



دانشگاه بوعربینا

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک - طراحی کاربردی

عنوان:

مطالعه تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی فرآیند اکستروژن مستقیم کرنش صفحه‌ای

استاد راهنما:

دکتر فرامرز فرشته‌صنعی

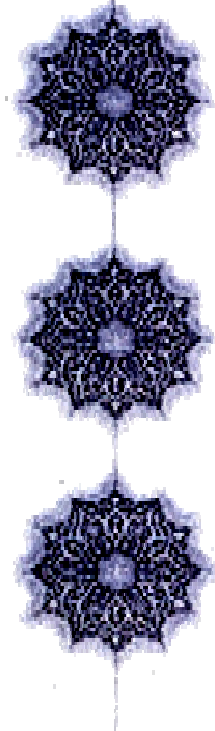
پژوهشگر:

نعمه فخار

پاییزه ۸۸



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تقدیم بہ ہمرائے ہمیشگی ام کہ وجودشان نعمت است و لطفشان منت

تقدیم بہ عزیزانم

پدر

مادر

و خواہرم

و بہ پاس الطاف بی دریغشان

نام خانوادگی: فخار		نام: نعیمه	
عنوان پایان نامه:			
مطالعه تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی فرآیند اکستروژن مستقیم کرنش صفحه‌ای			
استاد راهنما: دکتر فرامرز فرشته صنیعی			
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد		رشته: مهندسی مکانیک	
گرایش: طراحی کاربردی			
دانشگاه: بوعلی سینا همدان		دانشکده: مهندسی	
		تاریخ دفاعیه: ۱۳۸۸/۷/۱۱	
واژه های کلیدی: اکستروژن مستقیم کرنش صفحه ای، بهینه‌سازی، پروفیل قالب، نیروی شکل دهی			
چکیده:			
<p>فرآیند اکستروژن و در کل، تمامی فرآیندهای شکل‌دهی فلز بدین علت که علاوه بر تولید محصولی با شکل دلخواه منجر به افزایش استحکام محصول نیز می‌گردند، توجه همزمان صنعتگران و محققان را به خود جلب نموده‌اند. یکی از مشخصه‌های مهم در فرآیندهای شکل‌دهی از جمله اکستروژن، مقدار نیروی لازم برای انجام فرآیند می‌باشد که با کمینه کردن آن از ظرفیت پرس مورد نیاز کاسته شده و عمر قالب افزایش می‌یابد. در این پایان نامه با سه روش عددی، تجربی و تحلیلی به بررسی پارامترهای مؤثر بر نیروی شکل‌دهی در فرآیند اکستروژن مستقیم کرنش صفحه‌ای پرداخته شده است. روش تعادل نیروها برای حل تحلیلی مسأله و نرم افزار <i>Deform 2D</i> برای مطالعه عددی فرآیند به کار گرفته شده‌اند. پارامترهای مورد بررسی، نوع پروفیل قالب، نسبت اکستروژن و نوع روانکار بوده است. نوع پروفیل قالب، در سه سطح پروفیل نمایی، خطی و چند جمله‌ای مرتبه دو، نسبت اکستروژن در سه سطح <math>ER=2,2.5,3</math> و روانکاری با پودر سنباده، وازلین+تیتانیا و حالت خشک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هدف اصلی این تحقیق طراحی و معرفی پروفیل قالبی است که بتواند کمترین نیرو را برای ایجاد تغییر شکل مصرف کند. برای دستیابی به این هدف، با استفاده از روش تعادل نیروها و با به کار گیری بهینه سازی به روش الگوریتم ژنتیک، پروفیل‌های نمایی و مرتبه دوم در سه نسبت اکستروژن مختلف بهینه‌سازی شده‌اند. از روش طراحی آزمایش‌ها برای تحلیل نتایج به دست آمده از روش تجربی و روش عددی کمک گرفته شده و در این قسمت میزان اثر گذاری پارامترهای مختلف بر نیروی شکل‌دهی و سطوح بهینه هر پارامتر تعیین</p>			

شده‌اند. در انتها نتایج حل تحلیلی، عددی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

نتایج به‌دست آمده با هر سه روش تحلیلی، عددی و تجربی نشان داد که پروفیل چند جمله‌ای مرتبه دوم در مقایسه با دو پروفیل دیگر، کمترین نیرو را برای ایجاد تغییر شکل مصرف می‌کند. با افزایش نسبت اکستروژن، مقدار نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی نیز افزایش می‌یابد. اما هر سه روش تحلیلی، عددی و تجربی ثابت کرده است که مقدار افزایش نیرو با افزایش نسبت اکستروژن کاهش می‌یابد. اگرچه روش‌های عددی و تحلیلی نشان می‌دهند که با افزایش مقدار ضریب اصطکاک مربوط به هر روانکار، نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی نیز افزایش می‌یابد، اما در روش تجربی این روند برای روانکار وازلین+تیتانیا مشاهده نشده است. تحلیل آماری آزمایش‌های تجربی به روش تاگوچی نیز نشان داد که پارامتر نسبت اکستروژن، بیشترین تأثیر را نسبت به پارامترهای دیگر، بر نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی داشته است. مقایسه نتایج تجربی، عددی و تحلیلی نیز نشان داد که روش عددی در مقایسه با روش تحلیلی تطابق بهتری با نتایج آزمایش‌ها داشته است.

# شکر و قدردانی

شکر خدا که هر چه طلب کردم از خدا

بر رتبه‌های همت خود کمالان شدم

سپاس و ستایش خدای را که بار دیگر توفیق پیدا و پهنایش یاری ام نمود تا بتوانم این مرحله از زندگی علمی ام را با موفقیت به اتمام برسانم و تقدیر

و شکر از:

پدر و مادر عزیزم که معنای تمام زندگی ام هستند و بعد از خداوند بهترین حامی و پشتیبان من در تمام زندگی. از این رو، واژه شکر کلمه‌ای

ناتوان در سپاس از ایشان است.

جناب آقای دکتر صنّعی که راهبانی‌های بی‌منت ایشان در طول این مدت مورد ستایش بوده است. بی‌شک شاکردی ایشان بایه افتخار و

مباهات من است.

به‌چنین از بهکاری آقایان مهندس خالد زاده و پیمانده کمال شکر را دارم.

از همراهی خواهر عزیزم مسافار و دوستان خوبم بهار آهوقلندری، ماریتا کریمی، نسیم دائمی و نفسیه خدایاری، و نیز آقایان محمد رضا آرش، مجید

مرتضوی، پیام ورشویی، فرزانه براتی، و تمامی دوستانی که در تمامی سخت‌های انجام این پایان نامه با محبت‌های خود مسیر حرکت را برای من پراز شور و

اشتیاق کرده‌اند، شکر و قدردانی می‌نمایم.

نعیمه فخار

پاییز ۱۳۸۸

فصل اول: مقدمه‌ای بر فرآیند اکستروژن .....	۱
۱-۱ مقدمه .....	۲
۲-۱ فرآیندهای شکل دهی فلز .....	۲
۳-۱ طبقه بندی فرآیندهای شکل دهی فلز .....	۳
۴-۱ فرآیند اکستروژن .....	۵
۵-۱ انواع فرآیندهای اکستروژن .....	۸
۶-۱ متغیرهای اکستروژن .....	۹
۱-۶-۱ نوع اکستروژن .....	۱۰
۲-۶-۱ پروفیل قالب .....	۱۱
۳-۶-۱ نسبت اکستروژن .....	۱۱
۴-۶-۱ دمای کاری .....	۱۲
۵-۶-۱ سرعت کوبه .....	۱۲
۶-۶-۱ شرایط اصطکاکی در قالب و محفظه .....	۱۳
۷-۱ معرفی پایان نامه حاضر .....	۱۴
فصل دوم: تحلیل فرآیند اکستروژن مستقیم .....	۱۷
۱-۲ مقدمه .....	۱۸
۲-۲ روش‌های تحلیل فرآیند اکستروژن .....	۱۹
۳-۲ روش حد بالایی .....	۲۱
۱-۳-۲ مروری بر تحقیقات گذشته در روش حد بالایی .....	۲۴
۲-۳-۲ کاربرد روش حد بالایی در اکستروژن کرنش صفحه‌ای .....	۲۷
۴-۲ روش تعادل نیروها (روش قاچی) .....	۳۲
۱-۴-۲ کاربرد روش تعادل نیروها در اکستروژن کرنش صفحه‌ای .....	۳۴
فصل سوم: بهینه‌سازی پروفیل قالب .....	۳۹

۴۰	۱-۳ مقدمه
۴۱	۲-۳ الگوریتم ژنتیک
۴۳	۳-۳ تعاریف کلی اجزای الگوریتم ژنتیک
۴۳	۱-۳-۳ نمایش جمعیت و کروموزوم
۴۳	۲-۳-۳ تابع هدف و تابع برازش
۴۳	۳-۳-۳ انتخاب
۴۴	۴-۳-۳ تقاطع
۴۴	۵-۳-۳ جهش
۴۴	۴-۳ نقاط قوت الگوریتم‌های ژنتیک
۴۶	۵-۳ الگوریتم ژنتیک در <i>Matlab</i>
۴۸	۶-۳ روش‌های بهینه‌سازی پروفیل قالب
۵۳	۷-۳ روش بهینه‌سازی پروفیل قالب در تحقیق حاضر
۵۴	۱-۷-۳ بهینه‌سازی پروفیل مرتبه دوم
۵۵	۲-۷-۳ بهینه‌سازی پروفیل نمایی

## فصل چهارم: آزمایش‌های عملی و بررسی نتایج تجربی ..... ۵۸

۵۹	۱-۴ مقدمه
۶۰	۲-۴ تعیین تجربی منحنی تنش-کرنش ماده
۶۱	۱-۲-۴ آزمایش فشار استوانه
۶۲	۲-۲-۴ روش ضریب اصلاح تحذب ( <i>BCFM</i> )
۶۳	۳-۲-۴ روش ضریب اصلاح عددی
۶۴	۳-۴ تعیین ضرائب اصطکاک
۶۸	۴-۴ آزمایش‌های عملی
۶۹	۱-۴-۴ ساخت نمونه‌ها
۷۰	۲-۴-۴ تعیین سرعت
۷۲	۳-۴-۴ نتایج آزمایش فشار



۷۴	۴-۴-۴ نتایج آزمایش فشار حلقه.....
۷۸	۵-۴-۴ ساخت قالب ها .....
۸۰	۶-۴-۴ آزمایش های اکستروژن .....
۸۱	۵-۴ نتایج آزمایش های اکستروژن .....
۸۱	۱-۵-۴ بررسی اثر پروفیل قالب .....
۸۷	۲-۵-۴ بررسی اثر نسبت اکستروژن .....
۹۳	۳-۵-۴ بررسی اثر اصطکاک .....
۹۹	۶-۴ بررسی عوامل خطا در آزمایش ها.....
۱۰۰	۷-۴ بررسی تکرار پذیری آزمایش ها .....

## فصل پنجم: شبیه سازی اجزاء محدود فرآیند اکستروژن ..... ۱۰۲

۱۰۳	۱-۵ مقدمه.....
۱۰۴	۲-۵ توصیف عمومی روش اجزاء محدود .....
۱۰۷	۳-۵ معرفی نرم افزار <i>Deform 2D</i> .....
۱۰۷	۴-۵ نحوه شبیه سازی در <i>Deform</i> .....
۱۱۴	۱-۴-۵ شبیه سازی آزمایش فشار .....
۱۱۷	۲-۴-۵ شبیه سازی آزمایش حلقه .....
۱۱۸	۳-۴-۵ شبیه سازی آزمایش های اکستروژن.....
۱۱۹	۵-۵ نتایج شبیه سازی های فرآیند اکستروژن .....
۱۲۰	۱-۵-۵ بررسی اثر پروفیل قالب .....
۱۲۵	۲-۵-۵ بررسی نسبت اکستروژن .....
۱۳۰	۳-۵-۵ بررسی اثر اصطکاک .....

## فصل ششم: تحلیل آزمایش ها به روش تاگوچی و طرح های عاملی ..... ۱۳۷

۱۳۸	۱-۶ مقدمه.....
-----	----------------

۱۳۹	۲-۶ روش طراحی آزمایش‌ها (DOE).....
۱۴۰	۳-۶ تحلیل واریانس آزمایش‌های عاملی .....
۱۴۶	۴-۶ طرح‌های غربالی .....
۱۴۷	۱-۴-۶ طرح‌های عاملی کسری $2^f$ .....
۱۴۸	۲-۴-۶ روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها.....
۱۴۹	۱-۲-۴-۶ روش طراحی پارامتر تاگوچی .....
۱۵۰	۲-۲-۴-۶ تجزیه و تحلیل داده‌ها و نتیجه‌گیری .....
۱۵۱	۳-۲-۴-۶ آرایه $L_9 3^4$ .....
۱۵۲	۵-۶ تحلیل آماری آزمایش‌های اکستروژن .....
۱۵۳	۱-۵-۶ تحلیل توسط روش تاگوچی .....
۱۵۸	۲-۵-۶ تحلیل عاملی کامل آزمایش‌ها .....
۱۶۱	<b>فصل هفتم: مقایسه نتایج روش‌های مختلف برای ارزیابی نیروی اکستروژن .....</b>
۱۶۲	۱-۷ مقدمه.....
۱۶۲	۲-۷ تعیین نیرو با روش تعادل نیروها .....
۱۶۵	۳-۷ بررسی پارامترهای مؤثر بر فرآیند با روش تعادل نیروها.....
۱۶۵	۱-۳-۷ بررسی اثر پروفیل قالب .....
۱۶۷	۲-۳-۷ بررسی اثر نسبت اکستروژن .....
۱۶۹	۳-۳-۷ بررسی اثر روانکار .....
۱۷۱	۴-۷ مقایسه نتایج تحلیلی، عددی و تجربی .....
۱۷۶	۵-۷ بحث و بررسی نتایج .....
۱۷۸	<b>فصل هشتم: خلاصه، نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....</b>
۱۷۹	۱-۸ خلاصه.....
۱۸۰	۲-۸ نتیجه‌گیری .....
۱۸۱	۳-۸ پیشنهادها .....

۱۸۳ ..... پیوست

۱۸۷ ..... مراجع

شکل ۱-۱: طبقه‌بندی فرآیندهای شکل‌دهی بر اساس استاندارد <i>DIN8582</i> .....	۵
شکل ۲-۱: نمای کلی فرآیند اکستروژن مستقیم و اجزاء آن .....	۷
شکل ۳-۱ (الف) اکستروژن غیر مستقیم، (ب) اکستروژن هیدروستاتیک، (پ) اکستروژن جانبی .....	۹
شکل ۵-۱: جریان ماده در فرآیند اکستروژن .....	۱۴
شکل ۱-۲: ناپیوستگی سرعت در امتداد مرزهای دو ناحیه مجاور از منطقه تغییر شکل پلاستیکی یک جسم .....	۲۴
شکل ۲-۲: دامنه و یک سطح جریان برای اکستروژن تقارن محوری .....	۲۶
شکل ۳-۲: میدان سرعت مجاز سینماتیکی .....	۲۹
شکل ۴-۲: المان حجمی انتخاب شده از ناحیه تغییر شکل .....	۳۴
شکل ۵-۲: تنش‌های اعمال شده بر المان .....	۳۶
شکل ۱-۳: نمایی از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک در <i>Matlab</i> .....	۴۸
شکل ۲-۳: روش قاچی نمودی برای پروفیل‌های منحنی شکل .....	۵۰
شکل ۳-۳: توصیف منحنی‌های بزیر .....	۵۲
شکل ۴-۳: کاربرد منحنی‌های بزیر برای تولید قالب اکستروژن .....	۵۲
شکل ۱-۴: نمای شماتیک آزمایش فشار با وجود اصطکاک بین سطحی و پارامترهای هندسی آزمایش .....	۶۴
شکل ۲-۴: تغییرات تنش اصطکاکی برای سه مدل اصطکاک .....	۶۶
شکل ۳-۴: اثر مقدار اصطکاک بر جریان فلز در آزمایش حلقه .....	۶۷
شکل ۴-۴: منحنی تنش-کرنش سرب با اعمال ضریب اصلاح تحذب تحلیلی .....	۷۴
شکل ۵-۴: منحنی تنش-کرنش نهایی سرب با اعمال ضریب اصلاح عددی .....	۷۵
شکل ۶-۴: حلقه اصلی و نمونه‌های دیگر پس از انجام آزمایش حلقه با روانکارهای مختلف .....	۷۷

- شکل ۷-۴: نمودار کالیبراسیون اصطکاکی عددی و نتایج آزمایش فشار حلقه..... ۷۷
- شکل ۸-۴: نمایی از مجموعه قالب‌ها، از سمت راست به ترتیب محفظه نگهدارنده، یک نمونه قالب اصلی با پروفیل خطی، سمبه و صفحه جلویی دیده میشود..... ۷۹
- شکل ۹-۴: یک نمونه از بیلت اولیه به همراه سه محصول به‌دست آمده، به ترتیب از سمت راست، در قالب نمایی، خطی و مرتبه دوم ..... ۸۱
- شکل ۱۰-۴: مقایسه نیرو در پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 2$  و روانکار پودر سنباده..... ۸۳
- شکل ۱۱-۴: مقایسه نیرو در پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 2$  در حالت خشک..... ۸۳
- شکل ۱۲-۴: مقایسه نیرو در پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 2$  و روانکار وازلین+تیتانیا..... ۸۴
- شکل ۱۳-۴: مقایسه نیرو در پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 2.5$  و روانکار پودر سنباده..... ۸۴
- شکل ۱۴-۴: مقایسه نیرو در پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 2.5$  در حالت خشک..... ۸۵
- شکل ۱۵-۴: مقایسه نیرو در پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 2.5$  و روانکار وازلین+تیتانیا..... ۸۵
- شکل ۱۶-۴: مقایسه نیرو در پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 3$  و روانکار پودر سنباده..... ۸۶
- شکل ۱۷-۴: مقایسه نیرو در پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 3$  در حالت خشک..... ۸۶
- شکل ۱۸-۴: مقایسه نیرو در پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 3$  و روانکار وازلین+تیتانیا..... ۸۷
- شکل ۱۹-۴: مقایسه نیرو در نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب نمایی با روانکار پودر سنباده..... ۸۹
- شکل ۲۰-۴: مقایسه نیرو در نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب نمایی در حالت خشک..... ۸۹
- شکل ۲۱-۴: مقایسه نیرو در نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب نمایی با روانکار وازلین+تیتانیا..... ۸۹
- شکل ۲۲-۴: مقایسه نیرو در نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب خطی با روانکار پودر سنباده..... ۹۰
- شکل ۲۳-۴: مقایسه نیرو در نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب خطی در حالت خشک..... ۹۰
- شکل ۲۴-۴: مقایسه نیرو در نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب خطی با روانکار وازلین+تیتانیا..... ۹۱
- شکل ۲۵-۴: مقایسه نیرو در نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب مرتبه دوم با روانکار پودر سنباده..... ۹۱

- شکل ۴-۲۶: مقایسه نیرو در نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب مرتبه دوم در حالت خشک ..... ۹۲
- شکل ۴-۲۷: مقایسه نیرو در نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب مرتبه دوم با روانکار وازلین+تیتانیا ..... ۹۲
- شکل ۴-۲۸: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در قالب نمایی و در  $ER = 3$  ..... ۹۴
- شکل ۴-۲۹: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در قالب نمایی و در  $ER = 2.5$  ..... ۹۵
- شکل ۴-۳۰: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در قالب نمایی و در  $ER = 2$  ..... ۹۵
- شکل ۴-۳۱: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در قالب خطی و در  $ER = 3$  ..... ۹۶
- شکل ۴-۳۲: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در قالب خطی و در  $ER = 2.5$  ..... ۹۶
- شکل ۴-۳۳: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در قالب خطی و در  $ER = 2$  ..... ۹۷
- شکل ۴-۳۴: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در قالب مرتبه دوم و در  $ER = 3$  ..... ۹۷
- شکل ۴-۳۵: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در قالب مرتبه دوم و در  $ER = 2.5$  ..... ۹۸
- شکل ۴-۳۶: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در قالب مرتبه دوم و در  $ER = 2$  ..... ۹۸
- شکل ۴-۳۷: بررسی تکرار پذیری آزمایش اکستروژن در قالب خطی. .... ۱۰۰
- شکل ۴-۳۸: بررسی تکرار پذیری آزمایش در قالب مرتبه دوم. .... ۱۰۱
- شکل ۴-۳۹: بررسی تکرار پذیری آزمایش در قالب نمایی. .... ۱۰۱
- شکل ۵-۱: پنجره کنترل شبیه‌سازی در قسمت اصلی. .... ۱۰۹
- شکل ۵-۲: پنجره کنترل شبیه‌سازی در قسمت *Step* ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۳: پنجره مربوط به تنظیمات اجسام ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۴: تعریف یک ماده جدید ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۵: وارد کردن منحنی تنش-کرنش ماده ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۶: تعیین خصوصیات تماس بین اجسام ..... ۱۱۳

- شکل ۷-۵: تعیین نوع نمودار مورد نیاز برای جسم مورد نظر..... ۱۱۵
- شکل ۸-۵: نمونه شبیه‌سازی شده آزمایش فشار، از سمت راست به ترتیب قبل و بعد از انجام آزمایش..... ۱۱۶
- شکل ۹-۵: مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان آزمایش فشار و شبیه‌سازی آن با استفاده از منحنی تنش-کرنش نهایی به دست آمده برای سرب ..... ۱۱۷
- شکل ۱۰-۵: نمونه شبیه‌سازی شده آزمایش حلقه، از راست به ترتیب، قبل و بعد از انجام آزمایش، با ضریب اصطکاک  $m=0.4$  ..... ۱۱۸
- شکل ۱۱-۵: یک نمونه مدل‌سازی شده آزمایش اکستروژن با قالب نمایی، از راست به ترتیب، قبل و بعد از انجام شبیه‌سازی ..... ۱۱۹
- شکل ۱۲-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 2$  و روانکار پودر سنباده..... ۱۲۱
- شکل ۱۳-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 2$  در حالت خشک..... ۱۲۲
- شکل ۱۴-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 2$  و روانکار وازلین+تیتانیا..... ۱۲۲
- شکل ۱۵-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 2.5$  و روانکار پودر سنباده ..... ۱۲۲
- شکل ۱۶-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 2.5$  در حالت خشک..... ۱۲۳
- شکل ۱۷-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 2.5$  و روانکار وازلین+تیتانیا..... ۱۲۳
- شکل ۱۸-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 3$  و روانکار پودر سنباده..... ۱۲۴
- شکل ۱۹-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 3$  در حالت خشک..... ۱۲۴
- شکل ۲۰-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی پروفیل‌های مختلف قالب برای  $ER = 3$  و روانکار وازلین+تیتانیا..... ۱۲۵
- شکل ۲۱-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب نمایی با روانکار پودر سنباده..... ۱۲۶
- شکل ۲۲-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب نمایی در حالت خشک..... ۱۲۶
- شکل ۲۳-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب نمایی با روانکار وازلین+تیتانیا..... ۱۲۷
- شکل ۲۴-۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب خطی با روانکار پودر سنباده..... ۱۲۷

- شکل ۵-۲۵: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب خطی در حالت خشک ..... ۱۲۸
- شکل ۵-۲۶: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب خطی با روانکار وازلین+تیتانیا ..... ۱۲۸
- شکل ۵-۲۷: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب مرتبه دوم با روانکار پودر سنباده ..... ۱۲۹
- شکل ۵-۲۸: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب مرتبه دوم در حالت خشک ..... ۱۳۰
- شکل ۵-۲۹: مقایسه نیرو در شبیه‌سازی نسبت‌های مختلف اکستروژن برای قالب مرتبه دوم با روانکار وازلین+تیتانیا ... ۱۳۰
- شکل ۵-۳۰: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در شبیه‌سازی قالب نمایی برای  $ER = 3$  ..... ۱۳۲
- شکل ۵-۳۱: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در شبیه‌سازی قالب نمایی برای  $ER = 2.5$  ..... ۱۳۳
- شکل ۵-۳۲: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در شبیه‌سازی قالب نمایی برای  $ER = 2$  ..... ۱۳۴
- شکل ۵-۳۳: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در شبیه‌سازی قالب خطی برای  $ER = 3$  ..... ۱۳۴
- شکل ۵-۳۴: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در شبیه‌سازی قالب خطی برای  $ER = 2.5$  ..... ۱۳۵
- شکل ۵-۳۵: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در شبیه‌سازی قالب خطی برای  $ER = 2$  ..... ۱۳۵
- شکل ۵-۳۶: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در شبیه‌سازی قالب مرتبه دوم برای  $ER = 3$  ..... ۱۳۵
- شکل ۵-۳۷: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در شبیه‌سازی قالب مرتبه دوم برای  $ER = 2.5$  ..... ۱۳۶
- شکل ۵-۳۸: تغییر مقدار نیرو با تغییر نوع روانکار در شبیه‌سازی قالب مرتبه دوم برای  $ER = 2$  ..... ۱۳۶
- شکل ۶-۱: تغییرات مقادیر هشدار به اغتشاش با تغییر سطوح هر عامل در آزمایش‌های عملی فرآیند اکستروژن مستقیم ..... ۱۵۶
- شکل ۶-۲: تغییرات مقادیر هشدار به اغتشاش با تغییر سطوح هر عامل در شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن مستقیم ..... ۱۵۷
- شکل ۶-۳: تغییرات مقادیر نیرو با تغییر سطوح هر عامل در آزمایش‌های عملی فرآیند اکستروژن مستقیم ..... ۱۵۸
- شکل ۶-۴: تغییرات مقادیر نیرو با تغییر سطوح هر عامل در شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن مستقیم ..... ۱۵۸
- شکل ۶-۵: تغییرات میانگین مقادیر نیرو با تغییر سطح هر عامل در آزمایش‌های تجربی فرآیند اکستروژن مستقیم ..... ۱۶۰



- شکل ۷-۱: بررسی اثر پروفیل قالب بر نیروی مصرفی در فرآیند اکستروژن برای نسبت‌های مختلف اکستروژن با روانکار پودر  
 سنبله ۱۶۶.....
- شکل ۷-۲: بررسی اثر پروفیل قالب بر نیروی مصرفی در فرآیند اکستروژن برای نسبت‌های مختلف اکستروژن در حالت  
 بدون روانکار ۱۶۷.....
- شکل ۷-۳: بررسی اثر پروفیل قالب بر نیروی مصرفی در فرآیند اکستروژن برای نسبت‌های مختلف اکستروژن با روانکار  
 وازلین+تیتانیا ۱۶۷.....
- شکل ۷-۴: بررسی اثر نسبت اکستروژن بر نیروی اکستروژن برای روانکارهای مختلف با به کارگیری پروفیل قالب نمایی ۱۶۸
- شکل ۷-۵: بررسی اثر نسبت اکستروژن بر نیروی اکستروژن برای روانکارهای مختلف با به کارگیری پروفیل قالب خطی ۱۶۹
- شکل ۷-۶: بررسی اثر نسبت اکستروژن بر نیروی اکستروژن برای روانکارهای مختلف با به کارگیری پروفیل قالب مرتبه دوم  
 ۱۶۹.....
- شکل ۷-۷: بررسی اثر نوع روانکار بر نیروی مصرفی در فرآیند اکستروژن برای پروفیل‌های مختلف در  $ER=3$  ..... ۱۷۰
- شکل ۷-۸: بررسی اثر نوع روانکار بر نیروی مصرفی در فرآیند اکستروژن برای پروفیل‌های مختلف در  $ER=2.5$  ..... ۱۷۱
- شکل ۷-۹: بررسی اثر نوع روانکار بر نیروی مصرفی در فرآیند اکستروژن برای پروفیل‌های مختلف در  $ER=2$  ..... ۱۷۱
- شکل ۷-۱۰: مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان در سه روش تحلیلی، عددی و تجربی برای قالب نمایی در حالت خشک و  
 در نسبت اکستروژن ۳..... ۱۷۴
- شکل ۷-۱۱: مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان در سه روش تحلیلی، عددی و تجربی برای قالب خطی در حالت خشک و  
 در نسبت اکستروژن ۳..... ۱۷۵

جدول ۴-۱: سرعت کوبه برای آزمایش‌های اکستروژن .....	۷۳
جدول ۶-۱: داده‌های یک آزمایش تک‌عاملی.....	۱۴۱
جدول ۶-۲: تحلیل واریانس برای مدل تک‌عاملی .....	۱۴۲
جدول ۶-۳: تحلیل واریانس طرح‌های سه‌عاملی کلی .....	۱۴۴
جدول ۶-۴: آرایه $L_9 3^4$ تاگوچی.....	۱۵۲
جدول ۶-۵: پارامترهای فرآیند و سطوح آنها.....	۱۵۳
جدول ۶-۶: تحلیل آزمایش‌ها با روش تاگوچی .....	۱۵۴
جدول ۶-۷: میزان مشارکت پارامترهای مختلف در فرآیند اکستروژن مستقیم .....	۱۵۵
جدول ۶-۸: آزمایش‌های انجام شده و نتایج به‌دست آمده از آنها.....	۱۶۰
جدول ۷-۱: مقایسه نیروهای به‌دست آمده از سه روش تحلیلی، عددی و تجربی برای فرآیند اکستروژن مستقیم .....	۱۷۳

# فصل اول

مقدمه ای بر فرآیند اکستروژن

## ۱-۱ مقدمه

تولید، یک فعالیت بشری است که همه‌ی جنبه‌های زندگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و همواره در خدمت پیشرفت بشر بوده است، بدون آن، بسیاری از امکانات مدرن امروزی قابل دستیابی نبودند. تولید، چیزی جز هنر و علم تبدیل ماده به محصولات نهایی مفید و قابل فروش نیست. تولید را می‌توان ساخت کالاهای اجزاء با دست و یا به صورت ماشینی و در مقیاس وسیع نیز تعریف نمود. نیاز صنایع امروزی، بهره‌وری بالا با رعایت دقت ابعادی خواسته شده و پرداخت سطح بهتر نسبت به کاربرد محصول است [۱].

مهندسی، تولید تنوع گسترده‌ای از زمینه‌ها مانند تولید اتومبیل‌ها، هواپیماها، موشک‌ها، ابزارهای ماشین، تجهیزات کشاورزی و مانند آن را شامل می‌شود. صنایع از میلیون‌ها انسان، ابزار تولید، ماشین، فرآیند و دیگر امکانات مرتبط و مقادیر زیادی پول برای شکل دادن و تولید موادی که مورد نیاز بشر است، استفاده می‌کنند. نیاز به افزایش نرخ تولید برای برآوردن تقاضاهای زیاد، همزمان با معرفی فرآیندهای جدید و سریع، استفاده از ابزارهای گران و ماشین‌ها را ضروری ساخته است. یکی از این فرآیندهای تولید که در دهه‌های اخیر رشد چشمگیری یافته است، فرآیند شکل‌دهی فلز است که خود دارای شاخه‌های گوناگونی می‌باشد [۱].

## ۱-۲ فرآیندهای شکل‌دهی فلز

در اینجا منظور از شکل‌دهی فلز نوعی عملیات و فرآیند تولیدی است که طی آن، شکل معلوم و مشخص یک قطعه جامد بدون اینکه تغییری در جرم، حجم و ترکیب مادی قطعه رخ دهد، به طور دائم تغییر کند. ویژگی اصلی و ممتاز این فرآیند، کنترل خواص مکانیکی در حین شکل‌دهی می‌باشد. مثلاً تخلخل در یک شمش ریختگی ممکن است توسط آهنگری گرم یا نورد گرم از بین رود تا نرمی و چقرمگی در قطعه ایجاد شود. در بسیاری از محصولات، خواص مکانیکی به کنترل کار سختی حین فرآیند بستگی دارد که این نیز