

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و  
نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه  
متعلق به دانشگاه رازی است.



دانشگاه رازی

دانشکده فنی مهندسی  
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش  
طراحی کاربردی

عنوان :

تحلیل کرانه بالایی فرآیند کشش ورق با قالب گوه‌ای شکل

استاد راهنما:

دکتر حشمت‌اله حقیقت

نگارش:

سید هومن کاظمی

دی ۱۳۹۳

تقدیر و سپاس

باسپاس از سه وجود مقدس

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...

مویشان سپید شد تا ما رو سفید شویم...

و عاشقانه سوختند تا که ما بخش وجود ما و روسنگر را همان باشند...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان.

لازم است از استاد عزیزم جناب آقای دکتر حشمت‌اله حقیقت که با حسن خلق و فروتنی، زحمات راهبرانه این پایان نامه را بر عهده داشتند، تشکر و قدردانی نمایم.

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم...

که در سختی ها و دشواری های زندگی، همواره یاور و دلسوز و خداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند.

## چکیده

امروزه مواد تک‌لایه نمی‌توانند تمام خصوصیات مورد نیاز صنعت‌گران را برآورد نمایند، بنابراین استفاده از مواد با ساختارهای مرکب و چندلایه توسعه یافته‌است. کاربرد و استفاده از ورق‌های فلزی چندلایه به دلیل ایجاد خواص ترکیبی در لایه‌ها، مانند ایجاد خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی متفاوت و مطلوب، دستیابی به ساختارهای کم وزن و سبک، مقاومت در برابر خوردگی و جذب ارتعاشی در صنایع مختلف از جمله صنعت نفت، پتروشیمی، صنایع هوافضا و دفاعی، صنایع الکتریکی، صنایع خانگی و نیز دیگر حوزه‌های صنعت بسیار فراوان است. در این پایان‌نامه، فرآیند کشش ورق ساندویچی متقارن در قالب گوه‌ای شکل، که روشی کم هزینه و ساده به لحاظ تجهیزات مورد نیاز برای تولید ورق‌های چندلایه است، بررسی شد. به دلیل حالت تنش فشاری در فرآیند کشش در حین عبور ورق‌ها از درون قالب، جوش سرد و باندهای متالورژیکی بین لایه‌ها ایجاد می‌شود، به همین دلیل می‌توان از این روش برای تولید محصولات چندلایه استفاده کرد.

اساس تحلیل فرآیند کشش، تعیین ناحیه‌های تغییر شکل و میدان سرعت در هر ناحیه است. تعیین مرزهای ناحیه‌های تغییر شکل مناسب، باعث می‌شود که نتایج حل و نیز میدان سرعتی که به واسطه آن یافت می‌شود، به حل واقعی نزدیک‌تر شود. با مطالعه پژوهش‌های گذشته، نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود و آزمایش‌هایی که در فرآیندهای کشش از درون قالب گوه‌ای شکل انجام گرفته‌است، مشخص شده‌است که در ناحیه تغییر شکل، خطوط جریان فلز مستقیم نمی‌باشد ولی تاکنون در هیچ‌یک از مطالعات، این مورد در تحلیل مدل نشده‌است. در این پایان‌نامه با در نظر گرفتن مرز نمایی برای ناحیه تغییر شکل، برای اولین بار با ارائه میدان سرعت جدیدی با داشتن مولفه زاویه‌ای علاوه بر مولفه شعاعی در قالب گوه‌ای شکل (قالب خطی)، این نقیصه برطرف شده و خمیدگی خطوط جریان ناحیه تغییر شکل مدل شده‌است. این میدان سرعت برای تحلیل فرآیند کشش ورق‌های ساندویچی متقارن استفاده شده‌است. با استفاده از این میدان سرعت و حل آن برای جابجایی، خط مشترک بین دو لایه، خطوط جریان ماده در ناحیه تغییر شکل و ضخامت نهایی لایه‌ها در خروج از قالب بدست آورده شدند.

در این پایان‌نامه فرآیند کشش ورق ساندویچی متقارن به روش کرانه بالایی تحلیل و به روش اجزا محدود (نرم‌افزار ABAQUS) شبیه‌سازی شده‌است. ورق به شش ناحیه کوچک‌تر تقسیم شده و با استفاده از میدان سرعت هر ناحیه، مقادیر نرخ‌های کرنش محاسبه شده‌اند. سپس توان داخلی، توان برشی ناپیوستگی سرعت و توان اصطکاکی برای ورق به دست آمده و در انتها مقدار بهینه زاویه قالب، شکل مرز ناحیه تغییر شکل و نیروی کشش محاسبه شده‌اند. نتایج حل تحلیلی با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های سایر محققان و شبیه‌سازی مقایسه گردید و مشخص شد نتایج حل حاضر مطابقت مناسبی با نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌ها دارد. در پایان نیز تاثیر پارامترهای مختلف روی مقدار نیروی مورد نیاز فرآیند و زاویه بهینه بررسی شدند.

**کلمات کلیدی:** فرآیند کشش، روش کرانه بالایی، ورق چندلایه، ورق ساندویچی، شبیه‌سازی اجزا محدود.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: مقدمه

۲	۱-۱- مقدمه.....
۲	۲-۱- فرآیندهای ساخت و تولید قطعات.....
۳	۳-۱- فرآیندهای شکل دهی.....
۵	۴-۱- فرآیند کشش.....
۶	۱-۴-۱- انواع فرآیند کشش.....
۷	۱-۴-۱-۱- فرآیند کشش ورق.....
۷	۱-۴-۱-۲- فرآیند کشش سیم، میله و لوله.....
۹	۵-۱- ورق‌های چندلایه.....
۱۰	۱-۵-۱- روش‌های تولید ورق‌های چندلایه.....
۱۰	۱-۵-۱-۱- روش‌های روکش کاری و جوشکاری.....
۱۱	۱-۵-۱-۲- کشش، اکستروژن، کشش عمیق و نورد سرد یا گرم.....
۱۲	۱-۵-۱-۳- استفاده از چسب‌های صنعتی.....
۱۲	۱-۵-۱-۴- ریخته‌گری پیوسته.....
۱۳	۱-۵-۲- کاربردهای ورق‌های چندلایه.....
۱۴	۶-۱- تاریخچه.....
۲۱	۷-۱- اهداف پایان‌نامه.....

### فصل دوم: روش‌های تحلیل فرآیندهای شکل دهی و کشش فلزات

۲۴	۱-۲- مقدمه.....
۲۴	۲-۲- روش‌های برآورد نیرو در فرآیندهای شکل دهی.....
۲۴	۱-۲-۲- روش کار ایده‌آل.....
۲۵	۲-۲-۲- روش قاچی.....
۲۶	۳-۲-۲- روش میدان خط لغزش.....
۲۷	۴-۲-۲- روش‌های حدی.....
۲۸	۱-۴-۲-۲- معادلات دیفرانسل تعادل.....
۲۹	۲-۴-۲-۲- قانون حجم ثابت و سازگاری.....
۳۰	۳-۴-۲-۲- معیار تسلیم و تنش شارش وون- میزز.....
۳۱	۵-۲-۲- روش کرانه بالایی.....
۳۳	۱-۵-۲-۲- توان داخلی تغییر شکل.....
۳۴	۲-۵-۲-۲- توان برشی ناپیوستگی.....

۳۶	..... ۲-۲-۵-۳- توان برشی اصطکاکی
۳۶	..... ۲-۲-۶- روش اجزا محدود و شبیه‌سازی
۳۷	..... ۲-۳- نتیجه‌گیری

### فصل سوم: تحلیل کرانه بالایی فرآیند کشش ورق تک‌لایه و ساندویچی متقارن

۳۹	..... ۳-۱- مقدمه
۳۹	..... ۳-۲- تحلیل کرانه بالایی فرآیند کشش ورق تک‌لایه
۴۲	..... ۳-۲-۱- میدان سرعت مجاز در هر ناحیه
۴۲	..... ۳-۲-۱-۱- میدان سرعت در ناحیه ورودی
۴۳	..... ۳-۲-۱-۲- میدان سرعت در ناحیه خروجی
۴۳	..... ۳-۲-۱-۳- میدان سرعت و مسیر حرکت ذرات در ناحیه تغییر شکل
۴۷	..... ۳-۲-۲- نرخ کرنش در هر ناحیه
۴۷	..... ۳-۲-۲-۱- نرخ کرنش در ناحیه اول
۴۷	..... ۳-۲-۲-۲- نرخ کرنش در ناحیه سوم
۴۷	..... ۳-۲-۲-۳- نرخ کرنش در ناحیه تغییر شکل
۴۷	..... ۳-۲-۳- محاسبه توان کل فرآیند ورق تک‌لایه
۴۸	..... ۳-۲-۳-۱- توان داخلی
۴۹	..... ۳-۲-۳-۲- توان برشی
۵۱	..... ۳-۲-۳-۳- توان اصطکاکی
۵۲	..... ۳-۲-۴- محاسبه نیروی فرآیند ورق تک‌لایه
۵۳	..... ۳-۳- تحلیل کرانه بالایی فرآیند کشش ورق ساندویچی متقارن
۵۴	..... ۳-۳-۱- میدان سرعت مجاز در هر ناحیه
۵۴	..... ۳-۳-۲- نرخ کرنش در هر ناحیه
۵۴	..... ۳-۳-۳- مرز مشترک لایه‌ها
۵۵	..... ۳-۳-۴- محاسبه توان کل
۵۵	..... ۳-۳-۴-۱- توان داخلی
۵۶	..... ۳-۳-۴-۲- توان برشی
۵۷	..... ۳-۳-۴-۳- توان اصطکاکی
۵۷	..... ۳-۳-۵- محاسبه نیروی فرآیند ورق ساندویچی متقارن
۵۷	..... ۳-۴- تشریح برنامه حل تحلیلی

### فصل چهارم: شبیه‌سازی فرآیند کشش ورق تک‌لایه و ساندویچی متقارن

۶۱	..... ۴-۱- مقدمه
۶۱	..... ۴-۲- معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی آباکوس



۶۲	.....۳-۴- شبیه‌سازی کشش ورق ساندویچی متقارن با قالب گوه‌ای شکل
۶۲	.....۱-۳-۴- مدل‌سازی قطعات
۶۲	.....۱-۱-۳-۴- مدل‌سازی قالب
۶۳	.....۲-۱-۳-۴- مدل‌سازی ورق‌های تغییر شکل پذیر
۶۴	.....۲-۳-۴- تعیین خواص مواد و مقطع
۶۶	.....۳-۳-۴- ترکیب قطعات
۶۷	.....۴-۳-۴- تعیین حل‌گر و نوع خروجی‌های مورد نیاز
۶۷	.....۱-۴-۳-۴- تعیین نوع حل‌گر
۶۸	.....۲-۴-۳-۴- تعیین خروجی برنامه
۶۹	.....۳-۴-۳-۴- مش‌بندی انطباقی
۷۰	.....۵-۳-۴- برهم‌کنش بین قطعات
۷۲	.....۶-۳-۴- تعیین بارگذاری و شرایط مرزی
۷۳	.....۷-۳-۴- مش‌بندی
۷۵	.....۸-۳-۴- پردازش و اجرای مسئله
۷۶	.....۹-۳-۴- مشاهده نتایج

#### فصل پنجم: نتایج و بحث

۷۸	.....۱-۵- مقدمه
۷۸	.....۲-۵- نتایج و مقایسه حل تحلیلی و شبیه‌سازی کشش ورق تک‌لایه
۸۷	.....۳-۵- نتایج و مقایسه حل تحلیلی و شبیه‌سازی کشش ورق ساندویچی متقارن
۹۶	.....۴-۵- بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر نیروی کشش ورق ساندویچی متقارن

#### فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهاد

۹۹	.....۱-۶- مقدمه
۹۹	.....۲-۶- نتیجه‌گیری
۱۰۱	.....۳-۶- پیشنهادهایی برای ادامه کار حاضر
۱۰۲	.....مراجع

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان شکل
۳	۱-۱- طبقه‌بندی کلی فرآیندهای ساخت و تولید قطعات فلزی.....
۴	۱-۲- طبقه‌بندی فرآیندهای شکل‌دهی.....
۵	۱-۳- نمونه فرآیندهای کشش.....
۶	۱-۴- فرآیند کشش چند مرحله‌ای سیم.....
۸	۱-۵- فرآیندهای کشش لوله.....
۹	۱-۶- نمونه ورق‌های چند فلزی.....
۱۰	۱-۷- نگاه میکروسکوپی به جوش سرد.....
۱۱	۱-۸- شماتیکی از فرآیند جوش انفجاری.....
۱۲	۱-۹- محصول دو فلزی تولیدی با فرآیند کشش عمیق.....
۱۳	۱-۱۰- نمونه دو فلزی تولیدی از فرآیند ریخته‌گری پیوسته.....
۱۴	۱-۱۱- یاتاقان‌های دو و سه فلزی.....
۱۵	۱-۱۲- دیاگرام تعادل نیروها در فرآیند کشش ورق ساندویچی.....
۱۵	۱-۱۳- میدان جریان شعاعی تعمیم‌یافته مدل شده توسط اوزاکادا و نیمی.....
۱۶	۱-۱۴- کشش و اکستروژن ورق چند لایه مدل شده توسط دوربان.....
۱۶	۱-۱۵- ناحیه تغییر شکل و میدان سرعت مجاز در تحلیل پنگ.....
۱۷	۱-۱۶- الگوی خطوط جریان در آزمایش ماده دو فلزی آلومینیوم-سرب توسط توکنو.....
۱۷	۱-۱۷- آزمایش کشش ورق سه‌لایه آلومینیوم-مس-آلومینیوم توسط طاهری و مجلسی.....
۱۸	۱-۱۸- میدان سرعت و میدان تغییر شکل فرض شده برای کشش ورق سه‌لایه توسط طاهری.....
۱۸	۱-۱۹- شماتیک تقسیم ناحیه تغییر شکل به بلوک‌های صلب توسط روبیو.....
۱۹	۱-۲۰- میدان سرعت و میدان تغییر شکل فرض شده برای کشش ورق دولایه توسط ملکی و همکاران.....
۱۹	۱-۲۱- شماتیک و هندسه فرآیند اکستروژن ورق دو فلزی مدل شده توسط حقیقت و امجدیان.....
۲۰	۱-۲۲- شماتیک و هندسه فرآیند اکستروژن ورق دو فلزی مدل شده توسط حقیقت و شایسته.....
۲۰	۱-۲۳- شماتیک تقسیم ناحیه تغییر شکل به بلوک‌های صلب چهار وجهی توسط پانتقینی.....
۲۱	۱-۲۴- شماتیک فرآیند نورد دولایه و نمایش خم شدن ورق.....
۲۵	۲-۱- مقایسه تغییر شکل همگن و تغییر شکل اضافی.....
۲۶	۲-۲- شماتیک روش قاچی در فرآیند کشش ورق.....
۲۷	۲-۳- میدان خطوط لغزش ممکن برای فرآیند فروبری کرنش صفحه‌ای.....
۲۸	۲-۴- شماتیک تعادل نیروها در جزء دیفرانسیلی کوچک.....
۳۵	۲-۵- جریان ماده قبل و بعد از خط ناپیوستگی سرعت و نمایش مولفه‌های سرعت.....
۴۰	۳-۱- شماتیک فرآیند کشش ورق فلزی در قالب گوه‌ای، نواحی تقسیم‌بندی و پارامترهای هندسی.....
۴۱	۳-۲- اثر پارامتر $b$ روی مرز ورودی ناحیه تغییر شکل.....

۴۱	.....۳-۳ نمایش حالت بحرانی $b$ .....
۴۶	.....۴-۳ نمایش حرکت غیرخطی خطوط جریان ماده در ناحیه تغییر شکل ( $b > 0$ ).....
۴۹	.....۵-۳ شماتیک مرز ورودی و خروجی برای محاسبه المان سطح.....
۵۰	.....۶-۳ شماتیک مرز ورودی و خروجی و نمایش بردارهای سرعت روی مرزها.....
۵۳	.....۷-۳ فرآیند کشش ورق ساندویچی در قالب گوه‌ای شکل، نواحی تقسیم‌بندی و پارامترهای هندسی.
۵۶	.....۸-۳ شماتیک تقسیم‌بندی نواحی انتگرال‌گیری برای محاسبه توان داخلی.....
۵۹	.....۹-۳ نمودار گردشی برنامه نوشته برای محاسبه نیرو و مقادیر بهینه $b$ و $\alpha$ .....
۶۳	.....۱-۴ نمایش مدل قالب و نقطه مرجع.....
۶۳	.....۲-۴ مدل ورق‌های تغییرشکل‌پذیر.....
۶۴	.....۳-۴ نحوه اعمال رفتار پلاستیک به ورق.....
۶۵	.....۴-۴ تعیین نوع مقطع و فرض کرنش صفحه‌ای.....
۶۶	.....۵-۴ اختصاص دادن مقطع به ورق.....
۶۶	.....۶-۴ ترکیب نهایی قطعات.....
۶۸	.....۷-۴ تعیین نوع حل گر و مدت زمان اجرای فرآیند.....
۶۸	.....۸-۴ تعیین خروجی‌های فرآیند.....
۶۹	.....۹-۴ اعوجاج المان‌ها در فرآیند کشش، بدون استفاده از مش‌بندی تطبیقی.....
۶۹	.....۱۰-۴ تعیین مش‌بندی تطبیقی.....
۷۰	.....۱۱-۴ اعمال تنش برشی اصطکاکی.....
۷۱	.....۱۲-۴ نحوه در نظر گرفتن اصطکاک.....
۷۱	.....۱۳-۴ شماتیک تعیین سطح اصطکاکی لایه خارجی و قالب.....
۷۲	.....۱۴-۴ نحوه اعمال میزان جابجایی ورق.....
۷۳	.....۱۵-۴ شماتیک شرایط مرزی فرآیند.....
۷۳	.....۱۶-۴ اعمال سایز دانه مش‌بندی.....
۷۴	.....۱۷-۴ انتخاب شکل المان و تکنیک مش‌بندی.....
۷۴	.....۱۸-۴ انتخاب نوع تحلیل، مش کرنش صفحه‌ای و درجه المان.....
۷۵	.....۱۹-۴ ورق مدل‌سازی شده قبل از شروع فرآیند.....
۷۵	.....۲۰-۴ اجرای فرآیند شبیه‌سازی و حل مسئله.....
۷۶	.....۲۱-۴ تنش میزز در فرآیند کشش ورق ساندویچی متقارن.....
۸۰	.....۱-۵ رویه‌های نیرو در حالت تک‌لایه بر حسب مقادیر $\alpha$ و $b$ به ازای کاهش ضخامت‌های مختلف.....
۸۱	.....۲-۵ رویه نیرو در حالت تک‌لایه بر حسب مقادیر $\alpha$ و $b$ برای کاهش ضخامت ۲۰٪.....
۸۲	.....۳-۵ خطوط تراز رویه نسبت تنش کششی ورق تک‌لایه بر حسب مقادیر مختلف $\alpha$ و $b$ .....
۸۲	.....۴-۵ منحنی‌های نیرو بر حسب جابجایی ورق تک‌لایه به ازای زوایای مختلف و کاهش ضخامت ۲۰٪.....
۸۴	.....۵-۵ مدل شبیه‌سازی اجزا محدود قبل از تغییر شکل.....

- ۸۴-۵-۶- مقایسه مرزهای ناحیه تغییرشکل حل حاضر، اویترز و شبیه‌سازی اجزا محدود (میدان کرنش)..  
 ۸۵-۵-۷- مقایسه حل کار حاضر، اویترز و آزمایش‌های لانکاستر به ازای کاهش ضخامت ۳۶٪.....  
 ۸۶-۵-۸- مدل ارائه شده توسط روبیو برای ناحیه تغییر شکل.....  
 ۸۶-۵-۹- مقایسه حل حاضر و روبیو در به ازای کاهش ضخامت ۱۵٪ و ثابت اصطکاک برشی ۵/۰.....  
 ۸۸-۵-۱۰- رویه‌های نیرو در حالت ساندویچی بر حسب مقادیر  $\alpha$  و  $b$  به ازای کاهش ضخامت مختلف.....  
 ۹۰-۵-۱۱- مقایسه ضخامت  $t_{1f}$  و  $t_{2f}$  لایه‌ها در حل تحلیلی و شبیه‌سازی.....  
 ۹۱-۵-۱۲- رویه نیرو در حالت ساندویچی متقارن بر حسب مقادیر  $\alpha$  و  $b$  برای کاهش ضخامت ۲۰٪.....  
 ۹۲-۵-۱۳- منحنی‌های نیرو بر حسب جابجایی به ازای زوایای مختلف و کاهش ضخامت ۲۰٪.....  
 ۹۳-۵-۱۴- تنش نرمال در جهت X در شبیه‌سازی ورق ساندویچی متقارن.....  
 ۹۳-۵-۱۵- تنش برشی در صفحه X-Y در شبیه‌سازی ورق ساندویچی متقارن.....  
 ۹۳-۵-۱۶- کرنش پلاستیک موثر در شبیه‌سازی ورق ساندویچی متقارن.....  
 ۹۴-۵-۱۷- جابجایی در جهت X در شبیه‌سازی ورق ساندویچی متقارن.....  
 ۹۵-۵-۱۸- مقایسه تنش کششی به ازای نیم زاویه قالب ۵ درجه، در حل حاضر و آزمایش.....  
 ۹۵-۵-۱۹- مقایسه تنش کششی به ازای نیم زاویه قالب ۱۰ درجه، در حل حاضر و آزمایش.....  
 ۹۶-۵-۲۰- تأثیر درصد کاهش ضخامت بر مقدار بهینه  $b$  به ازای ضریب اصطکاک و زاویه قالب ثابت.....  
 ۹۷-۵-۲۱- تأثیر ضریب اصطکاک بر مقدار بهینه  $b$  به ازای درصد کاهش ضخامت و زاویه قالب ثابت.....

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان جدول
۶۴	۱-۴- مشخصات مکانیکی ورق آلومینیوم و مس.....
۷۹	۱-۵- ورودی‌های حل تحلیلی و عددی فرآیند کشش ورق تک‌لایه.....
۸۰	۲-۵- مقایسه حل کرانه تحلیلی کار حاضر، اویترز و حل اجزا محدود به ازای کاهش ضخامت مختلف.
۸۳	۳-۵- بیشینه نیروی مورد نیاز به ازای زوایای مختلف قالب در شبیه‌سازی ورق تک‌لایه.....
۸۸	۴-۵- ورودی‌های حل تحلیلی و عددی فرآیند کشش ورق ساندویچی متقارن.....
۸۹	۵-۵- مقایسه حل حاضر و اجزا محدود به ازای کاهش ضخامت مختلف در فرآیند ساندویچی متقارن.
۹۰	۶-۵- درصد اختلاف ضخامت نهایی لایه‌ها در حل تحلیلی و عددی به ازای کاهش ضخامت مختلف...
۹۲	۷-۵- بیشینه نیروی مورد نیاز به ازای زوایای مختلف قالب در شبیه‌سازی ورق ساندویچی متقارن.....

## فهرست علامتها

$r, \theta, z$	.....مختصات استوانه‌ای
$t_i$	.....نصف ضخامت اولیه ورق تک‌لایه
$t_f$	.....نصف ضخامت نهایی ورق تک‌لایه
$t_{1i}$	.....ضخامت اولیه لایه خارجی ورق ساندویچی
$t_{2i}$	.....نصف ضخامت اولیه لایه داخلی ورق ساندویچی
$t_{1f}$	.....ضخامت نهایی لایه خارجی ورق ساندویچی
$t_{2f}$	.....نصف ضخامت نهایی لایه داخلی ورق ساندویچی
$dQ$	.....نرخ جریان حجمی
$\rho$	.....موقعیت شعاعی هر نقطه از قالب
$\rho_i, \rho_f$	.....موقعیت شعاعی در مرزهای ناپیوستگی ورودی و خروجی
$r(\theta, \rho)$	.....تابع مرز ناحیه تغییر شکل
$g(\theta, \rho)$	.....تابع دلخواه
$b$	.....پارامتر هندسی تابع مرز ناحیه تغییر شکل
$\bar{\varepsilon}$	.....کرنش موثر
$\dot{\bar{\varepsilon}}$	.....نرخ کرنش موثر
$\varepsilon_{11}$	.....کرنش اصلی در جهت ضخامت ورق
$\dot{U}_r, \dot{U}_\theta, \dot{U}_z$	.....مؤلفه‌های سرعت در مختصات استوانه‌ای
$v_f$	.....سرعت خروجی ورق
$v_i$	.....سرعت ورودی ورق
$\Delta v$	.....مقدار ناپیوستگی سرعت
$\dot{\varepsilon}_{rr}, \dot{\varepsilon}_{\theta\theta}, \dot{\varepsilon}_{zz}$	.....مؤلفه‌های نرخ کرنش قائم
$\dot{\varepsilon}_{r\theta}, \dot{\varepsilon}_{rz}, \dot{\varepsilon}_{\theta z}$	.....مؤلفه‌های نرخ کرنش برشی
$S_1, S_2$	.....سطوح ناپیوستگی سرعت
$S_3$	.....سطح اصطکاکی
$m$	.....ثابت اصطکاک برشی بین لایه خارجی و قالب
$F_d$	.....نیروی کششی شکل‌دهی
$\sigma_d$	.....تنش کششی شکل‌دهی
$J^*$	.....توان مصرفی کل
$\dot{W}_{ii}, \dot{W}_{io}$	.....توان داخلی لایه‌های داخلی و خارجی
$\dot{W}_{S_1}, \dot{W}_{S_2}$	.....توان مصرفی روی سطوح ناپیوستگی سرعت ورودی و خروجی
$\dot{W}_f$	.....توان مصرفی روی سطح اصطکاکی

$\alpha$	..... نیم زاویه قالب
$\beta(\rho)$	..... موقعیت زاویه‌ای نقاط روی مرز مشترک دو لایه، بر حسب موقعیت شعاعی
$\beta_1$	..... زاویه مرز بین دو لایه در مرز ورودی
$\beta_2$	..... زاویه مرز بین دو لایه در مرز خروجی
$R$	..... درصد کاهش ضخامت
$\bar{\sigma}_o$	..... تنش سیلان میانگین ماده برای لایه خارجی
$\bar{\sigma}_i$	..... تنش سیلان میانگین ماده برای لایه داخلی

# فصل اول

مقدمه



## ۱-۱- مقدمه

در این فصل به اشاره کلی به فرآیندهای ساخت و تولید، فرآیندهای شکل‌دهی<sup>۱</sup> و کشش ورق<sup>۲</sup> پرداخته شده و به اهمیت و روش‌های تولید ورق‌های چندلایه<sup>۳</sup> اشاره می‌شود. در ادامه تاریخچه‌ای از فرآیند کشش ورق‌های چندلایه بیان و در انتها، اهداف این پایان‌نامه بررسی خواهد شد.

## ۱-۲- فرآیندهای ساخت و تولید قطعات

بر اساس استاندارد DIN8580، فرآیندهای ساخت و تولید قطعات فلزی به شش دسته کلی تقسیم می‌شود (شکل ۱-۱).

۱. شکل‌دهی اولیه یا ریخته‌گری<sup>۴</sup>: به شکل‌دادن فلزات و آلیاژها از طریق ذوب، ریختن مذاب در محفظه‌ای به نام قالب و آنگاه سرد کردن و انجماد آن، فرآیند ریخته‌گری گفته می‌شود. این روش قدیمی‌ترین فرآیند شناخته شده برای بدست آوردن شکل مطلوب فلزات است.
۲. اتصالات، جوشکاری<sup>۵</sup>: ترکیب قطعات منفرد و اتصال آن‌ها به یکدیگر در این گروه قرار می‌گیرد.
۳. برش ماده، براده‌برداری<sup>۶</sup>: براده‌برداری و شکل‌دهی فلزات در اثر تنش برشی بین سنبه و ماده در این دسته قرار می‌گیرد.
۴. روکش‌دهی، آبکاری<sup>۷</sup>: به پوشش دادن، گالوانیزه کردن<sup>۸</sup> و یا رنگ کردن سطح فلز روکش‌دهی گفته می‌شود.
۵. تغییر خواص مواد یا عملیات حرارتی<sup>۹</sup>: گرم و یا سرد کردن کنترل شده مواد بدون ایجاد تغییر شکل اضافی در آن‌ها جهت رسیدن به خواص مطلوب فیزیکی و مکانیکی، در این گروه قرار می‌گیرد.

---

<sup>1</sup> Forming Processes

<sup>2</sup> Plate Drawing

<sup>3</sup> Multi-Layer

<sup>4</sup> Primary Shaping (Casting)

<sup>5</sup> Joining

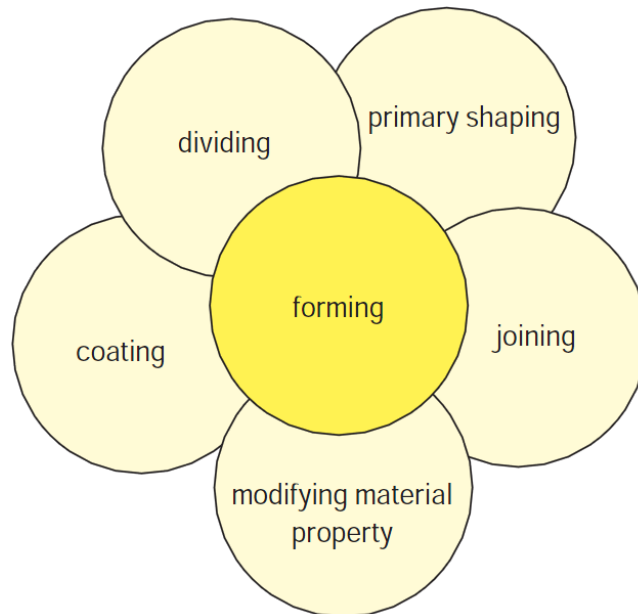
<sup>6</sup> Dividing (Shearing)

<sup>7</sup> Coating

<sup>8</sup> Galvanization

<sup>9</sup> Modifying Material Property (Heat Treatment)

۶. شکل دهی: شکل دهی فلزات شامل فرآیندهایی است که در آن فلز به وسیله ابزار یا قالب شکل داده می شود.



شکل ۱-۱- طبقه بندی کلی فرآیندهای ساخت و تولید قطعات فلزی [۱]

### ۱-۳- فرآیندهای شکل دهی

امروزه شکل دهی فلزات به عنوان یکی از روش های مهم ساخت و تولید قطعات محسوب می شود. بنابراین شناخت هر چه دقیق تر آن، صنعت گران را به سمت تولید قطعات جدید و با کیفیت بالا سوق می دهد. معمولاً شکل دهی فلزات روی اکثر فلزات قابل اجرا بوده و از مشخصات این فرآیندها دقت ابعادی و صافی سطح بالا، یکسان بودن قطعات تولیدی، سرعت بالای تولید و مقرون به صرفه بودن آن در تولید انبوه است. توانایی تغییر شکل مومسان یکی از ارزشمندترین خصوصیات فرآیندهای شکل دهی به شمار می آید. بی شک تولید ورق، تسمه، میل گرد، لوله، مقاطع ساختمانی و به طور کلی شکل دهی فلزات مدیون این قابلیت است. از مشخصه های مهم فرآیندهای شکل دهی، تغییر در کیفیت سطوح و ریزساختار ماده و بهبود خواص مکانیکی بدون هرگونه عملیات براده برداری است.

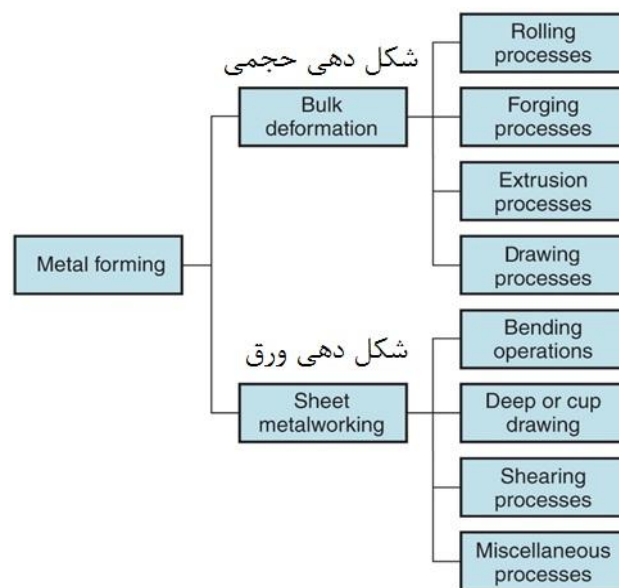
طراحی و کنترل فرآیندهای شکل دهی به جنس ماده، شرایط اصطکاکی بین ماده و قالب، مکانیک تغییر شکل فلز (سیلان ماده<sup>۱</sup>) و تجهیزات مورد نیاز بستگی دارد. به دلیل پیچیدگی های حاکم بر فرآیندهای شکل دهی، انواع روش های تحلیلی، شبیه سازی و آزمایش به منظور طراحی بهینه فرآیند، مورد استفاده قرار می گیرد.

<sup>1</sup> Material Flow

هر فرآیند شکل‌دهی فلزات، شامل تمام متغیرهای ورودی از قبیل جنس قطعه یا شمش اولیه و هندسی آن، ابزار شکل‌دهی، شرایط موجود در فصل مشترک ابزار و ماده، حالت تنش در منطقه تغییر شکل<sup>۱</sup>، نوع و نحوه کاربرد ابزار، خصوصیات محصول نهایی و در نهایت شرایط محیط کارگاه می‌شود.

در فرآیند شکل‌دهی فلزات لازم است ارتباط بین ورودی و خروجی، تاثیر متغیرهای فرآیند بر کیفیت محصول و مسایل اقتصادی آن مورد توجه قرار گیرد. کلید دستیابی به عملیات شکل‌دهی موفق، یعنی کسب محصول سالم با شکل و خواص مطلوب، مستلزم شناخت کافی در مورد سیلان فلز و کنترل آن است. عواملی مانند جهت سیلان فلز، مقدار تغییر شکل، درجه حرارت و سرعت تغییر شکل تاثیر فراوانی بر ریزساختار و خواص محصول دارند.

در شکل (۱-۲) تقسیم‌بندی فرآیندهای شکل‌دهی نمایش داده شده است. در فرآیندهای شکل‌دهی حجمی<sup>۲</sup>، ماده ورودی میلگرد، تسمه برش داده شده یا شمشال<sup>۳</sup> است و به طور کلی نسبت مساحت به حجم کم است. ماده در این فرآیندها به طور قابل توجهی تحت تاثیر تنش‌های فشاری بزرگ قرار دارد. در فرآیندهای شکل‌دهی صفحه‌ای<sup>۴</sup>، تغییرات ضخامت معمولاً قابل چشم‌پوشی است و نسبت مساحت ورق به حجم، بالا می‌باشد. به طور کلی نیروهای کششی در این فرآیندها مدنظر است و نیروهای فشاری ممکن است منجر به چین‌خوردگی و پیچش در ورق شود [۲].



شکل ۱-۲ - طبقه‌بندی فرآیندهای شکل‌دهی

<sup>1</sup> Deformation Zone

<sup>2</sup> Bulk Deformation

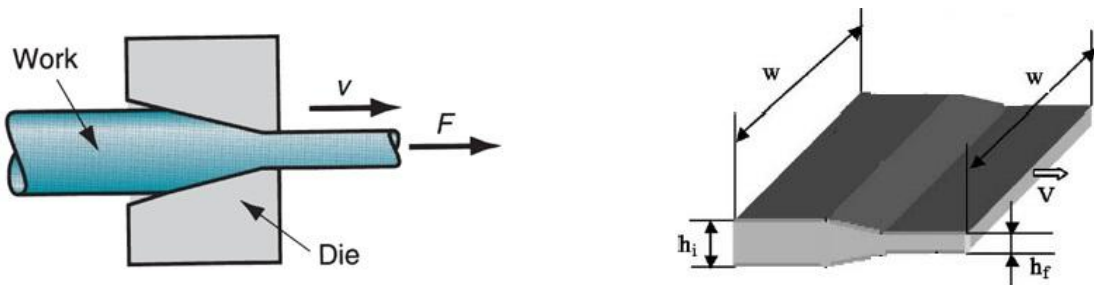
<sup>3</sup> Billet

<sup>4</sup> Sheet Metal Working

## ۱-۴- فرآیند کشش

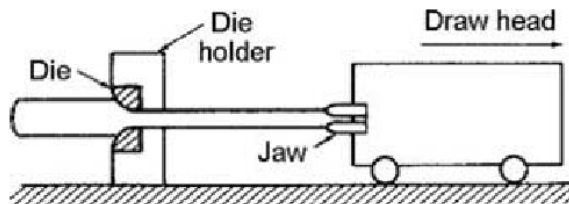
به منظور تغییر ضخامت یا مساحت اولیه ورق، لوله، میله و یا تولید فلزات چندلایه<sup>۱</sup> می توان از روش های اکستروژن<sup>۲</sup>، کشش<sup>۳</sup>، نورد<sup>۳</sup> و ... استفاده کرد. در این میان، روش کشش به علت سادگی، کم هزینه بودن و نیازمند نبودن به تجهیزات پیشرفته، مورد نظر است.

فرآیند کشش بین سالهای ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلادی یعنی زمانی که با کشیدن میله، سیم و یا لوله<sup>۴</sup> از میان قالب، قطر آن ها را کاهش می دادند، گسترش یافت. کشش فرآیندی است که به منظور کاهش سطح مقطع<sup>۵</sup> ورق، سیم یا مفتول و دیگر مقاطع استاندارد، از طریق عبور دادن فلز از میان قالب گوه ای شکل<sup>۶</sup>، مخروطی<sup>۷</sup> و یا منحنی شکل<sup>۸</sup> استفاده می شود (شکل ۱-۳). در این فرآیند ماده در داخل قالب قرار گرفته و سپس با کشیده شدن به داخل قالب و با اعمال نیروهای فشاری از سمت قالب بر آن، ماده شکل می گیرد و ضخامت آن کم می شود. فرآیند کشش به طور کلی در حالت سرد انجام شده و بنابراین، روی فلز کار سرد<sup>۹</sup> انجام می گیرد.



ب- فرآیند کشش سیم یا میله

الف- فرآیند کشش ورق



ج- شماتیک اجزای فرآیند کشش [۳]

شکل ۱-۳- نمونه فرآیندهای کشش

<sup>1</sup> Multi-Layer

<sup>2</sup> Extrusion

<sup>3</sup> Rolling

<sup>4</sup> Rod, Wire and Tube Drawing

<sup>5</sup> Reduction in Area

<sup>6</sup> Wedge-Shaped Die

<sup>7</sup> Conical

<sup>8</sup> Curved Die

<sup>9</sup> Cold Working