شده است.



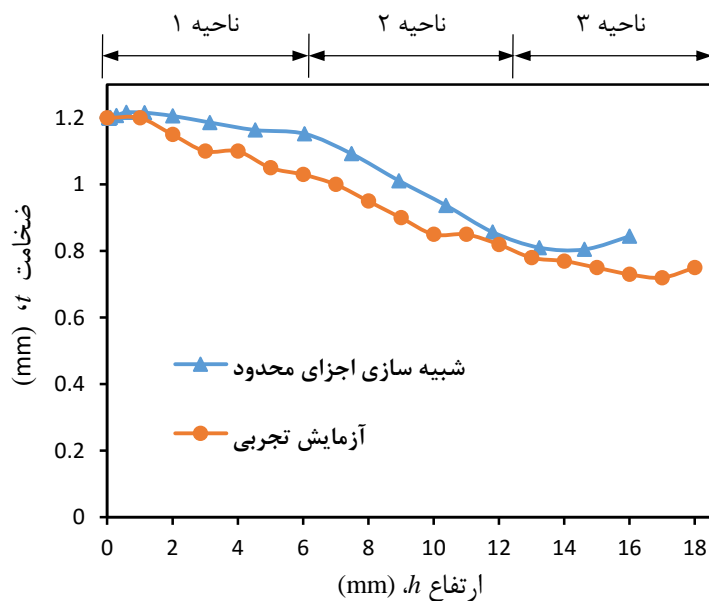
شکل ۵-۱۴ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در سه مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۲ مسیر ابزار



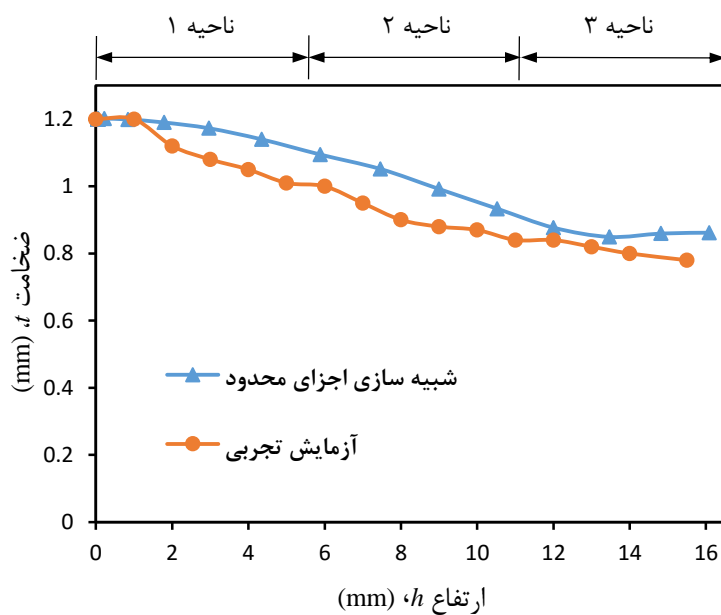
شکل ۵-۱۵ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل دهی با راهبرد ۲ مسیر ابزار

### نتایج توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد ۳ مسیر ابزار

شکل ۵-۱۶ و شکل ۵-۱۷ به ترتیب توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در سه و شش مرحله شکل دهی با استفاده از راهبرد مسیر ۳ را نشان می دهد. در این راهبرد توزیع ضخامت را می توان گفت شبیه به راهبرد مسیر ۲ ابزار می باشد با این تفاوت که ارتفاع دیواره بیشتری ایجاد شده است. این راهبرد کرنش طولی بیشتری نسبت به راهبرد مسیر ۲ ایجاد می کند و به همین دلیل ارتفاع دیواره بیشتر است. ارتفاع دیواره در سه مرحله شکل دهی و در آزمایش تجربی تا ۱۸ mm و شبیه سازی ۱۶/۵۰ mm می باشد. نتایج نشان می دهند با افزایش تعداد مراحل شکل دهی کاهش ضخامت در این ناحیه کمتر شده است و ارتفاع دیواره به ۱۶ mm می رسد.



شکل ۵-۱۶ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در سه مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۳ مسیر ابزار



شکل ۵-۱۷ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۳ مسیر ابزار

### نتایج توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد ۴ مسیر ابزار

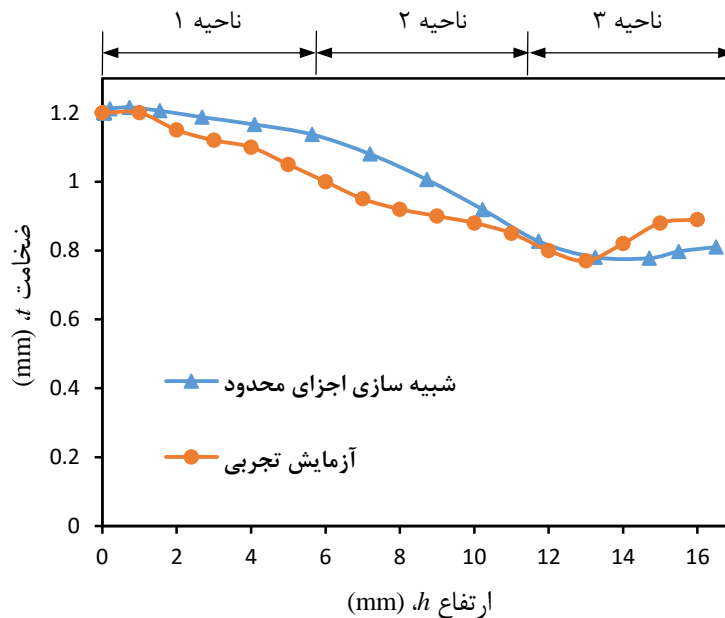
ابزار بر روی مسیر دارای انحنا که با استفاده از توابع نمایی نوشته شده است، با سرعت متغیر حرکت می‌کند.

شکل ۵-۱۸ توزیع ضخامت با استفاده از راهبرد مسیر ۴ در سه مرحله شکل‌دهی می‌باشد که ضخامت از ناحیه

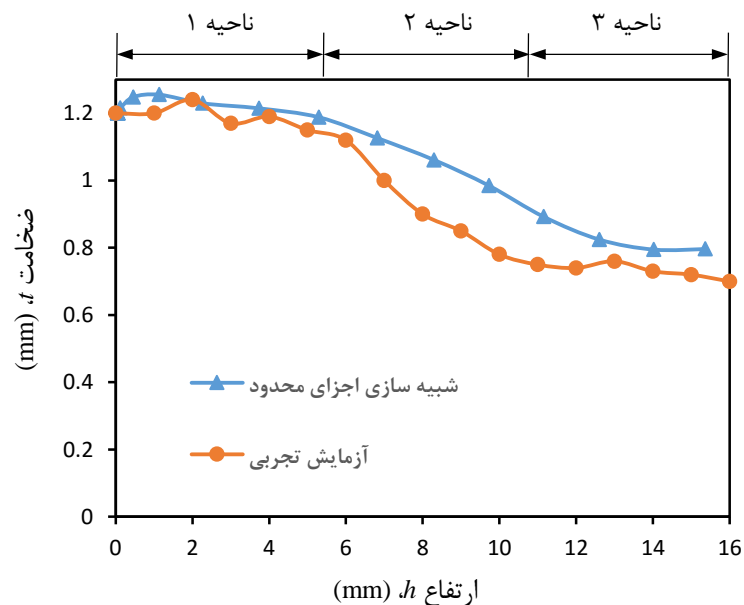
۱ تا ناحیه ۲ به تدریج کاهش یافته و در ابتدای ناحیه ۳ به کمترین مقدار خود می‌رسد. شکل ۵-۱۹ توزیع

ضخامت در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۴ می‌باشد که در ناحیه ۱ توزیع ضخامت یکنواخت نیست و

کاهش ضخامت به صورت تدریجی مشاهده نمی‌شود اما در ناحیه ۲ کاهش ضخامت به صورت چشمگیری مشاهده می‌شود و سپس در ناحیه ۳ تقریباً می‌توان گفت تغییرات ضخامت ناچیز می‌باشد. همچنین نمودارهای راهبرد ۴ مسیر ابزار نشان می‌دهد که ارتفاع دیواره تغییر چندانی نمی‌کند.



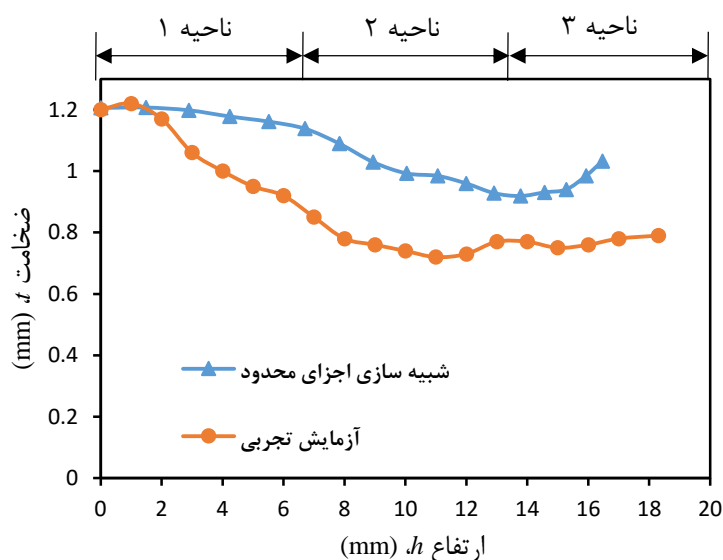
شکل ۵-۱۸ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در سه مرحله شکل دهی با راهبرد ۴ مسیر ابزار



شکل ۵-۱۹ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل دهی با راهبرد ۴ مسیر ابزار

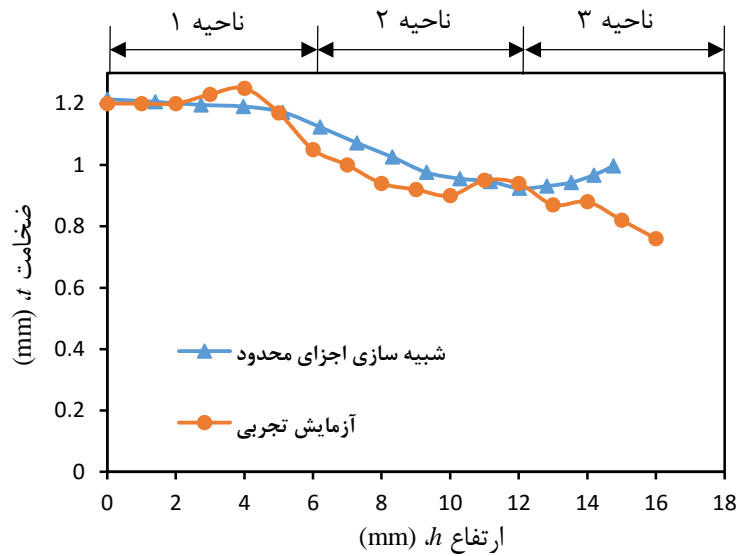
### نتایج توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در راهبرد ۵ مسیر ابزار

شکل ۵-۲۰ و شکل ۵-۲۱ نتایج شبیه‌سازی راهبرد مسیر ۵ ابزار را نشان می‌دهد. این مسیر ابزار بهترین توزیع ضخامت را در نتایج شبیه‌سازی دارد. همانطور که در نمودار توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره مشاهده می‌شود تا ابتدای ناحیه ۳ کاهش ضخامت به صورت تدریجی وجود دارد و سپس تغییرات ضخامت ثابت می‌شود. این راهبرد، مسیر بسیار مناسب برای کمترین ضخامت در دیواره ورق می‌باشد که این به دلیل کرنش ضخامت و طولی کمتری در آن اعمال شده است. توزیع ضخامت و ناحیه موجود در آن همانند راهبرد ۴ است با این تفاوت که مقداری نمودار به سمت بالا جابجا شده است و ضخامت یکنواخت‌تری را نشان می‌دهد.



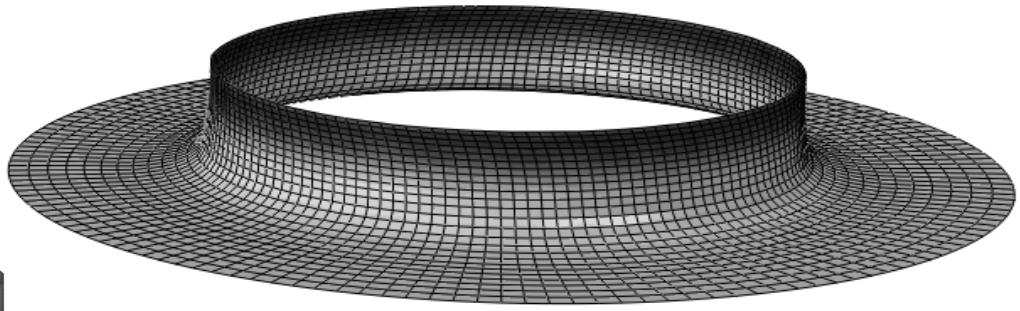
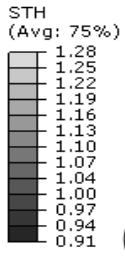
شکل ۵-۲۰: توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در سه مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۵ مسیر ابزار



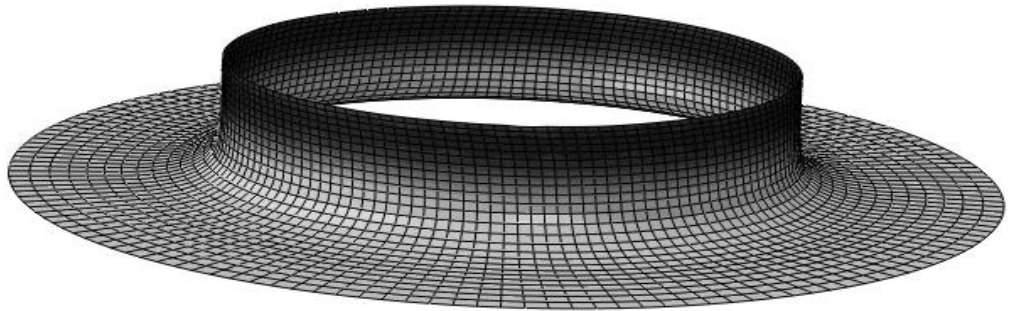
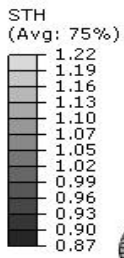


شکل ۵-۲۱ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل دهی با راهبرد ۵ مسیر ابزار

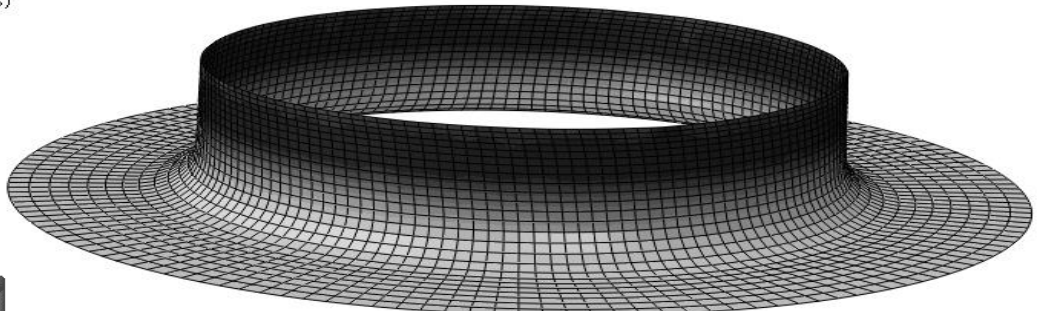
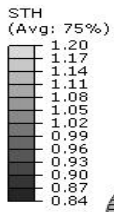
شکل ۵-۲۲ از (الف) تا (ه) به ترتیب نشان دهنده راهبرد مسیر ۱ تا ۵ ابزار در شبیه سازی اجزای محدود می باشد که کانتورها مشخص کننده توزیع ضخامت در دیواره ایجاد شده می باشد. راهبرد مسیر ۵ ابزار کمترین ضخامت در دیواره را دارد که تقریباً ۱۸٪ کاهش ضخامت و راهبرد مسیر ۴ ابزار بیشینه کاهش ضخامت را تقریباً ۳۵٪ نشان می دهد. شکل دهی در سه مرحله با سرعت متغیر به صورت مسیر پیوسته انجام شده است. قطر سوراخ اولیه ۳۵ mm و قطر سوراخ نهایی ۶۵ mm می باشد. هر ۵ راهبرد مسیر ابزار کمترین ضخامت را در نزدیکی لبه دیواره نشان می دهند که خرابی و شکست در لبه ها اتفاق می افتد.



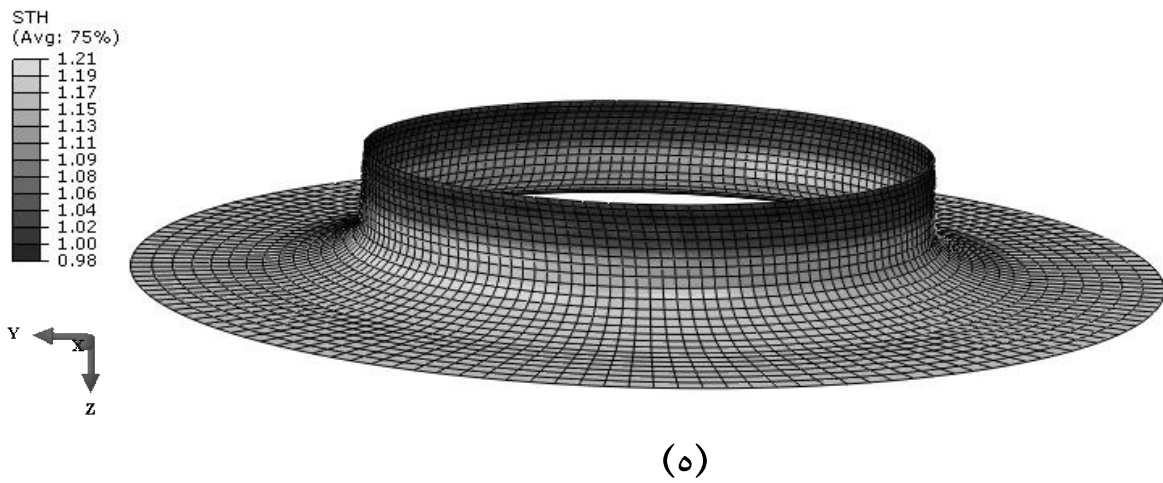
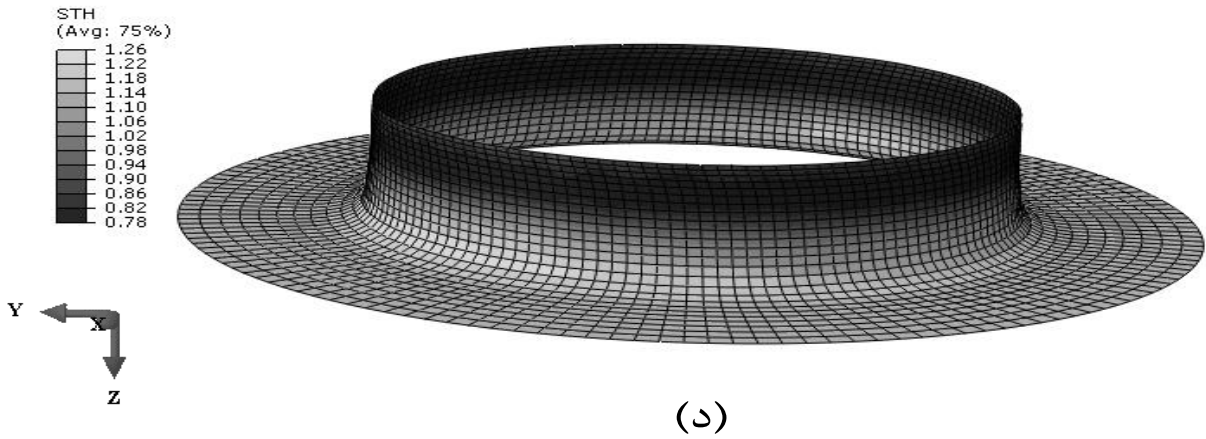
(الف)



(ب)



(ج)

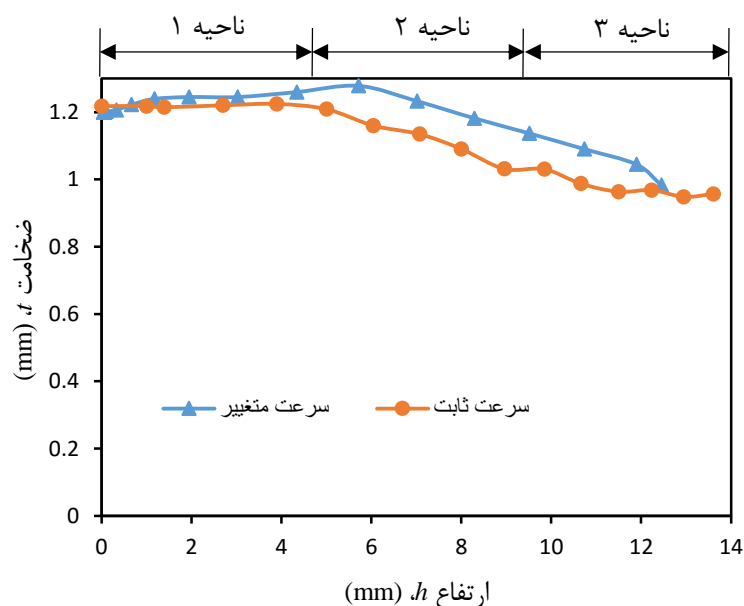


شکل ۵-۲۲ توزیع ضخامت در ورق شکل‌دهی شده (الف) - توزیع ضخامت در راهبرد مسیر ۱ ابزار (ب) - توزیع ضخامت در راهبرد مسیر ۲ ابزار (ج) - توزیع ضخامت در راهبرد مسیر ۳ ابزار (د) - توزیع ضخامت در راهبرد مسیر ۴ ابزار (ه) - توزیع ضخامت در راهبرد مسیر ۵ ابزار

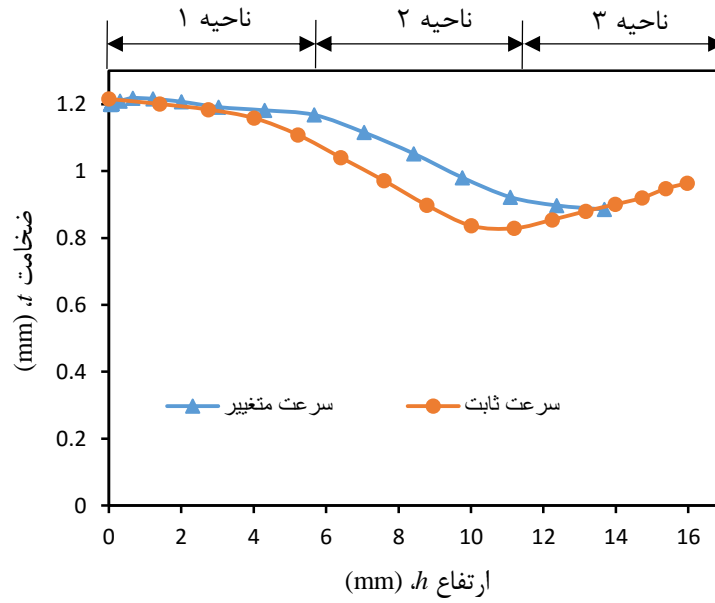
راهبردهای مسیر ابزار به صورت سرعت متغیر شکل‌دهی در سه و شش مرحله برای لبه‌دار کردن ورق فلزی بررسی شد. تمامی این مسیرها با استفاده از روش اجزای محدود به صورت سرعت متغیر در هر مرحله شکل‌دهی نیز مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج مقایسه‌ای نسبت به سرعت‌های متغیر و سرعت ثابت ابزار شکل‌دهی نیز ارائه می‌شود.

### ۵-۲-۴- نتایج توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در مسیر ابزار پیوسته با سرعت ثابت و سرعت متغیر ابزار

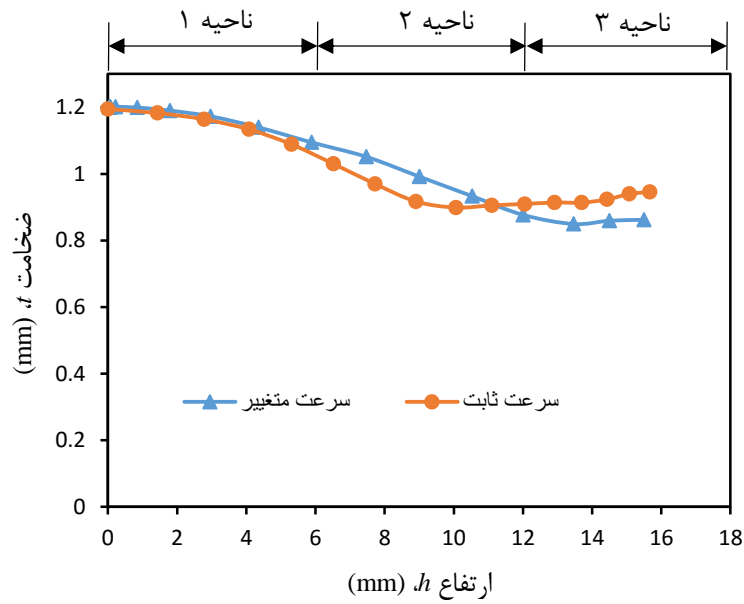
شکل ۵-۲۳ تا شکل ۵-۲۶ تغییرات ضخامت در ارتفاع دیواره را نشان می‌دهد. این نمودار بررسی تغییرات ضخامت و ارتفاع دیواره در شبیه‌سازی اجزای محدود با حرکت سرعت ثابت و متغیر ابزار شکل‌دهی می‌باشد. همانطور که در شکل‌ها مشخص است، توزیع ضخامت یکنواخت‌تری در سرعت‌های ثابت ابزار شکل‌دهی به‌جز راهبرد ۱ مشاهده می‌شود. در سرعت متغیر شکل‌دهی، کرنش ضخامتی بیشتری نسبت به سرعت ثابت شکل‌دهی در ورق مشاهده شده است. بنابراین کمترین ضخامت در سرعت‌های متغیر شکل‌دهی می‌باشد. همچنین ارتفاع دیواره در سرعت‌های ثابت ابزار بیشتر است. کمترین ضخامت دیواره در تمامی تحلیل‌های شبیه‌سازی اجزای محدود و در سرعت‌های ثابت به‌جز راهبرد ۱ می‌توان گفت در ناحیه ۲ اتفاق می‌افتد و کاهش ضخامت به تدریج در نواحی ۱ و ۲ وجود دارد و سپس در ناحیه ۳ افزایش ضخامت مجدد مشاهده می‌شود. در نتیجه پارگی و گلوئی شدن تقریباً در وسط دیواره و در ناحیه ۲ رخ می‌دهد. در راهبرد ۱ کمترین ضخامت در ناحیه ۳ و در لبه انتهایی دیواره ورق می‌باشد. بیشترین کش آمدن ورق در راهبرد مسیر ۲ ابزار می‌باشد که ارتفاع دیواره افزایش قابل توجهی نسبت به راهبردهای دیگر دارد.



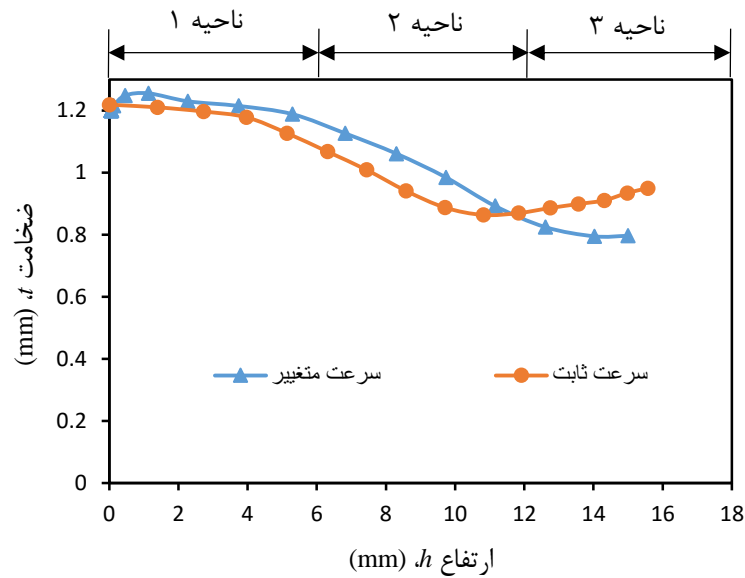
شکل ۵-۲۳ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۱ مسیر ابزار در سرعت‌های ثابت و متغیر ابزار شکل‌دهی



شکل ۲۴-۵ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۲ مسیر ابزار در سرعت‌های ثابت و متغییر ابزار شکل‌دهی



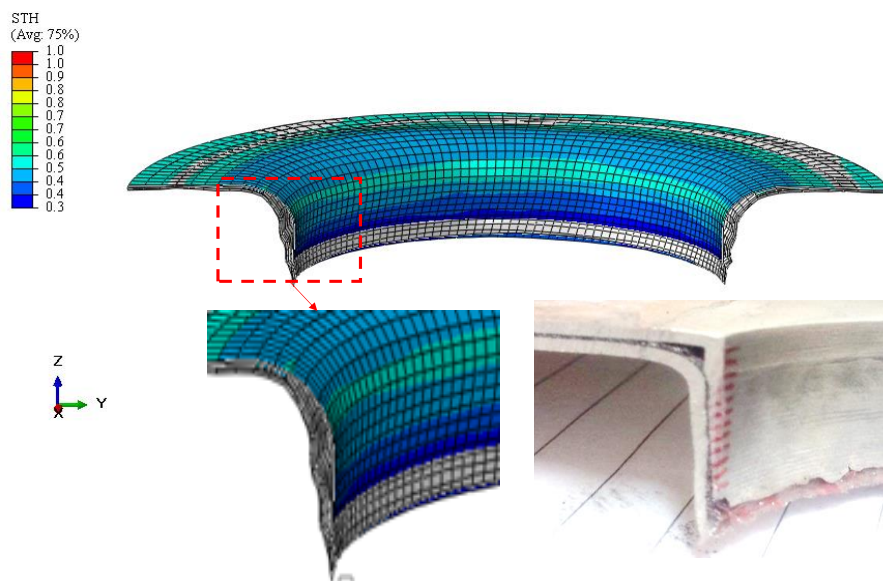
شکل ۲۵-۵ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۳ مسیر ابزار در سرعت‌های ثابت و متغییر ابزار شکل‌دهی



شکل ۵-۲۶ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی با راهبرد ۴ مسیر ابزار در سرعت‌های ثابت و متغییر ابزار شکل‌دهی

### ۵-۲-۵- نتایج جدایش لایه‌ها در ورق‌های FML

در شکل ۵-۲۷ شبیه‌سازی جدایش لایه‌ها را با استفاده از المان‌های چسب مشاهده می‌شود که لایه‌ها در قسمت شعاع قالب و در انتهای لبه دیواره از هم جدا شده‌اند. به دلیل آنکه یک لایه تحت تنش‌های کششی و لایه دیگر تحت تنش‌های فشاری قرار می‌گیرد جدایش در مرز دو لایه اتفاق می‌افتد.



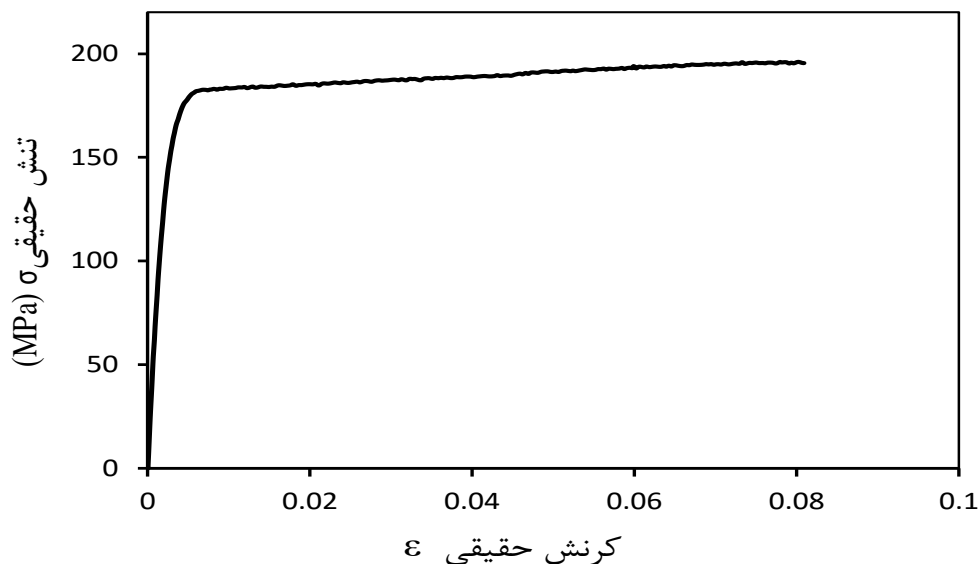
شکل ۵-۲۷ شبیه‌سازی جدایی المان‌های چسب از ورق فلزی در نرم‌افزار آباکوس

### ۵-۳- نتایج آزمایش‌های تجربی

خواص مکانیکی حاصل از آزمون کشش تک‌محوره برای شبیه‌سازی اجزای محدود ارائه می‌شود. سپس توزیع ضخامت در دیواره فلنج ایجاد شده و ارتفاع دیواره را برای هر یک از راهبردهای مسیر ابزار بحث می‌شود. در این پژوهش سرعت پیشروی ابزار  $0.5 \text{ mm/rev}$  و سرعت دورانی قالب  $50$ ،  $100$  و  $200 \text{ rev/min}$  استفاده شده است. پارامترهای دیگر مانند تأثیر سرعت شکل‌دهی، کیفیت سطح سوراخ اولیه و قطر سوراخ  $d_p$  بر توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره بررسی می‌شود.

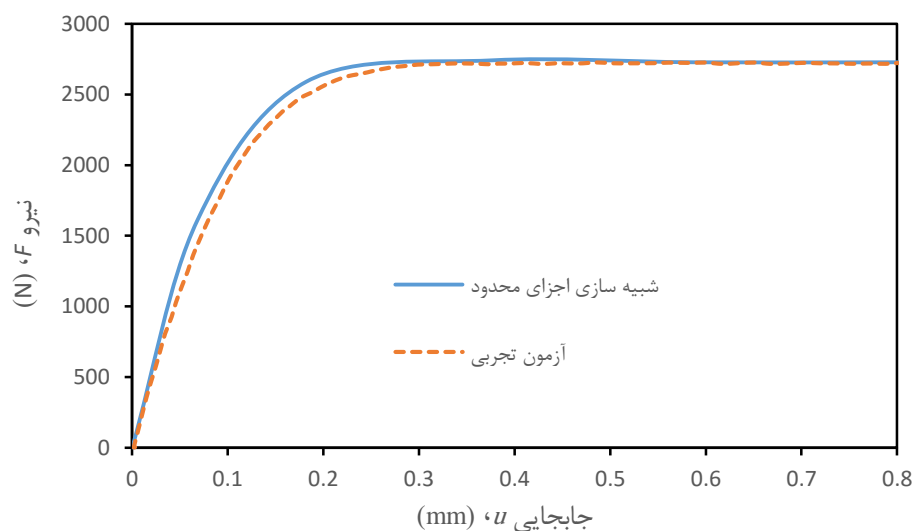
### ۵-۳-۱- نتایج آزمون کشش تک‌محوره

شکل ۵-۲۸ منحنی تنش-کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیوم AA3105 را بعد از انجام آزمون کشش تک‌محوره نشان می‌دهد. هدف از آزمون کشش تک‌محوره استخراج استحکام تسلیم ورق، استحکام نهایی ورق، مدول یانگ که برای انجام شبیه‌سازی اجزای محدود مورد استفاده می‌باشد. برای انجام این آزمایش یک نمونه ورق از آلیاژ آلومینیوم AA3105 با استفاده از استاندارد ASTM A370 در جهت نورد آماده شده است.



شکل ۵-۲۸ منحنی تنش-کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیوم AA3105

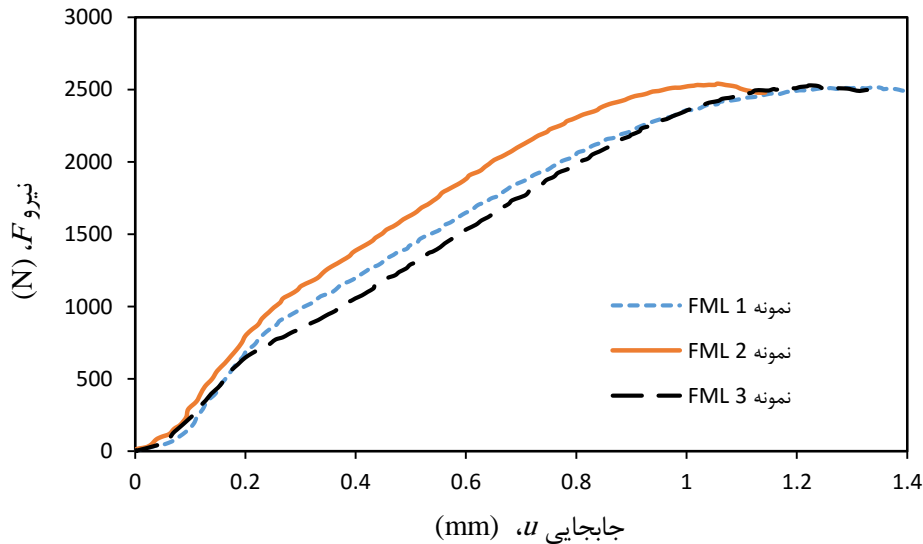
شکل ۵-۲۹ منحنی نیرو-جابجایی را در آزمون کشش تجربی و تحلیل اجزای محدود برای ورق فلزی نشان می‌دهد. شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس انجام شد و خروجی‌های حاصل از تست کشش به عنوان خصوصیات مواد در تحلیل استفاده شد تا صحت انجام تست ارزیابی شود. تحلیل از نوع دینامیکی/صریح می‌باشد و مدل‌سازی به دلیل تقارن به صورت یک چهارم صورت گرفت. نتایج از صحت داده‌ها برای انجام تحلیل را گزارش می‌دهند.



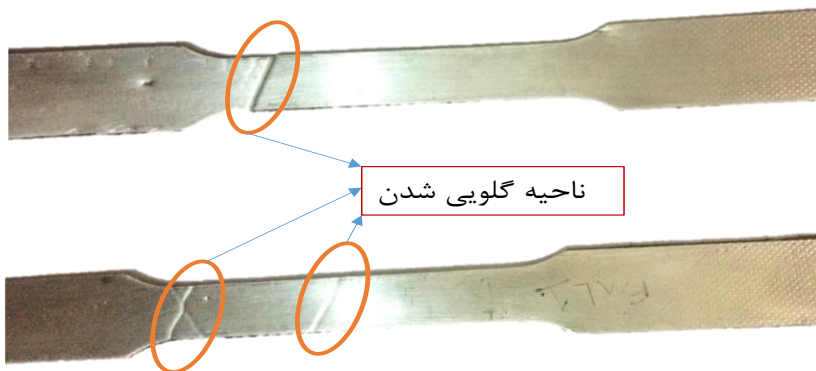
شکل ۵-۲۹ منحنی نیرو-جابجایی در آزمون کشش ورق فلزی آلیاژ آلومینیوم AA3105

شکل ۵-۳۰ منحنی نیرو-جابجایی سه نمونه آزمون کشش برای ورق‌های FML با ضخامت  $1/2$  mm را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها بر روی ورق فلزی گلولی شدن در چند ناحیه مشاهده می‌شود (شکل ۵-۳۱). به نظر می‌رسد به دلیل وجود الیاف‌های شیشه در بین ورق‌های فلزی استحکام شکست این نمونه‌ها افزایش یافته است.





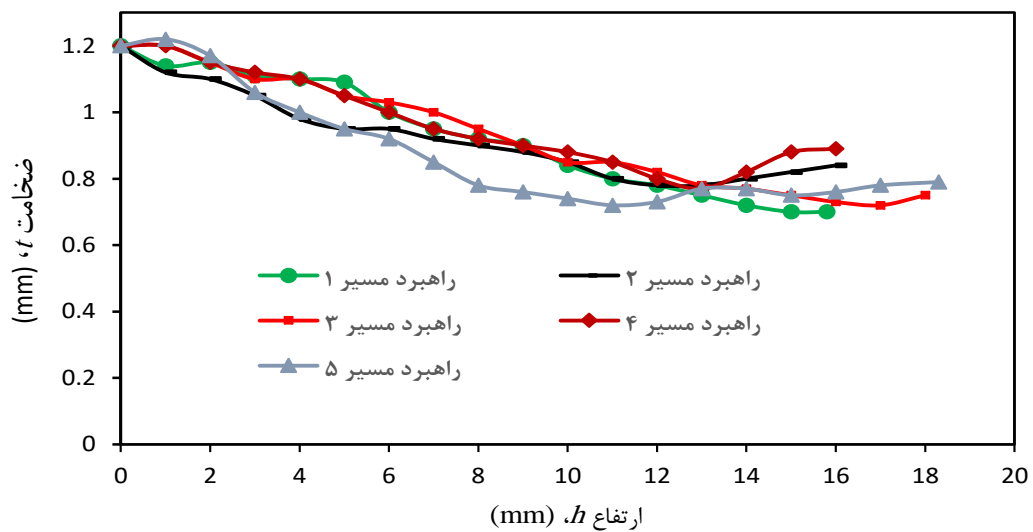
شکل ۳۰-۵ منحنی نیرو-جابجایی در آزمون کشش ورق‌های FML



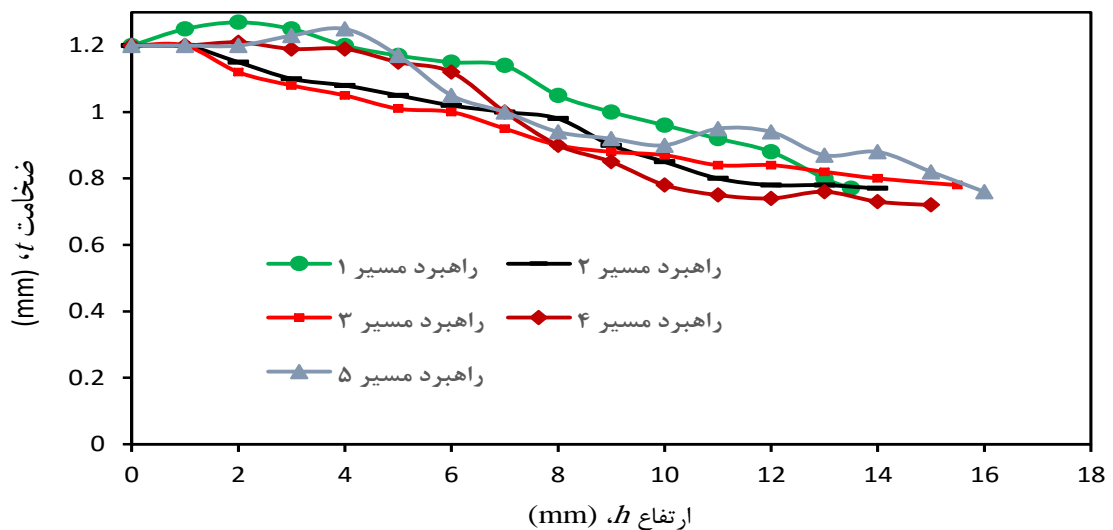
شکل ۳۱-۵ نمونه‌های FML پس از آزمون کشش

### ۵-۳-۲- بررسی تجربی تأثیر راهبردهای مسیر ابزار در توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره

شکل ۳۲-۵ پنج راهبرد مسیر ابزار در سه مرحله شکل‌دهی را نشان می‌دهد. راهبرد مسیر ۵ ابزار، بیشترین ارتفاع دیواره را در حدود ۱۸ mm دارا می‌باشد و از طرفی کاهش ضخامت در دیواره را تقریباً حدود ۳۴٪ بر روی نمودار، ایجاد کرده است. پنج راهبرد مسیر ابزار رفتار یکسانی را در کمترین توزیع ضخامت و در ارتفاع ۱۳ mm نشان می‌دهند. شکل ۳۳-۵ توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در شش مرحله شکل‌دهی را بر روی نمودار گزارش می‌دهد. در راهبرد مسیر ۴ ابزار کمترین ضخامت در دیواره حدود ۴۰٪ می‌باشد. همچنین راهبرد مسیر ۵ کمترین ضخامت را حدود ۳۰٪ در دیواره نشان می‌دهد.



شکل ۳۲-۵ نتایج تجربی توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در پنج راهبرد مسیر ابزار با سه مرحله شکل‌دهی

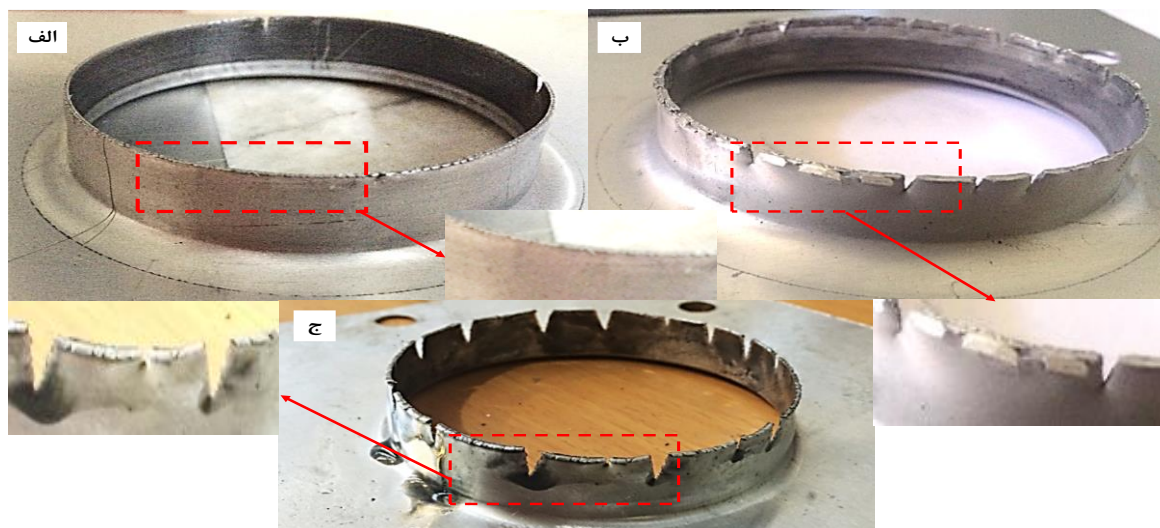


شکل ۳۳-۵ نتایج تجربی توزیع ضخامت و ارتفاع دیواره در پنج راهبرد مسیر ابزار با شش مرحله شکل‌دهی

### ۵-۳-۳- بررسی تأثیر کیفیت سطح و دقت لبه سوراخ اولیه ایجاد شده

سوراخ اولیه در مرکز قطعه با مته سوراخ‌کاری، ابزار دور بر و در انتها بر روی دستگاه CNC با ابزار داخل تراش انجام شده است. اما باید در نظر داشت که صافی سطح لبه و دقت آن اهمیت دارد. دقت ابعادی سوراخ اولیه بر ارتفاع فلنج و توزیع ضخامت تأثیر می‌گذارد. سه نمونه آزمایش در شرایط یکسان با سرعت پیشروی  $0.5 \text{ mm/rev}$  و سرعت دورانی  $100 \text{ rev/min}$  و در راهبرد مسیر ۳ ابزار با شش مرحله شکل‌دهی انجام گرفت. بعد از سوراخ زدن مرکز قطعه‌کار، با سوهان پلیسه‌ها گرفته شده و سپس با سنباده کیفیت سطح لبه را بهبود

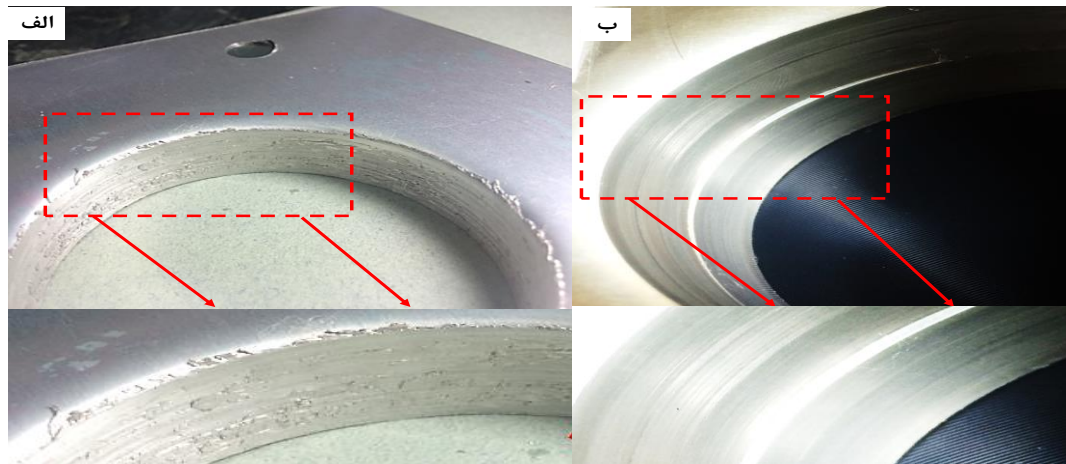
داده تا از خرابی لبه دیواره ایجاد شده جلوگیری کرد (شکل ۴-۳۵-الف). همانطور که در شکل ۵-۳۴-ب و ج مشاهده می‌شود اگر لبه سوراخ اولیه بر روی قطعه دارای پلیسه باشد و از کیفیت سطح مطلوبی برخوردار نباشد باعث خرابی قطعه پس از شکل‌دهی در انتهای لبه ایجاد شده می‌شود.



شکل ۵-۳۴ کیفیت سطح سوراخ اولیه بر روی ورق فلزی - الف کیفیت مناسب و پلیسه گیری لبه سوراخ اولیه ب و کیفیت نامطلوب و وجود پلیسه بر روی لبه سوراخ

#### ۵-۳-۴- تأثیر روانکار بر کیفیت سطح ایجاد شده

با استفاده از روغن به‌عنوان روانکار، اصطکاک بین ابزار و سطح ورق و در نتیجه نیروی افقی کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد [۱۸]. همانطور که انتظار می‌رود روانکار از اصطکاک موجود بین ابزار و ورق می‌کاهد و موجب بهبود کیفیت سطح و کاهش زبری سطح می‌شود. در ابتدا آزمایشات با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترهای فرایند، با استفاده از روانکار و بدون استفاده از آن انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که در حالت خشک سطح قطعه خشن شده و شکل‌پذیری ورق کاهش می‌یابد در نتیجه از ادامه آزمایشات در حالت خشک صرف نظر شد. شکل ۵-۳۵-الف نشان می‌دهد که ابزار در حین انجام عملیات شکل‌دهی با اصطکاک بالا تماس پیدا کرده و حرارت بالا رفته که خرابی سطوح تماس ابزار با سطح ورق شده است. اما در شکل ۴-۳۶-ب از روغن ۱۰۰۰ شرکت بهران به‌عنوان روانکار استفاده شده که در نتیجه کیفیت مناسب سطح و عدم وجود پلیسه در سطح شکل‌دهی شده مشاهده می‌شود.

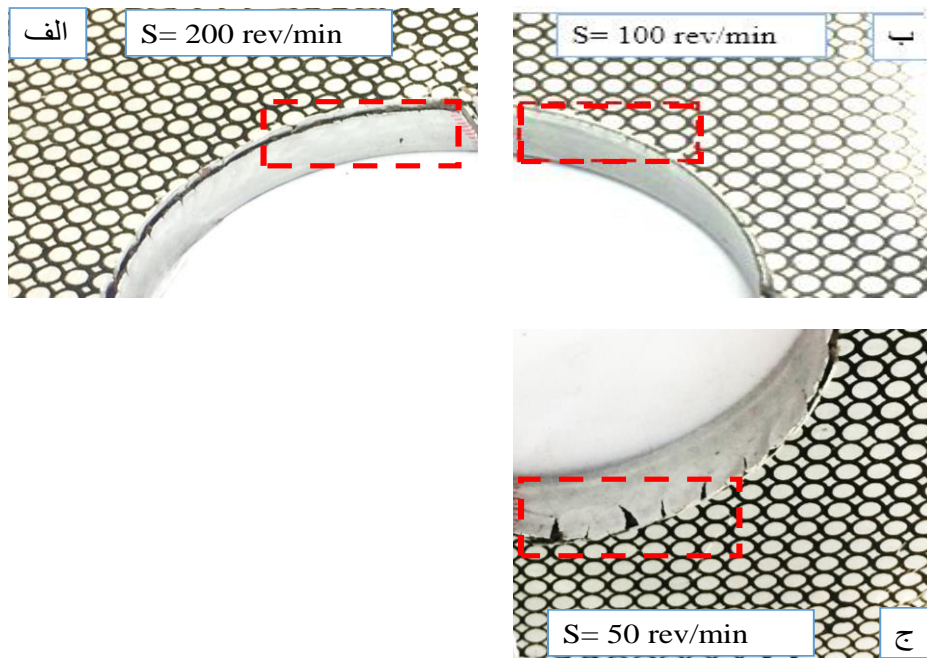


شکل ۵-۳۵ بررسی تأثیر روانکار بر کیفیت سطح شکل‌دهی شده الف- بدون استفاده از روانکار ب- استفاده از روانکار

#### ۵-۳-۵- تأثیر سرعت شکل‌دهی بر خرابی لبه ورق‌های FML و ارتفاع دیواره ورق‌های فلزی

در ورق‌های FML بحث جدایش لایه‌ها اهمیت زیادی دارد. سرعت شکل‌دهی بر خرابی لبه دیواره ایجاد شده و جدایش لایه‌ها تأثیر می‌گذارد. این سه آزمون بر روی ورق‌های FML با سرعت پیشروی ثابت  $0.5 \text{ mm/rev}$  و با تعداد ثابت شش مرحله شکل‌دهی و در راهبرد مسیر ۵ ابزار انجام شده است. شکل ۴-۳۷-الف سرعت شکل‌دهی  $200 \text{ rev/min}$  می‌باشد که در این سرعت به علت اصطکاک زیاد و وجود حرارت جدایش<sup>۱</sup> را در انتهای لبه مشاهده می‌شود. شکل ۴-۳۷-ب فرآیند شکل‌دهی با سرعت  $100 \text{ rev/min}$  را نشان می‌دهد که قطعه سالم و بدون عیب شکل‌دهی شد و این سرعت به‌عنوان سرعت بهینه در نظر گرفته شد. همچنین در شکل ۴-۳۷-ج ورق با سرعت  $50 \text{ rev/min}$  شکل‌دهی شد و به دلیل سرعت پایین خرابی در لبه‌های ورق مشاهده می‌شود. سرعت‌های پیشروی بالا، تأثیر چندانی بر توزیع ضخامت ندارد [۱۹].

<sup>۱</sup> Delamination



شکل ۵-۳۶ تأثیر سرعت شکل‌دهی بر خرابی لبه ایجاد شده در ورق‌های FML (الف) - شکل‌دهی با سرعت ۲۰۰ rev/min (ب) - شکل‌دهی با سرعت ۱۰۰ rev/min (ج) - شکل‌دهی با سرعت ۵۰ rev/min

همچنین نتایج آزمون شکل‌دهی تدریجی بر روی ورق‌های FML نشان می‌دهد که افزایش سرعت شکل‌دهی بر روی ورق‌های فلزی باعث افزایش کرنش‌های ضخامتی می‌شود که در نتیجه ارتفاع دیواره ورق افزایش می‌یابد [۱۸].

### ۵-۳-۶- بررسی تأثیر جهت دوران بر ارتفاع دیواره ایجاد شده

در آزمایش تجربی بر روی دستگاه CNC جهت دوران اسپیندل را با کد M03 و M04 به ترتیب در جهت ساعت‌گرد (CW) و پادساعت‌گرد (CCW) می‌توان تغییر داد. فرآیند شکل‌دهی تدریجی برای ایجاد لبه بر روی چهار نمونه که دو نمونه با جهت دوران مختلف و دو نمونه با جهت دوران ثابت صورت گرفت. آزمایش قطعاتی که با جهت دوران مختلف صورت گرفت نشان دادند که کرنش‌های ضخامتی کمتری اعمال شده است. در جدول ۵-۳ تأثیر جهت دوران بر کرنش‌ها و ارتفاع دیواره مشاهده می‌شود.

جدول ۳-۵ تاثیر جهت دوران قالب بر ارتفاع دیواره

جهت دوران	سرعت پیشروی (mm/rev)	سرعت دورانی (rev/min)	ارتفاع دیواره (mm)	قطر سوراخ اولیه (mm)	تعداد مراحل	راهبرد مسیر ابزار
M03	۰/۵	۱۰۰	۱۸/۶	۳۵	۵	راهبرد مسیر ۳ ابزار
M03, M04	۰/۵	۱۰۰	۱۸/۴۳	۳۵	۵	راهبرد مسیر ۳ ابزار
M03	۰/۵	۱۰۰	۱۶/۶۲	۳۵	۶	راهبرد مسیر ۵ ابزار
M03, M04	۰/۵	۱۰۰	۱۶/۴۶	۳۵	۶	راهبرد مسیر ۵ ابزار

### ۳-۵-۷- بررسی قطر سوراخ اولیه بر ارتفاع ایجاد شده و خرابی لبه دیواره

قطر سوراخ اولیه بر ارتفاع دیواره و توزیع ضخامت تأثیر می‌گذارد. شکل ۳۷-۵ الف- شکل دهی ورق با شرایط یکسان در راهبرد ۵ مسیر ابزار و در سرعت متغیر شکل‌دهی با قطر سوراخ اولیه ۳۰ mm انجام شده است و در دیواره خرابی مشاهده نمی‌شود. اما در شکل ۳۷-۵ ب- شکل دهی با قطر سوراخ اولیه ۲۶ mm انجام شده و خرابی در لبه‌های دیواره مشاهده می‌شود.



شکل ۳۷-۵ بررسی قطر سوراخ اولیه بر ارتفاع دیواره در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای الف- قطر سوراخ اولیه ۳۰ mm ب- قطر سوراخ اولیه ۲۶ mm

جدول ۴-۵ تاثیر راهبردهای مسیر مختلف ابزار با تعداد مراحل شکل‌دهی متفاوت بر ارتفاع دیواره را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۵ راهبردهای مسیر مختلف ابزار و تاثیر تعداد مراحل شکل‌دهی بر ارتفاع دیواره

وضعیت قطعه	سرعت پیشروی (mm/rev)	سرعت دورانی (rev/min)	ارتفاع دیواره (mm)	قطر سوراخ اولیه (mm)	تعداد مراحل شکل‌دهی	راهبرد مسیر ابزار
سالم	۰/۵	۱۰۰	۱۵/۸	۳۵	۳	راهبرد مسیر ۱ ابزار
سالم	۰/۵	۵۰	۱۵/۵	۳۵	۳	راهبرد مسیر ۱ ابزار
سالم	۰/۵	۱۰۰	۱۴	۳۵	۶	راهبرد مسیر ۱ ابزار
سالم	۰/۵	۱۰۰	۱۶/۸	۳۵	۳	راهبرد مسیر ۲ ابزار
سالم	۰/۵	۱۰۰	۱۶/۵	۳۵	۶	راهبرد مسیر ۲ ابزار
خرابی در لبه‌ها	۰/۵	۱۰۰	۱۸/۲	۳۰	۳	راهبرد مسیر ۳ ابزار
سالم	۰/۵	۱۰۰	۱۵/۴	۳۵	۳	راهبرد مسیر ۳ ابزار
سالم	۰/۵	۱۰۰	۱۶/۲	۳۵	۶	راهبرد مسیر ۴ ابزار
خرابی در لبه‌ها	۰/۱	۵۰	۱۷/۵	۳۵	۶	راهبرد مسیر ۴ ابزار
سالم	۰/۵	۱۰۰	۱۸/۳	۳۵	۳	راهبرد مسیر ۵ ابزار
سالم	۰/۵	۱۰۰	۱۶	۳۵	۶	راهبرد مسیر ۵ ابزار
سالم	۰/۵	۲۰۰	۲۰/۷	۳۰	۶	راهبرد مسیر ۵ ابزار
سالم	۰/۵	۱۰۰	۱۶/۸۵	۳۰	۶	راهبرد مسیر ۵ ابزار





## فصل ۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

### ۶-۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی بر آن بود لبه‌ای بر روی ورق فلزی از جنس آلیاژهای آلومینیوم AA3105 با روش شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای و با مسیر مناسبی برای توزیع ضخامت یکنواخت‌تر و ارتفاع دیواره مناسب انجام شود. نتیجه راهبردهای پیشنهادی ۴ و ۵ در سرعت‌های ثابت نسبت به راهبردهای مشابه که حرکت بر روی مسیر مخروطی شکل بود توزیع ضخامت یکنواخت‌تری را ایجاد نمودند. راهبرد مسیر ۵ هم در سرعت ثابت و هم در سرعت‌های شکل‌دهی متغیر ابزار، توزیع ضخامت مناسب‌تری نسبت به دیگر راهبردهای مسیر ابزار نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از این راهبرد می‌توان به ارتفاع دیواره بیشتری رسید. با افزایش قطر ابزار شکل‌دهی توزیع ضخامت بهبود می‌یابد و کرنش‌های ضخامتی کمتری بر روی ورق ایجاد می‌شود. افزایش سرعت دورانی بر روی ورق‌های فلزی باعث افزایش کرنش‌های ضخامتی شده و ارتفاع در دیواره ورق افزایش می‌یابد. جهت چرخش دوران به صورت تک‌جهته و دو‌جهته (ساعتگرد و پادساعتگرد) بر روی ارتفاع دیواره تاثیر می‌گذارد. وجود پلیسه در سوراخ اولیه باعث خرابی در لبه دیواره ایجاد شده می‌شود.

با افزایش تعداد مراحل شکل‌دهی کمترین ضخامت در دیواره ورق کاهش یافته است و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر می‌شود اما باید در نظر داشت از لحاظ صرف زمان و هزینه، نسبت به تعداد مراحل شکل‌دهی بالا

محدودیت وجود دارد. از طرفی با کاهش مراحل شکل‌دهی ارتفاع در دیواره ورق افزایش می‌یابد. بنابراین مسیر مناسب شکل‌دهی با بررسی دیگر پارامترهای مهم از قبیل گام عمودی، سرعت دورانی، میزان اصطکاک بین ابزار و ورق و قطر ابزار صلب سر کروی انتخاب می‌شود. همچنین در انتخاب مسیر ابزار باید مقدار کرنش‌های ضخامتی در ورق را در نظر گرفت و اگر هدف تولید قطعه با ارتفاع دیواره بیشتر است از راهبردهایی که ورق را بیشتر تحت کرنش قرار می‌دهند استفاده نمود.

## ۶-۲- پیشنهادها

شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی توجه پژوهشگران را روز به روز به دلیل اهمیت در صنعت ساخت افزایش داده است. در این پایان‌نامه ایجاد لبه در ورق آلومینیوم AA3105 با ضخامت  $1/2$  mm و ورق‌های FML هم به صورت تجربی و هم به صورت عددی بررسی شد و به منظور ادامه پژوهش در این زمینه پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود.

۱- پیشنهاد می‌شود که مسیر ابزار به صورت پیوسته و ناپوسته بر روی ورق‌های فلزی بررسی شود و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه گردد.

۲- ساخت ورق‌های FML با ضخامت‌های مختلف و تأثیر آن بر روی توزیع ضخامت، ارتفاع فلنج و جدایش لایه‌ها مورد تحقیق قرار گیرد.

۳- برگشت فنری در راهبردهای مختلف و اهمیت مسیر ابزار بر دقت ابعادی و هندسی قطعات تولید شده بررسی شده است.

۴- شبیه‌سازی خرابی و شکست در دیواره ورق‌های شکل‌دهی شده با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی

۵- بررسی تجربی و عددی شکل‌دهی تدریجی برای لبه‌دار کردن ورق‌های فلزی در دماهای بالا با آلیاژهایی با استحکام بالا که موجب شکل‌پذیری بهتر و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر می‌شود.

## منبع‌ها

- [1] علیرضا صابری؛ سید محسن صفوی؛ محمود کدخدایی؛ فرهاد ربیعی. "تحلیل فرآیند فرم‌دهی تدریجی دونقطه‌ای با استفاده از روش قاچی به همراه آزمایش‌های تجربی". مهندسی مکانیک مدرس، ۱۳، ۱، ۱۳۹۱، ۶۹-۶۱.
- [2] Jeswiet, Jack, Joost R. Dufloy, and Alexander Szekeres. Forces in single point and two point incremental forming. Vol. 6. Trans Tech Publications, 2005.
- [3] Suresh, Kurra, Arman Khan, and Srinivasa Prakash Regalla. "Tool path definition for numerical simulation of single point incremental forming." *Procedia Engineering* 64 (2013): 536-545.
- [4] Cui, Z., and L. Gao. "Studies on hole-flanging process using multistage incremental forming." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2.2 (2010): 124-128.
- [5] Gresham, Joel, et al. "Drawing behaviour of metal-composite sandwich structures." *Composite Structures* 75.1 (2006): 305-312.
- [6] J. Dufloy, Y. Tunçkol, A. Szekeres, P. Vanherck, and Y. Tunckol, "Experimental study on force measurements for single point incremental forming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 189, no. 1, pp. 65-72, Jul. 2007.
- [7] Bramley, Alan N., F. Vollersten, and M. Kleiner. "Incremental sheet forming process for small batch and prototype parts." (2001): 95-102.
- [8] Emmens, W. C., G. Sebastiani, and Antonius H. van den Boogaard. "The technology of incremental sheet forming—a brief review of the history." *Journal of Materials Processing Technology* 210.8 (2010): 981-997.
- [9] Petek, Aleš, and Karl Kuzman. "Backward hole-flanging technology using an incremental approach." *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering* 58.2 (2012): 73-80.
- [10] Fratini, L., et al. "Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 53.1 (2004): 207-210.
- [11] Matsubara, Shigeo. "Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool—a study of a numerical control forming system II." *Journal-Japan Society for Technology of Plasticity* 35 (1994): 1311-1311.
- [12] E. Leszak, Apparatus and process for incremental dieless forming, Google Patents, 1967.
- [13] Shim, Myoung-Sup, and Jong-Jin Park. "The formability of aluminum sheet in incremental forming." *Journal of Materials Processing Technology* 113.1 (2001): 654-658.
- [14] Bambach, Markus, Holger Voswinckel, and Gerhard Hirt. "A new process design for performing hole-flanging operations by incremental sheet forming." *Procedia Engineering* 81 (2014): 2305-2310.
- [15] Tan, F. X., M. Z. Li, and Z. Y. Cai. "Research on the process of multi-point forming for the customized titanium alloy cranial prosthesis." *Journal of materials processing technology* 187 (2007): 453-457.
- [16] Fan, Guoqiang, et al. "Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 49.9 (2010): 941-947.

- [17] Fiorotto, M., M. Sorgente, and G. Lucchetta. "Preliminary studies on single point incremental forming for composite materials." *International Journal of Material Forming* 3 (2010): 951-954.
- [18] Mirnia, Mohammad Javad, and B. Mollaei Dariani. "An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet." *Journal of Modares Mechanic Engineering* 14.14 (2014): 262-270..
- [19] Ghasemi, Hossein, and Behzad Soltani. "Experimental investigation on the effective parameters on forming force, dimensional accuracy and thickness distribution in single point incremental forming." (2015): 89-96.
- [20] M.Vahdati, M.Sedighi, H. Khoshkish " Experimental and simulation investigation on ISMF process for studying of spring-back phenomenon", " 4 th National Conference of Metals and Materials Forming MATFORM' 87 Sharif University of Technology3 – 4 Dec. (2008).
- [21] Shojaeifard, Mohammad Hasan, Rooholla talrbitooti Shahabodin and shahbazi "Experimental Investigation of Tool Radius Effect on Incremental Forming of Vehicle Body Sheets"5th National Conference of Metals and Materials Forming MATFORM'90 Sharif University of Technology, (2011).
- [22] Carrino, L., G. Giuliano, and M. Strano. "The effect of the punch radius in dieless incremental forming." *Proceedings of the 2nd IPROMS Virtual International Conference*, (2011).
- [23] باوقاریان, شبیر؛ مهران کدخدایان و محمد بخشی جویباری، بررسی تغییرات ضخامت دیواره مخروط با شیب متغیر در فرآیند شکل دهی تدریجی یک نقطه به صورت دو مسیره، نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک، بیرجند، انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه بیرجند، (۱۳۹۰).
- [24] LI, Jun-chao, L. I. Chong, and Tong-gui Zhou. "Thickness distribution and mechanical property of sheet metal incremental forming based on numerical simulation." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 22 (2012): s54-s60.
- [25] N. H. Mohhamadi, A. A. Atai, M. Sharififar, Numerical and experimental investigation of incremental sheet metal forming parameters and multiobjective optimization using neural genetic algorithm, 2014.
- [26] Lu, B., et al. "Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 85 (2014): 14-29.
- [27] Centeno, G., et al. "Hole-flanging by incremental sheet forming." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 59 (2012): 46-54.
- [28] Cao, Tingting, et al. "Investigation on a new hole-flanging approach by incremental sheet forming through a featured tool." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 110 (2016): 1-17
- [29] Hussain, G., et al. "Finite element and experimental analyses of cylindrical hole flanging in incremental forming." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 26.9 (2016): 2419-2425.
- [30] Hamilton, K., and J. Jeswiet. "Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 59.1 (2010): 311-314.
- [31] Azaouzi, Mohamed, and Nadhir Lebaal. "Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method." *Simulation Modelling Practice and Theory* 24 (2012): 49-58.b
- [32] Ghasemi, A. R., and M. M. Mohammadi. "Residual stress measurement of fiber metal laminates using incremental hole-drilling technique in consideration of the integral method." *International Journal of Mechanical Sciences* 114 (2016): 246-256.

- 
- [33] “Abaqus 6.13 Documentation\ Abaqus User Subroutines Reference Guide \ User Subroutines/ Abaqus/Explicit subroutines/ VDISP.”
- [34] Banat, D., and R. J. Mania. "Comparison of failure criteria application for FML column buckling strength analysis." *Composite Structures* 140 (2016): 806-815.
- [35] Wen, Tong, et al. "Bi-directional dieless incremental flanging of sheet metals using a bar tool with tapered shoulders." *Journal of Materials Processing Technology* 229 (2016): 795-803.
- [36] Jackson, K., and Allwood, J., "The Mechanics of Incremental Sheet Forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 1158–1174, (2009).

## Abstract

Single point incremental (SPIF) forming is considered as a new method for rapid fabrication of sheet parts metal parts, requiring no tooling nor expensive facilities. Due to lower cost and higher speed, this technique is used for fabrication of complex sheet parts prototypes. One of the important issues associated with SPIF is controlling the thinning of sheet metal. Using finite element (FE) simulations and experimental method, this dissertation investigates the effect of five different tool path strategies on the wall thickness and height in incremental hole flanging of sheets of aluminum alloys AA1060 and AA3105. Thickness distribution and flange height obtained from FE analysis using tool path strategies including cylindrical helix and conical helices with constant and variable base diameters, at constant forming speed, show acceptable correlation with the corresponding experimental results reported in the literature. Next, two novel tool path strategies which are based on exponential helix, were used in the analyses and experiments. The results show that employing these two new strategies, the formability of the sheet can be increased, namely, at constant forming speed, the thickness distribution improves by 25%. Further, assessment of the FE simulation and experiment results obtained for constant and variable forming speeds, reveal that a constant forming speed results in a more uniform thickness distribution. In addition, study on the effect of tool diameter in incremental hole flanging, shows that with increasing the tool diameter more uniform thickness distribution is achieved.

**Keywords:** Incremental forming, Sheet metal hole-flanging, Finite element method, Tool path strategy, Sheet metal thinning.



**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering**  
**M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering**

**Numerical and experimental study on sheet metal hole-flanging using  
incremental forming technique**

**By: Reza saeednezhad**

**Supervisor:**  
**Dr. Seyed Hadi Ghaderi**

**September 2017**