



دانشگاه کردستان
دانشکده مهندسی
گروه مکانیک

عنوان:

بررسی تاثیر سرعت سیلان بر ناحیه تغییر فرم پلاستیک در فرآیند اکستروژن
زاویه‌دار با دو کانال خروجی جانبی با استفاده از روش اجزاء محدود

پژوهشگر:

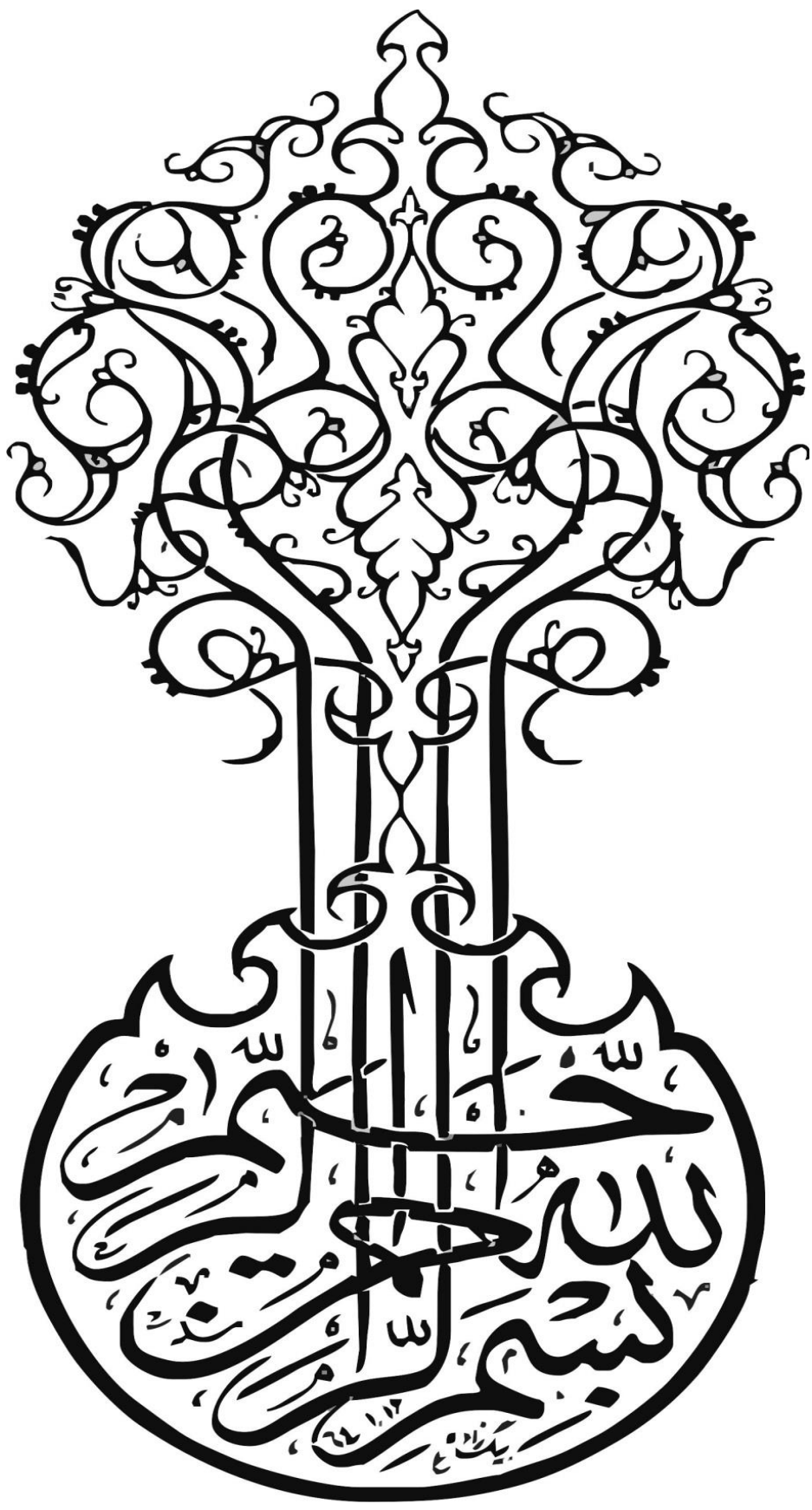
سید علی اعلائی اندیلی

استاد راهنما:

دکتر آرمان حسنی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

مهر ماه ۱۳۹۲





دانشگاه کردستان
دانشکده مهندسی
گروه مکانیک

عنوان:

بررسی تاثیر سرعت سیلان بر ناحیه تغییر فرم پلاستیک در فرآیند اکستروژن
زاویه‌دار با دو کانال خروجی جانبی با استفاده از روش اجزاء محدود

پژوهشگر:

سید علی اعلائی اندیلی

استاد راهنما:

دکتر آرمان حسنی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

مهر ماه ۱۳۹۲

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع

این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه کردستان است.

*** تعهد نامه ***

اینجانب سید علی اعلائی اندبیلی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی دانشگاه کردستان، دانشکده فنی و مهندسی گروه مهندسی مکانیک تعهد می نمایم که محتوای این پایان نامه نتیجه تلاش و تحقیقات خود بوده و از جایی کپی برداری نشده و به پایان رسانیدن آن نتیجه تلاش و مطالعات مستمر اینجانب و راهنمایی و مشاوره اساتید بوده است.

با تقدیم احترام

سید علی اعلائی اندبیلی

۱۳۹۲ / ۷ / ۲۸



دانشگاه کردستان
دانشکده مهندسی
گروه مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

عنوان:

بررسی تاثیر سرعت سیلان بر ناحیه تغییر فرم پلاستیک در فرآیند اکستروژن
زاویه دار با دو کانال خروجی جانبی با استفاده از روش اجزاء محدود

پژوهشگر:

سید علی اعلائی اندییلی

در تاریخ ۱۳۹۲ / ۷ / ۲۸ توسط کمیته تخصصی و هیات داوران زیر مورد بررسی قرار گرفت و با نمره ۱۹/۶۳ و درجه عالی به تصویب رسید.

<u>امضاء</u>	<u>مرتبه علمی</u>	<u>نام و نام خانوادگی</u>	<u>هیات داوران</u>
	استادیار	دکتر آرمان حسنی	۱- استاد راهنما
	استادیار	دکتر حسین نوری	۳- استاد داور خارجی
	استادیار	دکتر سیروان فرهادی	۴- استاد داور داخلی

مهر و امضاء معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده

مهر و امضاء گروه

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

امانگه آفتاب مهرشان در آستانه قلمم، همچنان پابرجاست و هرگز غروب نخواهد کرد.

باتقدیر و تشکر شایسته از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر آرمان حسنی که همواره راهنما و
راه‌گشای نگارنده در اتمام و اکمال پایان‌نامه بوده است.

و با تشکر از

دکتر سید حسین اعلائی، مهندس سیده مریم اعلائی، مهندس سید سعید بهاری، مهندس محمد
صادق حق‌گویان، مهندس صالح ملکپور، مهندس حدیث بابایی، مهندس سجاد روزخواه، مهندس
حمید رضا عنانی، مهندس مصلح لطیفی، مهندس سید جواد حسینی، مهندس پیمان اسلامی،
مهندس مهدی مرآتی.

چکیده

اکستروژن زاویه دار با کانال‌های برابر (ECAE) به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها در تغییر فرم-های شدید (SPD) به دلیل مزایای ممتاز آن در تولید مواد نانو ساختار در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یک نوع تغییر شکل یافته‌ی این فرآیند با نام اکستروژن زاویه‌دار با کانال‌های برابر پهلویی (DECLÉ) در سال‌های اخیر ارائه گردیده است. در کار حاضر تأثیر سرعت سیلان بر ناحیه تغییر فرم پلاستیک در این فرآیند با استفاده از روش اجزاء محدود بررسی شده است. در این راستا سه سرعت ورودی متفاوت مد نظر قرار گرفته و در هر حالت، نسبت سرعت در کانال‌های خروجی تغییر داده شده است. پس از مدل‌سازی اجزاء محدود فرآیند توسط نرم افزار ABAQUS، خطوط جریان بدست آمده از شبیه سازی توسط مدل خطوط سیلان مورد آنالیز قرار گرفته است. پس از مطالعه‌ی پارامترهای مربوط به خطوط جریان، تحولات ناحیه تغییر فرم پلاستیک، شرایط ناپایداری، نرخ کرنش سیلان پلاستیک و تراکم پذیری فرآیند در حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: اکستروژن زاویه‌دار با کانال‌های برابر پهلویی، مدل خطوط سیلان، شبیه سازی، روش

اجزاء محدود

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
۱ فصل اول: فرآیند اکستروژن زاویه‌دار	۳
۱-۱ مقدمه	۳
۱-۲ اصول فرآیند اکستروژن زاویه‌دار (ECAE)	۵
۳-۱ پیش بینی کرنش در فرآیند اکستروژن زاویه‌دار (ECAE)	۶
۲ فصل دوم: مروری اجمالی بر مطالعات صورت گرفته تاکنون	۹
۱-۲ بررسی فرآیند اکستروژن زاویه‌دار به روش اجزاء محدود	۹
۲-۲ مدل تابع جریان	۱۶
۳-۲ فرآیند اکستروژن زاویه‌دار با دو کانال خروجی جانبی	۲۱
۴-۲ ضرورت و اهداف تحقیق	۲۲
۳ فصل سوم: مدلسازی اجزاء محدود فرآیند اکستروژن با دو کانال خروجی جانبی	۲۳
۱-۳ مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس	۲۴
۱-۱-۳ مدل‌سازی فرآیند برای $V_0 = 0.1mm/s$	۲۹
۲-۱-۳ مدل‌سازی فرآیند برای $V_0 = 1mm/s$	۳۱
۳-۱-۳ مدل‌سازی فرآیند برای $V_0 = 10mm/s$	۳۳
۴ فصل چهارم: تأثیر نسبت سرعت‌های ورودی و خروجی بر فرم خطوط جریان	۳۸
۱-۴ بررسی فرم تابع جریان	۳۸
۱-۱-۴ نمودار خطوط سیلان پس از تغییر فرم برای حالت $V_0 = 0.1mm/s$	۳۹
۲-۱-۴ نمودار خطوط سیلان پس از تغییر فرم برای حالت $V_0 = 1mm/s$	۴۰
۳-۱-۴ نمودار خطوط سیلان پس از تغییر فرم برای حالت $V_0 = 10mm/s$	۴۲
۵ فصل پنجم: تأثیر نسبت سرعت‌های ورودی و خروجی بر ناحیه تغییر فرم پلاستیک و شرایط ناپایداری	۴۵
۱-۵ بررسی ناحیه تغییر فرم	۴۵

۴۷	۲-۵ بررسی شرایط ناپایداری
۵۱	۶ فصل ششم: تأثیر نسبت سرعت‌های ورودی و خروجی بر نرخ کرنش سیلان
۵۱	۱-۶ محاسبه نرخ کرنش در فرآیند اکستروژن زاویه‌دار
۵۲	۱-۱-۶ نمودار نرخ کرنش برای $V_0 = 0.1mm/s$
۵۳	۲-۱-۶ نمودار نرخ کرنش برای $V_0 = 1mm/s$
۵۵	۳-۱-۶ نمودار نرخ کرنش برای $V_0 = 10mm/s$
۵۷	۷ فصل هفتم: بررسی تراکم پذیری و تأثیر آن بر فرم تابع جریان
۵۷	۱-۷ بررسی تراکم پذیری برای حالت $V_0 = 0.1mm/s$
۵۸	۲-۷ بررسی تراکم پذیری برای حالت $V_0 = 1mm/s$
۵۹	۳-۷ بررسی تراکم پذیری برای حالت $V_0 = 10mm/s$
۶۱	۸ فصل هشتم: نتیجه‌گیری و بحث
۶۱	۱-۸ تأثیر نسبت سرعت‌های ورودی و خروجی بر فرم تابع جریان
۶۱	۱-۱-۸ حالت $V_0 = 0.1mm/s$
۷۰	۲-۱-۸ حالت $V_0 = 1mm/s$
۷۷	۳-۱-۸ حالت $V_0 = 10mm/s$
۸۵	۲-۸ تأثیر نسبت سرعت‌های ورودی و خروجی بر ناحیه تغییر فرم پلاستیک و شرایط ناپایداری ...
۸۷	۳-۸ تأثیر نسبت سرعت‌های ورودی و خروجی بر نرخ کرنش سیلان
۸۸	۴-۸ تراکم پذیری و تأثیر آن بر فرم تابع جریان
۸۸	۱-۴-۸ بررسی تراکم پذیری برای حالت $V_0 = 0.1mm/s$
۹۰	۲-۴-۸ بررسی تراکم پذیری برای حالت $V_0 = 1mm/s$
۹۲	۳-۴-۸ بررسی تراکم پذیری برای حالت $V_0 = 10mm/s$
۹۴	۵-۸ نتیجه‌گیری کلی
۹۵	پیشنهادات
۹۶	منابع

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۲۴	جدول ۳-۱: خواص آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیوم با عملیات حرارتی T3
۲۵	جدول ۳-۲: مقادیر تنش و کرنش متناظر در ناحیه پلاستیک
۲۹	جدول ۳-۳: نسبت سرعت‌های خروجی برای حالت اول ($V_0 = 0.1mm/s$)
۳۱	جدول ۳-۴: نسبت سرعت‌ها برای حالت دوم ($V_0 = 1mm/s$)
۳۳	جدول ۳-۵: نسبت سرعت‌ها برای حالت سوم ($V_0 = 10mm/s$)
۵۷	جدول ۷-۱: سرعت در کانالها برای حالت اول
۵۸	جدول ۷-۲: سرعت در کانالها برای حالت دوم
۵۹	جدول ۷-۳: سرعت در کانالها برای حالت سوم
۸۸	جدول ۸-۱: سرعت‌های ورودی و خروجی برای حالت اول در شرایط تراکم
۹۰	جدول ۸-۲: سرعت‌های ورودی و خروجی برای حالت دوم در شرایط تراکم
۹۲	جدول ۸-۳: نسبت سرعت‌ها برای حالت سوم

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: فرآیند اکستروژن زاویه‌دار (ECAE) با زاویه قالب ϕ	۵
شکل ۲-۱: المان مکعبی قبل و بعد از عبور از صفحه برشی قالب در فرآیند اکستروژن زاویه‌دار (ECAE).....	۶
شکل ۳-۱: مقطعی از قالب فرآیند اکستروژن زاویه‌دار.....	۶
شکل ۴-۱: سطح مقطع فرآیند اکستروژن زاویه‌دار و هندسه برش یک المان مربعی شکل. ϕ زاویه بین دو کانال قالب و Ψ زاویه گوشه قالب است. در حالت A: $\Psi = 0$ و در حالت B: $0 < \Psi < \pi - \phi$	۷
شکل ۱-۲: انواع فشار پستی [۱۸].....	۱۰
شکل ۲-۲: انواع مسیرهای فرآیند اکستروژن زاویه‌دار (ECAE) [۲۲].....	۱۲
شکل ۳-۲: نمایی از فرآیند اکستروژن زاویه‌دار [۲۹].....	۱۴
شکل ۵-۲: توصیف سیلان توسط خطوط سیلان، n نشان‌دهنده توان در تابع جریان است [۳۲].....	۱۷
شکل ۶-۲: مدل تابع جریان.....	۲۰
شکل ۳-۱: نمایی از قالب و نمونه در فرآیند اکستروژن زاویه‌دار با دو کانال خروجی.....	۲۳
شکل ۳-۲: نمونه مدل شده در آباکوس.....	۲۵
شکل ۳-۳: قالب مدل شده در آباکوس.....	۲۵
شکل ۳-۴: نمونه و قالب در محیط Assembly.....	۲۷
شکل ۳-۵: نمونه و قالب در مدول Load.....	۲۷
شکل ۳-۶: نمونه مش بندی شده در آباکوس.....	۲۸
شکل ۳-۷: کانتور کرنش پلاستیک نمونه تغییر فرم یافته در نسبت سرعت‌های خروجی مختلف برای $V_0 = 0.1mm/s$	۳۱
شکل ۳-۸: کانتور کرنش پلاستیک نمونه تغییر فرم یافته در نسبت سرعت‌های خروجی مختلف برای $V_0 = 1mm/s$	۳۳
شکل ۳-۹: کانتور کرنش پلاستیک نمونه تغییر فرم یافته در نسبت سرعت‌های خروجی مختلف برای $V_0 = 10mm/s$	۳۵
شکل ۳-۱۰: قطعه کار پس از تغییر فرم تحت فرآیند اکستروژن زاویه‌دار با دو کانال خروجی جانبی [۱۶].....	۳۶
شکل ۳-۱۱: چرخش محور مختصات.....	۳۷
شکل ۳-۱۲: انتقال محور مختصات.....	۳۷
شکل ۴-۱: خطوط سیلان پس از تغییر فرم برای حالت $V_0 = 0.1mm/s$	۴۰
شکل ۴-۲: خطوط سیلان پس از تغییر فرم برای حالت $V_0 = 1mm/s$	۴۲
شکل ۴-۳: خطوط سیلان پس از تغییر فرم برای $V_0 = 10mm/s$	۴۴

- شکل ۵-۱: اختلاف مساحتها برای حالت $V_0 = 0.1mm/s$ در چند نسبت سرعت خروجی مختلف..... ۴۷
- شکل ۵-۲: نمودار درصد کرنش برای حالت $V_0 = 0.1mm/s$ با نسبت سرعت‌های خروجی مختلف..... ۴۹
- شکل ۵-۳: معادله نمودار درصد کرنش برای حالت $V_0 = 0.1mm/s$ با نسبت سرعت‌های خروجی مختلف..... ۵۰
- شکل ۶-۱: نمودار نرخ کرنش بر حسب λ برای حالت $V_0=0.1 mm/s$ به ازای نسبت سرعت‌های خروجی مختلف. ۵۳
- شکل ۶-۲: نمودار نرخ کرنش بر حسب λ برای حالت $V_0=1 mm/s$ به ازای نسبت سرعت‌های خروجی مختلف ۵۵
- شکل ۶-۳: نمودار نرخ کرنش بر حسب λ برای حالت $V_0=10 mm/s$ به ازای نسبت سرعت‌های خروجی مختلف... ۵۶
- شکل ۷-۱: کانتور کرنش پلاستیک ماده تغییر فرم یافته در حالت تراکمی برای $V_0 = 0.1mm/s$ ۵۸
- شکل ۷-۲: نمودار خطوط سیلان پس از تغییر فرم برای حالت $V_0 = 0.1mm/s, V_{e1} = 0.049mm/s$ ۵۸
- شکل ۷-۳: کانتور کرنش پلاستیک ماده تغییر فرم یافته در حالت تراکمی برای $V_0 = 1mms$ ۵۹
- شکل ۷-۴: نمودار خطوط سیلان پس از تغییر فرم برای حالت $V_0 = 1mm/s, V_0 = 0.49mm/s, V_0 = 0.49mm/s$ ۵۹
- شکل ۷-۵: کانتور کرنش پلاستیک ماده تغییر فرم یافته در حالت تراکمی برای $V_0 = 1mm/s$ ۶۰
- شکل ۷-۶: نمودار خطوط سیلان پس از تغییر فرم برای حالت $V_0 = 10mm/s, V_0 = 4.9mm/s, V_0 = 4.9mm/s$ ۶۰
- شکل ۸-۱: نمودار تغییرات n بر حسب x_0 برای حالت $v_0=0.1 mm/s$ به ازای نسبت سرعت‌های خروجی مختلف..... ۶۳
- شکل ۸-۲: نمودار تغییرات m بر حسب x_0 برای حالت $V_0=0.1 mm/s$ به ازای نسبت سرعت‌های خروجی مختلف..... ۶۴
- شکل ۸-۳: نمودار تغییرات α بر حسب x_0 برای حالت $V_0=0.1 mm/s$ به ازای نسبت سرعت‌های خروجی مختلف..... ۶۶
- شکل ۸-۴: نمودار خطوط سیلان با کد گذاری روی خطوط مشخص..... ۶۷
- شکل ۸-۵: نمودار تغییرات n بر حسب V_{e1} در حالت $V_0 = 0.1mm/s$ ۶۸
- شکل ۸-۶: نمودار تغییرات m بر حسب V_{e1} در حالت $V_0 = 0.1mm/s$ ۶۹
- شکل ۸-۷: نمودار تغییرات α بر حسب V_{e1} در حالت $V_0 = 0.1mm/s$ ۶۹
- شکل ۸-۸: نمودار تغییرات n بر حسب x_0 برای حالت $V_0=1 mm/s$ به ازای نسبت سرعت‌های خروجی مختلف... ۷۱
- شکل ۸-۹: نمودار تغییرات m بر حسب x_0 برای حالت $V_0=1 mm/s$ به ازای نسبت سرعت‌های خروجی مختلف ۷۳
- شکل ۸-۱۰: نمودار تغییرات α بر حسب x_0 برای حالت $V_0=1 mm/s$ به ازای نسبت سرعت‌های خروجی مختلف.. ۷۵
- شکل ۸-۱۱: نمودار تغییرات n بر حسب V_{e1} در حالت $V_0 = 1mm/s$ ۷۶
- شکل ۸-۱۲: نمودار تغییرات m بر حسب V_{e1} در حالت $V_0 = 1mm/s$ ۷۶
- شکل ۸-۱۳: نمودار تغییرات α بر حسب V_{e1} در حالت $V_0 = 1mm/s$ ۷۷

- شکل ۸-۱۴: نمودار تغییرات n بر حسب x_0 برای حالت $V_0=10\text{ mm/s}$ به ازای نسبت سرعت‌های خروجی مختلف
 ۷۹
- شکل ۸-۱۵: نمودار تغییرات m بر حسب x_0 برای حالت $V_0=10\text{ mm/s}$ به ازای نسبت سرعت‌های خروجی مختلف
 ۸۰
- شکل ۸-۱۶: نمودار تغییرات α بر حسب x_0 برای حالت $V_0=10\text{ mm/s}$ به ازای نسبت سرعت‌های خروجی مختلف
 ۸۲
- شکل ۸-۱۷: نمودار تغییرات n بر حسب V_{e1} در حالت $V_0 = 10\text{mm/s}$
 ۸۳
- شکل ۸-۱۸: نمودار تغییرات m بر حسب V_{e1} در حالت $V_0 = 10\text{mm/s}$
 ۸۴
- شکل ۸-۱۹: نمودار تغییرات α بر حسب V_{e1} در حالت $V_0 = 10\text{mm/s}$
 ۸۴
- شکل ۸-۲۰: نمودار تغییرات اختلاف مساحت با V_{e1} برای حالت $V_0 = 0.1\text{mm/s}$
 ۸۵
- شکل ۸-۲۱: نمودار تغییرات درصد نسبت کرنش با V_{e1} برای حالت $V_0 = 0.1\text{mm/s}$
 ۸۶
- شکل ۸-۲۲: نمودار تغییرات اختلاف مساحت با V_{e1} برای حالت $V_0 = 1\text{mm/s}$
 ۸۷
- شکل ۸-۲۳: نمودار تغییرات درصد نسبت کرنش با V_{e1} برای حالت $V_0 = 1\text{mm/s}$
 ۸۷
- شکل ۸-۲۴: نمودار تغییرات اختلاف مساحت با V_{e1} برای حالت $V_0 = 10\text{mm/s}$
 ۸۷
- شکل ۸-۲۵: نمودار تغییرات درصد نسبت کرنش با V_{e1} برای حالت $V_0 = 10\text{mm/s}$
 ۸۷
- شکل ۸-۲۶: نمودار تغییرات n برای حالت اول در شرایط تراکم
 ۸۹
- شکل ۸-۲۷: نمودار m برای حالت اول در شرایط تراکم
 ۸۹
- شکل ۸-۲۸: نمودار تغییرات α برای حالت اول در شرایط تراکم
 ۸۹
- شکل ۸-۲۹: مقایسه تغییرات n بر حسب x_0 برای حالت تراکمی و غیر تراکمی با $V_0 = 0.1\text{mm/s}$
 ۸۹
- شکل ۸-۳۰: مقایسه تغییرات m بر حسب x_0 برای حالت تراکمی و غیر تراکمی با $V_0 = 0.1\text{mm/s}$
 ۸۹
- شکل ۸-۳۱: مقایسه تغییرات α بر حسب x_0 برای حالت تراکمی و غیر تراکمی با $V_0 = 0.1\text{mm/s}$
 ۹۰
- شکل ۸-۳۲: نمودار تغییرات n برای حالت دوم در شرایط تراکم
 ۹۰
- شکل ۸-۳۳: نمودار تغییرات m برای حالت دوم در شرایط تراکم
 ۹۰
- شکل ۸-۳۴: نمودار تغییرات α برای حالت دوم در شرایط تراکم
 ۹۱
- شکل ۸-۳۵: مقایسه تغییرات n بر حسب x_0 برای حالت تراکمی و غیر تراکمی با $V_0 = 1\text{mm/s}$
 ۹۱
- شکل ۸-۳۶: مقایسه تغییرات m بر حسب x_0 برای حالت تراکمی و غیر تراکمی با $V_0 = 1\text{mm/s}$
 ۹۱
- شکل ۸-۳۷: مقایسه تغییرات α بر حسب x_0 برای حالت تراکمی و غیر تراکمی با $V_0 = 1\text{mm/s}$
 ۹۱
- شکل ۸-۳۸: نمودار تغییرات n برای حالت سوم در شرایط تراکم
 ۹۲
- شکل ۸-۳۹: نمودار تغییرات m برای حالت سوم در شرایط تراکم
 ۹۲
- شکل ۸-۴۰: نمودار تغییرات α برای حالت سوم در شرایط تراکم
 ۹۲

شکل ۸-۴۱: مقایسه تغییرات n بر حسب x_0 برای حالت تراکمی و غیر تراکمی با $V_0 = 10mm/s$ ۹۳

شکل ۸-۴۲: مقایسه تغییرات m بر حسب x_0 برای حالت تراکمی و غیر تراکمی با $V_0 = 10mm/s$ ۹۳

شکل ۸-۴۳: مقایسه تغییرات α بر حسب x_0 برای حالت تراکمی و غیر تراکمی با $V_0 = 10mm/s$ ۹۳

مقدمه

مواد نانو ساختار، موادی با دانه‌های ریز هستند که سایز این دانه‌ها در بعضی مواقع از ۱۰۰ نانومتر نیز کوچک‌تر است. این مواد به خاطر خواص ممتاز مکانیکی مانند مقاومت ویژه، قابلیت چکش‌خواری، استحکام شکست، خواص الکتریکی، خواص اپتیکی، خواص مغناطیسی و ... موضوع بسیاری از تحقیقات و پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. تغییر فرم پلاستیک فلزات در دمای اتاق منجر به کاهش اندازه متوسط دانه‌ها می‌شود. بنابراین اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) بر روی فلزات یکی از راه‌های بهبود ساختار مواد می‌باشد.

روش‌های مختلفی برای اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به فورجینگ چندگانه^۱، کرنش پیچشی فشار بالا^۲، نورد پیوسته‌ی متراکم^۳ و فرآیند اکستروژن زاویه‌دار^۴ [۱] اشاره کرد. از میان این روش‌ها، فرآیند اکستروژن زاویه‌دار یکی از مؤثرترین روش‌ها برای تولید مواد با مقاومت ویژه، قابلیت چکش‌خواری و استحکام شکست بالا است. این فرآیند شامل تغییر شکل برشی پلاستیک در یک لایه در حال تغییر فرم در یک شمش به عنوان قطعه کار است. قطعه کار از میان کانال‌های با سطح مقطع برابر و زاویه‌ی مشخص در محل تقاطع عبور کرده و از این رو در این فرآیند ابعاد سطح مقطع قطعه کار تغییر نکرده و ثابت می‌ماند.

اکستروژن زاویه‌دار با کانال‌های برابر (ECAE) به دلیل امکان اعمال کرنش‌های پلاستیک بسیار بالا با تکرار فرآیند در پاس‌های متعدد و بدون هیچ تغییری در سطح مقطع و سایز قطعه به عنوان یکی از مؤثرترین تکنیک‌ها در زمینه تغییر فرم‌های شدید^۵ (SPD) مورد مطالعه و توجه قرار گرفته [۱-۴]. این مطلب باعث گردیده تا چگونگی تغییر فرم پلاستیک و فاکتورهای مؤثر بر این فرآیند به روش‌های متفاوت عملی و اجزاء محدود مورد مطالعه قرار گرفته [۴] و مدل‌های متعددی نیز جهت توصیف کیفیت تغییر فرم پلاستیک و شبیه‌سازی چگونگی اعمال کرنش طی این فرآیند ارائه گردد [۵-۸]. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل برشی^۶ [۶]، مدل فن^۷ [۷] و مدل خطوط سیلان^۸ [۶،۸،۹] اشاره کرد. در این میان مدل خطوط سیلان از انعطاف و انطباق بیشتری با نتایج عملی [۲،۵،۷] و به دست آمده از روش اجزاء محدود [۶،۹] نسبت به دو مدل دیگر برخوردار می‌باشد. این مدل همراه با معادلات خاص خود ابتدا برای قالب ۹۰ درجه [۶]، سپس برای قالب ۱۲۰ درجه [۸] و پس از آن با ارائه

¹ -Multiple forging

² -High pressure torsion (HPT) straining

³ -Accumulated roll bonding (ARB)

⁴ -ECAE

⁵ -Sever Plastic Deformation

⁶ -Shear Model

⁷ -FAN Model

⁸ -Flow Line Model

معادلاتی جامع تر [۹] برای هر زاویه قالبی ارائه گردید. لازم به ذکر است که این مدل با موفقیت در شبیه‌سازی میکرو پلاستیک مواد مختلف مورد استفاده قرار گرفته [۵،۶،۱۱] هرچند که انحرافات نسبت به نتایج عملی نیز مشاهده شده است [۲،۱۲]. در سال‌های اخیر فرم‌های تغییر یافته فرآیند (ECAE) مورد توجه و مطالعه قرار گرفته‌اند. اعمال تغییر در سائز کانال خروجی تحت عنوان اکستروژن زاویه‌دار دار با کانال‌های نابرابر^۱ (NECAE) [۱۳] ارائه گردید و پس از بررسی مبانی تئوریک [۱۴]، به صورت عملی [۱۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. از سویی دیگر فرم تغییر یافته این فرآیند با دو کانال خروجی جانبی برابر^۲ (DECLC) ارائه و به روش کران بالا تحت آنالیز تئوریک قرار گرفت [۱۶]. بررسی متعاقب فرآیند اخیر به روش اجزاء محدود [۱۷] نشان از وجود ناحیه تغییر فرم پلاستیک غیریکنواخت داشته که حاکی از پیچیدگی خاص در نحوه سیلان پلاستیک طی فرآیند تغییر فرم می‌باشد. پیچیدگی مذکور متأثر از شرایط متعددی نظیر سرعت تغییر فرم، نحوه اعمال تغییر فرم، هندسه قالب، اصطکاک و ... می‌باشد که در کارهای قبل [۱۶،۱۷] هیچ یک از موارد مذکور مورد مطالعه و بررسی قرار نگرفته و صرفاً به حالت‌های خاص و بسیار ساده اکتفا شده است. پر واضح است که تأثیر هر یک از موارد مذکور بر روند تغییر فرم پلاستیک در فرآیند اکستروژن زاویه‌دار با دو کانال خروجی باید به تنهایی مورد مطالعه قرار گیرد.

در کار حاضر سرعت تغییر فرم مورد توجه قرار گرفته و تأثیر نسبت سرعت سیلان در کانال‌های ورودی و خروجی بر روند سیلان پلاستیک و چگونگی تغییرات ناحیه تغییر فرم پلاستیک مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این بررسی به روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۳ انجام شده است. در این پایان‌نامه با در نظر گرفتن یک ماده بسیار فرم پذیر مانند آلومینیم خالص تجاری، فرآیند اکستروژن زاویه‌دار با دو کانال خروجی جانبی در نسبت‌های متفاوت سرعت سیلان در کانال‌های ورودی و خروجی شبیه‌سازی شده و ایجاد اختلاف در سرعت کانال‌ها به دو صورت متقارن و نامتقارن اعمال گردید. در حالت متقارن با حفظ نسبت برابر در سرعت تعادلی سیلان در کانال‌های خروجی اندازه آن‌ها نسبت به سرعت سیلان در کانال ورودی تغییر کرد و در حالت نامتقارن نسبت متفاوت بین سرعت در کانال‌های خروجی نیز مد نظر قرار گرفت. در تمامی مطالعات از سرعت‌های ثابت و بدون شتاب استفاده شد. بدیهی است سایر فاکتورهای مؤثر در تغییر فرم، ثابت فرض شدند. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود در هر یک از حالت‌ها توسط مدل خطوط سیلان بررسی شده و کلیه متغیرهای مرتبط با پلاستیسیته فرآیند، مورد آنالیز قرار گرفت. نهایتاً چگونگی و روند تأثیر سرعت سیلان بر این متغیرها و در نتیجه بر روند تغییرات ناحیه تغییر فرم پلاستیک ارائه شد.

^۱ -Non Equal Channel Angular Extrusion

^۲ -Dual Equal Channel Lateral Extrusion

^۳ -Abaqus

۱ فصل اول: فرآیند اکستروژن زاویه‌دار

۱-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) به خاطر خواص فیزیکی و مکانیکی منحصربه‌فردی که در ماده ایجاد می‌کند، مورد توجه دانشمندان و مهندسان بسیاری قرار گرفته است. اگرچه روش‌های نسبتاً ساده‌تر فرم دهی مانند اکستروژن و فورجینگ نیز می‌توانند تا حدودی خواص مکانیکی مواد را بهبود ببخشند [۱۸].

فرآیندهایی که تغییر فرم پلاستیک شدیدی را به نمونه اعمال می‌کنند می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش‌های معمول تغییر فرم برای تشکیل مواد با ساختار ریز باشند. از جمله فرآیندهای تغییر فرم پلاستیک شدید می‌توان به تغییر شکل پیچشی شدید^۱، اکستروژن زاویه‌دار (ECAE)، فرزکاری مکانیکی^۲ اشاره کرد. این سه فرآیند از ویژگی‌های مشترکی برخوردار می‌باشند که آن‌ها را به عنوان روش‌های تغییر فرم پلاستیک شدید معرفی می‌کند. از جمله ویژگی فرآیندهای ذکرشده این است که اولاً می‌توانند بدون ایجاد ترک و آسیب‌های مکانیکی تغییر فرم شدیدی را به قطعه کار اعمال کنند. دوماً این فرآیندها می‌توانند دانه‌های فوق‌العاده ریز در کل حجم نمونه تغییر فرم یافته ایجاد کنند. در این فرآیندها توزیع اندازه دانه‌ها دارای همگنی قابل قبولی است. هر کدام از این فرآیندها دارای مزایا و محدودیت‌های مخصوص به خود هستند. این فرآیندها هرگاه به طور مناسب مورد استفاده قرار گیرند تکنیک‌های بسیار مؤثری برای اعمال تغییر فرم پلاستیک شدید می‌باشند. استفاده از فرآیندهای تغییر فرم پلاستیک شدید برای تولید مواد با ساختار ریز در فلزات و آلیاژهای مختلف موجب شده تا خواص مکانیکی نظیر استحکام و سختی بهبود یابد؛ که در نتیجه فرصت‌های جدیدی را برای کاربرد مواد در زمینه‌هایی فراهم کرد که قبلاً تصور نامناسبی در مورد آن‌ها وجود داشت.

¹ -Sever Torsion Deformation

² -mechanical milling

اما از میان فرآیندهای ذکر شده فرآیند ECAE بیشتر مورد توجه قرار گرفته که از عمده دلایل آن می‌توان به سادگی و کم هزینه بودن فرآیند، عدم تغییر در ابعاد نمونه و قابلیت تکرار آن به میزان دلخواه اشاره کرد. فرآیند اکستروژن زاویه‌دار تکنیکی است که یک فلز یا آلیاژ را از طریق فرآیند برش خالص تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار می‌دهد. در این فرآیند تغییر در ابعاد خارجی و سطح مقطع فلز اتفاق نمی‌افتد.

این فرآیند در سال ۱۹۷۲ توسط آقای سگال^۱ اختراع و نخستین بار در سال ۱۹۷۴ تشریح شد. آقای سگال و همکارانشان اولین کارها را در زمینه فرآیند اکستروژن زاویه‌دار در دهه ۸۰ شروع کردند. در آن کارها هدف وارد کردن کرنش پلاستیک شدید به مواد بدون تغییر در سطح مقطع بود. پس از آن دیده شد که تغییر شکل پلاستیک شدید در تغییر ساختار دانه‌های مواد و بهبود خواص مکانیکی مؤثر است. تا قبل از استفاده از فرآیند اکستروژن زاویه‌دار از فرآیندهای دیگری نظیر نورد^۲، فورجینگ^۳ و اکستروژن^۴ برای اعمال تغییر فرم پلاستیک به فلزات استفاده می‌شد. این فرآیندها بر خلاف فرآیند اکستروژن زاویه‌دار موجب تغییر در سطح مقطع قطعه کار می‌شدند [۱۹].

آقای سگال با استفاده از فرآیند اکستروژن زاویه‌دار نشان داد که تغییر شکل پلاستیک شدید می‌تواند بدون تغییر در سطح مقطع به قطعه کار اعمال شود.

در اوایل دهه ۹۰ این فرآیند توسعه بیشتری پیدا کرد و به عنوان یک روش مؤثر اعمال تغییر فرم پلاستیک شدید برای به دست آوردن مواد با ساختار ریز به‌کاربرده برده شد. در اواسط دهه ۹۰ تحقیقات بر روی فرآیند اکستروژن زاویه‌دار همزمان با توجه و علاقه‌مندی بیشتر به مواد ریز ساختار توسعه پیدا کرد. از آن زمان به بعد گزارش‌های متعددی از پردازش طیف گسترده‌ای از مواد به وسیله فرآیند اکستروژن زاویه‌دار برای بهبود ساختار مواد و افزایش و بهبود خواص مکانیکی ارائه شد.

در سال‌های اخیر مدل‌سازی و آنالیز المان محدود این فرآیند و همچنین توسعه فرآیند با اعمال تغییرات در هندسه و قالب‌ها مورد توجه قرار گرفته است. توسعه فرآیند اکستروژن زاویه‌دار از زمان معرفی آن در حدود ۴۱ سال قبل رشد کرده و بر مطالعات تئوری و کارهای عملی افزوده شده است. اما با این وجود هنوز تحقیقات بیشتری در این رابطه مورد نیاز می‌باشد.

¹ -Segal

² -Rolling

³ -Forging

⁴ -Extrusion