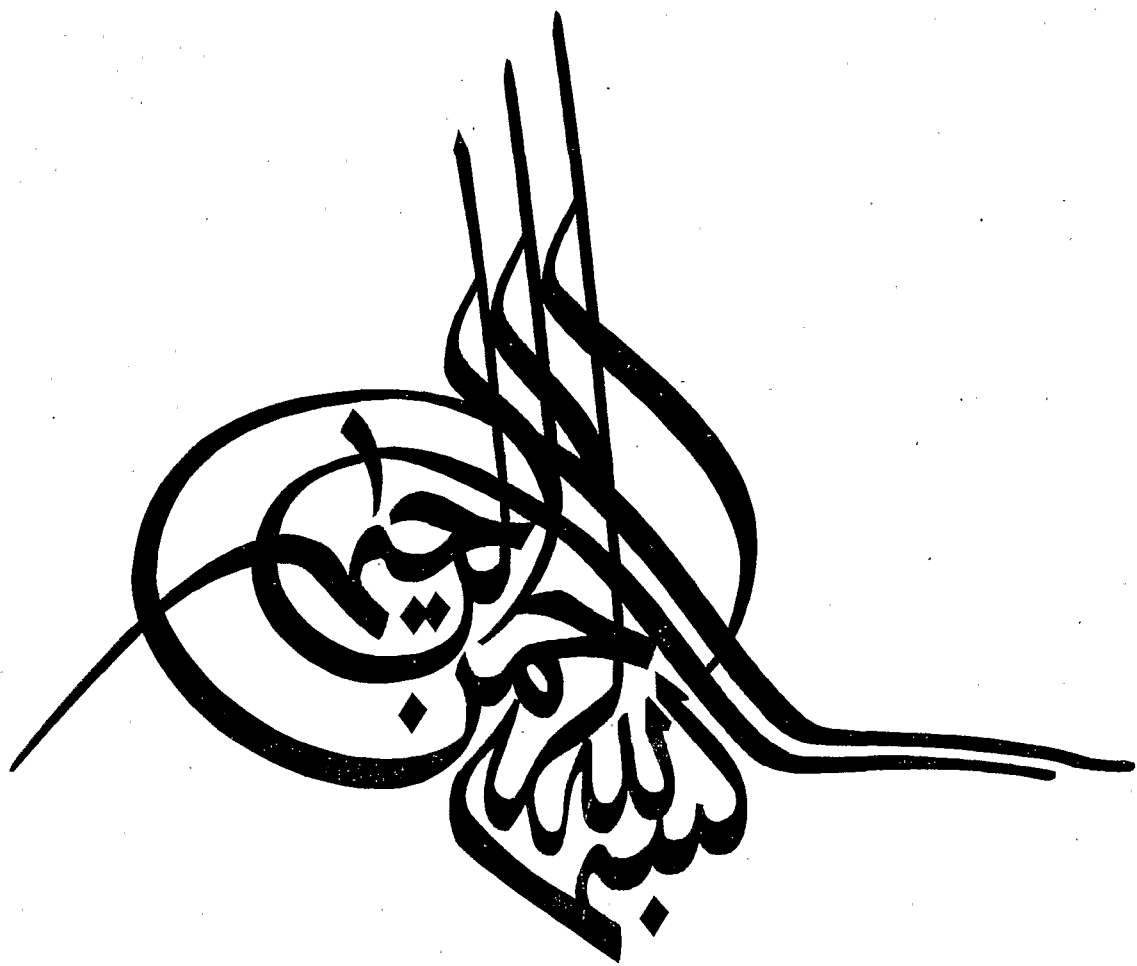


۱۷/۱/۸۱  
۱۷/۲۲



۱۷/۲۲



دانشگاه بوعلی سینا

دانشگاه بوعلی سینا  
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک طراحی کاربردی

عنوان:

مطالعه تجربی و عددی تأثیر پروفیل قالب در اکستروژن  
مستقیم دوار

استاد راهنما:

دکتر فرامرز فرشته صنیعی

پژوهشگر:

مهدی نیک نام رهقی

۱۳۸۷ / ۱۰ / ۱۳

تیر ۱۳۸۷

۱۰۸۶۷۶

پروفیسر صاحبزادہ محمد رفیع صاحب  
پروفیسر صاحبزادہ محمد رفیع صاحب

## تقدیر و تشکر

در ابتدا خداوند را شاکرم که لطفش شامل حال من شد تا بتوانم این تحقیق را به سرانجام برسانم. حمایت خانواده‌ام به ویژه پدر و مادرم و راهنمایی‌هایشان در طول زندگی‌م همیشه راه‌گشای مشکلاتم بوده و در این تحقیق نیز باعث شد در مواردی که به مشکلاتی برخورد می‌کنم با اعتماد به نفس تصمیم بگیرم که اکنون به خوبی عمق راهنمایی‌هایشان را درک می‌کنم، دستشان را می‌بوسم و امیدوارم سایه محبتشان همیشه بالای سر من، برادران و خواهرانم باشد.

از اساتید گروه مکانیک مخصوصاً جناب آقای دکتر فرامرز فرشته‌سنیعی به خاطر تمام زحمات و راهنمایی‌هایشان در طول تحصیل و مراحل مختلف انجام پایان‌نامه کمال تشکر و قدردانی را دارم. هم‌پاری و کمک مهندس محمدمهدی امیری و مهندس حامد حاجی‌حیدری از این دو عزیز در ذهن من دوستانی دلسوز و همیشگی تداعی می‌کند، امیدوارم که همیشه شاد و موفق باشند.

در این دوره با دوستانی آشنا شدم که ارتباط با این عزیزان باعث پیشرفت علمی و اخلاقی من شده است که لازم می‌دانم از این عزیزان که در ادامه نام می‌برم به خاطر دلگرمی و امیدبخشی به اینجانب در طول مدت تحقیق سپاس‌گزاری کنم.

آقایان:

احمد معظمی‌گودرزی، پیمان خادمی‌سنگانی، سیدایمان چوپچیان، حسین عتیق‌پور، سعید داودآبادی، مهدی هدایت‌پور، مهدی محمدی، بهنام میری‌پور، پیمان لشگری، علیرضا صانعی‌فرد، علیرضا احمدخانی، امیر مسعود صالحی، مهدی سلیمانی‌راد، محمد مصدق‌زاد، محمدرضا آرش، رحمت‌ا... خانی، محمود عزیزی و حسن نوربخش.

|   |                     |
|---|---------------------|
| نام خانوادگی: نیک نام رهقی  | نام: مهدی           |
| عنوان پایان نامه: مطالعه تجربی و عددی تأثیر پروفیل قالب در اکستروژن مستقیم دوار   |                     |
| استاد راهنما: فرامرز فرشته صنیعی  |                     |
| مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد  | رشته: مهندسی مکانیک |
| گرایش: طراحی کاربردی  |                     |
| دانشگاه: بوعلی سینا   | دانشکده: مهندسی     |
| تاریخ دفاعیه: ۱۳۸۷/۴/۲۵   | تعداد صفحات: ۱۸۰    |
| کلید واژه‌ها: شبیه‌سازی فیزیکی، ماده مدل، اکستروژن مستقیم، پروفیل قالب، اصطکاک.   |                     |
| چکیده:  |                     |
| <p>اکستروژن به عنوان یک فرآیند حجمی شکل‌دادن فلزات که در آن قطعه‌کار از یک روزنه با سطح مقطع کوچکتر از قطعه‌کار عبور داده شده و به شکل دلخواه در می‌آید، برای تولید محصولی طولی ولی با سطح مقطعی کوچکتر از سطح مقطع قطعه‌کار اولیه استفاده می‌گردد.</p> <p>از جمله تحلیل‌های مهم در فرآیند اکستروژن، برآورد نیروی شکل‌دهی می‌باشد. نیروی شکل‌دهی فلزات، یک پارامتر بسیار مهم است که با پیش‌بینی صحیح آن، ظرفیت ماشین شکل‌دهی مشخص می‌گردد. یکی از عوامل مؤثر در نیروی شکل‌دهی، پروفیل قالب اکستروژن است. برای یک قطعه‌کار و محصول مشخص، با استفاده از قالب‌های گوناگون، نیروی شکل‌دهی و کیفیت محصول از نظر یکنواختی در خواص مکانیکی، متفاوت خواهد شد.</p> <p>در این تحقیق با استفاده از روش تعادل نیروها یا قاچی برای قالب با پروفیل سینوسی، خطی و نمایی نیرو در قالب تعیین شده است. سپس پارامترهای هندسی قالب برای حداقل کردن نیرو در قالب محاسبه شده‌اند. در ادامه به کمک آزمایش‌های مدل با استفاده از ماده سرب، منحنی نیرو-تغییر مکان برای قالب‌های سینوسی، مخروطی و نمایی در شرایط اصطکاکی متفاوت به دست آمده و مورد مقایسه قرار گرفته است.</p> <p>برای بررسی نحوه توزیع کرنش، الگوی سیلان فلز و خطوط هم کرنش از شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است و در نهایت مقایسه منحنی نیرو-جابجایی در سه روش آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که نتایج این سه روش تطابق نسبتاً خوبی با هم دارند. همچنین مقدار نیروی حداکثر در قالب سینوسی نسبت به قالب‌های دیگر کمتر می‌باشد.</p> |                     |

همه امتیازهای این پایان نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد و در صورت استفاده تمام یا بخشی از مطالب پایان نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها باید نام دانشگاه بوعلی سینا (یا استاد راهنمای پایان نامه) و نام دانشجو با ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

## فهرست مطالب

| صفحه | عنوان                                     |
|------|---|
|      | فصل اول: فرآیند اکستروژن                  |
| ۲    | ۱-۱- مقدمه.....                           |
| ۲    | ۲-۱- تعریف اکستروژن.....                  |
| ۳    | ۳-۱- طبقه بندی فرآیند اکستروژن.....       |
| ۴    | ۴-۱- اکستروژن بیلت روی بیلت.....          |
| ۶    | ۵-۱- علم مکانیک اکستروژن.....             |
| ۶    | ۱-۵-۱- تغییر شکل پلاستیک و سیلان فلز..... |
| ۸    | ۲-۵-۱- ضخامت انتهایی.....                 |
| ۹    | ۳-۵-۱- کرنش پلاستیک و نرخ کرنش.....       |
| ۹    | ۴-۵-۱- مدل های اصطکاک.....                |
| ۱۱   | ۵-۵-۱- فشار اکستروژن.....                 |
| ۱۳   | ۶-۱- اثر متغیرهای اصلی روی اکستروژن.....  |
| ۱۴   | ۱-۶-۱- نسبت اکستروژن.....                 |
| ۱۴   | ۲-۶-۱- دمای اکستروژن.....                 |
| ۱۵   | ۳-۶-۱- سرعت اکستروژن.....                 |
| ۱۵   | ۴-۶-۱- تنش سیلان ماده.....                |
| ۱۶   | ۷-۱- معرفی پایان نامه حاضر.....           |

## فصل دوم: تحلیل فرآیندهای شکل دهی

- ۱۸ ..... ۱-۲- مقدمه
- ۱۹ ..... ۲-۲- روش‌های نظری تحلیل مسائل شکل دهی
- ۲۰ ..... ۱-۲-۲- تحلیل حد بالایی فرآیند اکستروژن
- ۲۲ ..... ۲-۲-۲- تحلیل اکستروژن مستقیم میله به روش حد بالایی
- ۲۶ ..... ۳-۲- تحلیل فرآیندهای شکل دهی به روش‌های عددی
- ۲۷ ..... ۱-۳-۲- روش عددی المان محدود
- ۳۱ ..... ۲-۳-۲- روش عددی حجم محدود
- ۳۴ ..... ۳-۳-۲- مطالعات اخیر در مورد فرآیند اکستروژن به روش عددی
- ۳۵ ..... ۴-۲- تحلیل فرآیندهای شکل دهی به روش تجربی
- ۳۵ ..... ۱-۴-۲- مطالعه الگوهای جریان در فرآیند اکستروژن
- ۳۷ ..... ۲-۴-۲- محاسبه کرنش با استفاده از روش پلاستیسیته مشاهده‌ای

## فصل سوم: بهینه کردن پروفیل قالب اکستروژن

- ۴۱ ..... ۱-۳- مقدمه
- ۴۲ ..... ۲-۳- روش‌های طراحی قالب
- ۴۳ ..... ۱-۲-۳- طراحی قالب بر اساس مفهوم نرخ تغییر شکل
- ۴۷ ..... ۲-۲-۳- طراحی قالب به وسیله روش تعادل نیروها
- ۵۰ ..... ۳-۲-۳- روش‌های دیگر تعیین پروفیل بهینه قالب
- ۵۱ ..... ۳-۳- به دست آوردن پروفیل سینوسی بهینه به روش تعادل نیروهای نمودی
- ۵۲ ..... ۱-۳-۳- پروفیل مورد نظر برای شبیه سازی فیزیکی



|    |  |
|----|--|
| ۵۳ | ..... ۲-۳-۳- روش تعادل نیروها                            |
| ۵۶ | ..... ۳-۳-۳- بررسی معیار فون مایزرز و ترسکا              |
| ۵۸ | ..... ۴-۳-۳- بهینه کردن ضریب $A$                         |
| ۵۹ | ..... ۵-۳-۳- پروفیل‌های مورد استفاده در شبیه سازی فیزیکی |
| ۶۰ | ..... ۴-۳- اصول شبیه‌سازی فیزیکی فرآیندهای شکل‌دهی       |

### فصل چهارم: آزمایش‌های اکستروژن مستقیم میله

|    |  |
|----|--|
| ۶۳ | ..... ۱-۴- مقدمه                           |
| ۶۶ | ..... ۲-۴- آزمایش‌های مقدماتی              |
| ۶۶ | ..... ۱-۲-۴- تعیین منحنی تنش-کرنش مواد     |
| ۶۹ | ..... ۲-۲-۴- تعیین ضرائب اصطکاک            |
| ۷۱ | ..... ۳-۴- آزمایش‌های اکستروژن مستقیم میله |
| ۷۱ | ..... ۱-۳-۴- پارامترهای مورد بررسی         |
| ۷۲ | ..... ۲-۳-۴- ساخت نمونه‌های آزمایش         |
| ۷۳ | ..... ۳-۳-۴- مجموعه قالب‌های اکستروژن      |
| ۷۵ | ..... ۴-۳-۴- تعیین سرعت کوبه               |
| ۷۷ | ..... ۵-۳-۴- انجام آزمایش‌ها               |
| ۷۸ | ..... ۴-۴- نتایج آزمایش‌ها                 |
| ۷۸ | ..... ۱-۴-۴- بررسی اثر پروفیل قالب         |
| ۸۷ | ..... ۲-۴-۴- بررسی اثر ضریب اصطکاک         |
| ۹۴ | ..... ۳-۴-۴- بررسی اثر طول بیلت            |

۹۹ ..... ۵-۴- بررسی تکرار پذیر بودن آزمایش‌ها.

### فصل پنجم: شبیه‌سازی عددی اکستروژن و مقایسه نتایج روش‌های مختلف

۱۰۱ ..... ۱-۵- مقدمه.

۱۰۲ ..... ۲-۵- شبیه‌سازی عددی.

۱۰۴ ..... ۱-۲-۵- بررسی اثر پارامترها بر نیروی اکستروژن.

۱۰۴ ..... ۱-۱-۲-۵- بررسی اثر پروفیل قالب.

۱۰۶ ..... ۲-۱-۲-۵- بررسی اثر اصطکاک.

۱۰۹ ..... ۳-۱-۲-۵- بررسی اثر طول بیلت.

۱۱۱ ..... ۲-۲-۵- بررسی اثر پارامترها بر الگوی سیلان.

۱۱۱ ..... ۱-۲-۲-۵- اثر پروفیل قالب.

۱۱۲ ..... ۲-۲-۲-۵- اثر اصطکاک.

۱۱۴ ..... ۳-۲-۵- بررسی اثر پارامترها بر توزیع کرنش مؤثر.

۱۱۵ ..... ۱-۳-۲-۵- اثر پروفیل قالب.

۱۱۷ ..... ۲-۳-۲-۵- اثر ضریب اصطکاک.

۱۲۱ ..... ۳-۵- مقایسه نتایج سه روش تحلیلی، عددی و تجربی.

### فصل ششم: خلاصه، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۳۳ ..... ۱-۶- خلاصه.

۱۳۴ ..... ۲-۶- نتیجه‌گیری.

۱۳۷ ..... ۳-۶- پیشنهادها.

## پیوست‌ها

- پیوست(الف): برنامه Matlab مربوط به بهینه کردن ضریب A در پروفیل سینوسی..... ۱۴۰
- پیوست(ب): محاسبات مربوط به بهینه کردن ضریب A در پروفیل سینوسی..... ۱۴۱
- پیوست(پ): نقشه های اجرایی فیکسچر مورد استفاده..... ۱۵۱
- پیوست(ت): برنامه Matlab مربوط به تعیین منحنی نیرو جابجایی به روش تعادل نیروها..... ۱۵۶
- پیوست(ث): منحنی های نیرو-جابجایی حاصل از شبیه سازی عددی برای بررسی اثر پروفیل قالب..... ۱۵۸
- پیوست(ج) مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی به دست آمده از سه روش آزمایشگاهی، عددی و روش تعادل نیروها..... ۱۵۶
- فهرست مراجع..... ۱۷۷

## فهرست شکل‌ها

| صفحه | عنوان  |
|------|--|
| ۴    | شکل ۱-۱- دو نوع اصلی اکستروژن. الف) اکستروژن مستقیم. ب) اکستروژن غیر مستقیم.....   |
| ۵    | شکل ۱-۲- خارج کردن هوا از محفظه در ابتدای فرآیند اکستروژن با استفاده از بیلت مخروطی.....                                 |
| ۵    | شکل ۱-۳- الف) اکستروژن بیلت روی بیلت با استفاده از صفحه تغذیه. ب) اکستروژن بیلت روی بیلت بدون استفاده از صفحه تغذیه..... |
| ۷    | شکل ۱-۴- الگوهای سیلان فلز در فرآیند اکستروژن.....   |
| ۸    | شکل ۱-۵- رابطه بین نسبت اکستروژن و نیم زاویه فلز مرده.....   |
| ۹    | شکل ۱-۶- رابطه بین ضخامت انتهایی و نیم زاویه ناحیه فلز مرده.....   |
| ۱۱   | شکل ۱-۷- الف) مؤلفه‌های اصطکاک در اکستروژن مستقیم. ب) مؤلفه‌های اصطکاک در اکستروژن غیرمستقیم.....                        |
| ۱۲   | شکل ۱-۸- منحنی‌های تجربی فشار اکستروژن در برابر تغییر مکان سمبه در اکستروژن مستقیم و غیر مستقیم.....                     |
| ۱۳   | شکل ۱-۹- نمایش شماتیک کار اضافی.....   |
| ۱۶   | شکل ۱-۱۰- اثر متقابل عوامل مؤثر در فرآیند اکستروژن.....  |
| ۲۳   | شکل ۲-۱- نمای کلی از میدان سرعت کروی مجاز از نظر سینماتیکی.....  |
| ۲۴   | شکل ۲-۲- نیم زاویهٔ مخروط بحرانی نسبت به درصد کاهش شعاع و ضریب برشی اصطکاک.....  |
| ۲۷   | شکل ۲-۳- نمایی از یک قطعه شبکه بندی شده بین ابزار.....   |
| ۲۹   | شکل ۲-۴- روش نیوتن در حل مسائل غیر خطی. الف) واگرایی. ب) همگرایی.....  |
| ۳۸   | شکل ۲-۵- شبکهٔ مستطیلی قبل و بعد از تغییر شکل.....   |
| ۴۶   | شکل ۳-۱- الف) پروفیل قالب برای کشش سیم (CRHS). ب) پروفیل قالب برای اکستروژن میله (CRHS).....                             |
| ۴۸   | شکل ۳-۲- المان بندی روش قاچی برای قالب‌های منحنی شکل.....  |
| ۵۴   | شکل ۳-۳- نحوه تقسیم بندی پروفیل و نمایش تنش‌های وارد بر قاچ $i$ ام.....  |

- شکل ۳-۴- بررسی معیار فون مایز برای تعیین  $\sigma_1, \sigma_3$  ..... ۵۷
- شکل ۳-۵- پروفیل‌های مخروطی، سینوسی و نمایی برای قالب‌های اکستروژن مورد استفاده در آزمایش‌ها ..... ۵۹
- شکل ۴-۱- قالب ریخته‌گری نمونه‌های سربی برای آزمایش‌های اکستروژن و مقدماتی ..... ۶۵
- شکل ۴-۲- نمونه‌های فشار و اکستروژن قبل و بعد از تراشکاری ..... ۶۶
- شکل ۴-۳- نمونه آزمایش فشار قبل (چپ) و بعد از تغییر شکل (راست) ..... ۶۷
- شکل ۴-۴- پارامترهای هندسی نمونه آزمایش فشار برای روش ضریب اصلاح تحدب ..... ۶۸
- شکل ۴-۵- منحنی تنش کرنش سرب به دست آمده با روش ضریب اصلاح تحدب ..... ۶۸
- شکل ۴-۶- نمای پلان حلقه‌های آزمایش شده با استفاده از روانکارهای وازلین+کائولین+کربنات کلسیم، حالت خشک و کربنات کلسیم ..... ۷۰
- شکل ۴-۷- تعیین ضرایب اصطکاک روانکارهای مختلف، با استفاده از منحنی کالیبراسیون عددی برای سرب ..... ۷۰
- شکل ۴-۸- در آزمایش‌های اکستروژن مستقیم میله از بیلت‌های با طول‌های مختلف استفاده شده است ..... ۷۳
- شکل ۴-۹- نقشه ترکیبی مجموعه ابزار برای انجام آزمایش‌های اکستروژن ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۰- مجموعه اکستروژن بین دو فک پرس اینسترون مدل ۴۲۰۸ با ظرفیت ۳۰۰ kN ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۱- قالب‌های اکستروژن مورد استفاده در آزمایش‌های عملی ..... ۷۵
- شکل ۴-۱۲- پارامترهای مورد استفاده در تعیین سرعت کوبه برای آزمایش‌های اکستروژن ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۳- بیلت‌های اکستروژن شده و قسمت مربوط به ناحیه تغییر شکل یافته ..... ۷۸
- شکل ۴-۱۴- اثر پروفیل قالب بر منحنی نیرو-جابجایی برای بیلت با طول ۴۰ میلی‌متر و روانکار وازلین+کائولین+کربنات کلسیم ..... ۷۹
- شکل ۴-۱۵- اثر پروفیل قالب بر منحنی نیرو-جابجایی برای بیلت با طول ۴۰ میلی‌متر و حالت خشک ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۶- اثر پروفیل قالب بر منحنی نیرو-جابجایی برای بیلت با طول ۴۰ میلی‌متر و روانکار کربنات کلسیم ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۷- اثر پروفیل قالب بر منحنی نیرو-جابجایی برای بیلت با طول ۳۵ میلی‌متر و روانکار وازلین+کائولین+کربنات کلسیم ..... ۸۱

- شکل ۴-۱۸- اثر پروفیل قالب بر منحنی نیرو-جابجایی برای بیلت با طول ۳۵ میلی‌متر و حالت خشک..... ۸۱
- شکل ۴-۱۹- اثر پروفیل قالب بر منحنی نیرو-جابجایی برای بیلت با طول ۳۵ میلی‌متر و روانکار کربنات کلسیم..... ۸۲
- شکل ۴-۲۰- اثر پروفیل قالب بر منحنی نیرو-جابجایی برای بیلت با طول ۳۰ میلی‌متر و روانکار وازلین+کائولین+کربنات کلسیم..... ۸۲
- شکل ۴-۲۱- اثر پروفیل قالب بر منحنی نیرو-جابجایی برای بیلت با طول ۳۰ میلی‌متر و حالت خشک..... ۸۳
- شکل ۴-۲۲- اثر پروفیل قالب بر منحنی نیرو-جابجایی برای بیلت با طول ۳۰ میلی‌متر و روانکار کربنات کلسیم..... ۸۳
- شکل ۴-۲۳- اثر ضریب اصطکاک بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب نمایی و بیلت با طول ۴۰ میلی‌متر..... ۸۷
- شکل ۴-۲۴- اثر ضریب اصطکاک بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب مخروطی و بیلت با طول ۴۰ میلی‌متر..... ۸۸
- شکل ۴-۲۵- اثر ضریب اصطکاک بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب سینوسی و بیلت با طول ۴۰ میلی‌متر..... ۸۸
- شکل ۴-۲۶- اثر ضریب اصطکاک بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب نمایی و بیلت با طول ۳۵ میلی‌متر..... ۸۹
- شکل ۴-۲۷- اثر ضریب اصطکاک بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب مخروطی و بیلت با طول ۳۵ میلی‌متر..... ۸۹
- شکل ۴-۲۸- اثر ضریب اصطکاک بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب سینوسی و بیلت با طول ۳۵ میلی‌متر..... ۹۰
- شکل ۴-۲۹- اثر ضریب اصطکاک بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب نمایی و بیلت با طول ۳۰ میلی‌متر..... ۹۰
- شکل ۴-۳۰- اثر ضریب اصطکاک بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب مخروطی و بیلت با طول ۳۰ میلی‌متر..... ۹۱
- شکل ۴-۳۱- اثر ضریب اصطکاک بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب سینوسی و بیلت با طول ۳۰ میلی‌متر..... ۹۱
- شکل ۴-۳۲- اثر طول بیلت بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب نمایی و حالت خشک..... ۹۴
- شکل ۴-۳۳- اثر طول بیلت بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب مخروطی و حالت خشک..... ۹۵
- شکل ۴-۳۴- اثر طول بیلت بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب سینوسی و حالت خشک..... ۹۵
- شکل ۴-۳۵- اثر طول بیلت بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب نمایی و روانکار وازلین+کائولین+کربنات کلسیم..... ۹۶
- شکل ۴-۳۶- اثر طول بیلت بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب مخروطی و روانکار وازلین+کائولین+کربنات کلسیم..... ۹۶
- شکل ۴-۳۷- اثر طول بیلت بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب سینوسی و روانکار وازلین+کائولین+کربنات کلسیم..... ۹۷

- شکل ۴-۳۸- اثر طول بیلت بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب نمایی و روانکار کربنات کلسیم..... ۹۷
- شکل ۴-۳۹- اثر طول بیلت بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب مخروطی و روانکار کربنات کلسیم..... ۹۸
- شکل ۴-۴۰- اثر طول بیلت بر منحنی نیرو-جابجایی در قالب سینوسی و روانکار کربنات کلسیم..... ۹۸
- شکل ۴-۴۱- آزمایش مربوط به بررسی تکرار پذیری نتایج..... ۹۹
- شکل ۵-۱- اثر پروفیل قالب بر نیروی اکستروژن با ضریب اصطکاک  $0/1$  و طول بیلت ۳۵ میلی‌متر..... ۱۰۵
- شکل ۵-۲- اثر پروفیل قالب بر نیروی اکستروژن با ضریب اصطکاک  $0/4$  و طول بیلت ۳۵ میلی‌متر..... ۱۰۵
- شکل ۵-۳- اثر پروفیل قالب بر نیروی اکستروژن با ضریب اصطکاک  $0/55$  و طول بیلت ۳۵ میلی‌متر..... ۱۰۶
- شکل ۵-۴- اثر ضریب اصطکاک بر نیروی اکستروژن در پروفیل نمایی و طول بیلت ۳۵ میلی‌متر..... ۱۰۷
- شکل ۵-۵- اثر ضریب اصطکاک بر نیروی اکستروژن در پروفیل مخروطی و طول بیلت ۳۵ میلی‌متر..... ۱۰۷
- شکل ۵-۶- اثر ضریب اصطکاک بر نیروی اکستروژن در پروفیل سینوسی و طول بیلت ۳۵ میلی‌متر..... ۱۰۸
- شکل ۵-۷- اثر طول بیلت بر نیروی اکستروژن در پروفیل نمایی و ضریب اصطکاک  $0/4$ ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۸- اثر طول بیلت بر نیروی اکستروژن در پروفیل مخروطی و ضریب اصطکاک  $0/4$ ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۹- اثر طول بیلت بر نیروی اکستروژن در پروفیل سینوسی و ضریب اصطکاک  $0/4$ ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۰- اثر پروفیل قالب بر الگوی سیلان در ضریب اصطکاک  $0/4$  (الف) قالب نمایی (ب) قالب مخروطی (پ) قالب سینوسی..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۱- اثر ضریب اصطکاک بر الگوی سیلان در پروفیل نمایی (الف)  $m = 0/1$  (ب)  $m = 0/4$  (پ)  $m = 0/55$ ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۲- اثر ضریب اصطکاک بر الگوی سیلان در پروفیل مخروطی (الف)  $m = 0/1$  (ب)  $m = 0/4$  (پ)  $m = 0/55$ ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۳- اثر ضریب اصطکاک بر الگوی سیلان در پروفیل سینوسی (الف)  $m = 0/1$  (ب)  $m = 0/4$  (پ)  $m = 0/55$ ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۱۴- اثر پروفیل قالب بر توزیع کرنش مؤثر در ضریب اصطکاک  $0/4$  (الف) قالب نمایی (ب) قالب مخروطی (پ) قالب سینوسی..... ۱۱۶
- شکل ۵-۱۵- اثر ضریب اصطکاک بر کرنش مؤثر در پروفیل نمایی (الف)  $m = 0/1$  (ب)  $m = 0/4$  (پ)  $m = 0/55$ ..... ۱۱۸

- شکل ۵-۱۶- اثر ضریب اصطکاک بر کرنش مؤثر در پروفیل مخروطی (الف)  $m = 0/1$  (ب)  $m = 0/4$  (پ)  $m = 0/55$ . ۱۱۹
- شکل ۵-۱۷- اثر ضریب اصطکاک بر کرنش مؤثر در پروفیل سینوسی (الف)  $m = 0/1$  (ب)  $m = 0/4$  (پ)  $m = 0/55$ . ۱۲۰
- شکل ۵-۱۸- مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان سه روش تحلیل برای قالب نمایی، طول بیلت ۳۵ میلی‌متر و  $m = 0/55$ . ۱۲۳
- شکل ۵-۱۹- مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان سه روش تحلیل برای قالب مخروطی، طول بیلت ۳۵ میلی‌متر و  $m = 0/55$ . ۱۲۴
- شکل ۵-۲۰- مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان سه روش تحلیل برای قالب سینوسی، طول بیلت ۳۵ میلی‌متر و  $m = 0/55$ . ۱۲۴
- شکل ۵-۲۱- مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان سه روش تحلیل برای قالب نمایی، طول بیلت ۳۵ میلی‌متر و  $m = 0/4$ . ۱۲۵
- شکل ۵-۲۲- مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان سه روش تحلیل برای قالب مخروطی، طول بیلت ۳۵ میلی‌متر و  $m = 0/4$ . ۱۲۵
- شکل ۵-۲۳- مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان سه روش تحلیل برای قالب سینوسی، طول بیلت ۳۵ میلی‌متر و  $m = 0/4$ . ۱۲۶
- شکل ۵-۲۴- مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان سه روش تحلیل برای قالب نمایی، طول بیلت ۳۵ میلی‌متر و  $m = 0/1$ . ۱۲۶
- شکل ۵-۲۵- مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان سه روش تحلیل برای قالب مخروطی، طول بیلت ۳۵ میلی‌متر و  $m = 0/1$ . ۱۲۷
- شکل ۵-۲۶- مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان سه روش تحلیل برای قالب سینوسی، طول بیلت ۳۵ میلی‌متر و  $m = 0/1$ . ۱۲۷



## فهرست جدول‌ها

| صفحه | عنوان   |
|------|---|
| ۵۸   | جدول ۳-۱- محاسبات مربوط به بهینه کردن ضریب A در پروفیل سینوسی.....  |
| ۶۴   | جدول ۴-۱- ترکیب سرب مورد استفاده در آزمایش‌ها.....  |
| ۷۲   | جدول ۴-۲- حروف اختصاری پروفیل قالب‌ها.....  |
| ۷۲   | جدول ۴-۳- حروف اختصاری روانکارها.....   |
| ۷۷   | جدول ۴-۴- سرعت کوبه برای قالب‌های مورد استفاده.....   |
| ۸۵   | جدول ۴-۵- اثر پروفیل قالب در کاهش یا افزایش نیروی اکستروژن در روانکارها و طول بیلت مختلف.....   |
| ۹۳   | جدول ۴-۶- اثر روانکار در کاهش یا افزایش نیروی اکستروژن در قالب و طول بیلت مختلف.....  |
| ۱۲۱  | جدول ۵-۱- مقادیر کرنش مؤثر در ضریب‌های اصطکاک و پروفیل‌های قالب مختلف.....  |
| ۱۲۱  | جدول ۵-۲- درصد تغییرات کرنش حداکثر نسبت به ضرایب اصطکاکی مختلف در قالب‌های نمایی، مخروطی و سینوسی.....  |
| ۱۲۹  | جدول ۵-۳- مقادیر نیروی حداکثر در سه روش آزمایشگاهی، عددی، تعادل نیروها و درصد خطای روش عددی و تعادل نیروها نسبت به روش آزمایشگاهی و درصد خطای روش تعادل نیروها نسبت به روش عددی در پروفیل نمایی.....  |
| ۱۳۰  | جدول ۵-۴- مقادیر نیروی حداکثر در سه روش آزمایشگاهی، عددی، تعادل نیروها و درصد خطای روش عددی و تعادل نیروها نسبت به روش آزمایشگاهی و درصد خطای روش تعادل نیروها نسبت به روش عددی در پروفیل مخروطی..... |
| ۱۳۱  | جدول ۵-۵- مقادیر نیروی حداکثر در سه روش آزمایشگاهی، عددی، تعادل نیروها و درصد خطای روش عددی و تعادل نیروها نسبت به روش آزمایشگاهی و درصد خطای روش تعادل نیروها نسبت به روش عددی در پروفیل سینوسی..... |

## فصل اول

### فرآیند اکستروژن

---

## ۱-۱- مقدمه

صنعت اکستروژن قدمتی بیش از صد سال دارد. در دانشگاه‌ها، در رشته ساخت و تولید، کتاب‌هایی مانند مرجع [۱] تدریس می‌شود که کتاب مذکور، اصول و مبانی فرآیندهای ساخت، شامل برش فلزات، نورد، آهنگری، کشش و اکستروژن را پوشش می‌دهد. اما مهندسان، اطلاعات مشتمل بر تمام جزئیات را در دانشگاه‌ها دریافت نمی‌کنند. لذا برای به روز کردن دانش فرآیند اکستروژن و دیگر فرآیندها، کمیته‌های صنعتی و دانشگاهی، هر دو باید همکاری مداوم با هم داشته باشند و شبیه سازی‌های فیزیکی در کمیته‌های دانشگاهی برای اطمینان از بررسی‌های تحلیلی انجام شود [۲].

در فصل اول این مطالعه، توضیحاتی درباره مبانی اکستروژن آورده شده است، که شامل توضیح فرآیند اکستروژن، انواع مختلف آن و نیز پارامترها و اثر آنها بر روی فرآیند اکستروژن می‌باشد.

## ۱-۲- تعریف اکستروژن

اکستروژن یک فرآیند تغییر شکل پلاستیک است که بیلت با فشار از یک روزنه کوچکتر از سطح مقطع بیلت اولیه عبور داده می‌شود. در این فرآیند تغییر شکل توسط فشار غیر مستقیم<sup>۱</sup> انجام می‌شود. فشار غیرمستقیم به وسیله عکس العمل قطعه‌کار با محفظه<sup>۲</sup> و قالب ایجاد می‌شود. عکس‌العمل بیلت با محفظه و قالب، منجر به تنش‌های فشاری بزرگی می‌شود که در کاهش ترک خوردن بیلت بسیار مؤثر است [۳].

اکستروژن بهترین شیوه برای شکست<sup>۳</sup> ساختار ریخته‌گری بیلت است زیرا بیلت فقط تحت تأثیر نیروهای فشاری قرار می‌گیرد. با توجه به آلیاژ و روش مورد استفاده، فرآیند اکستروژن می‌تواند به صورت داغ یا سرد انجام شود. در اکستروژن داغ، برای آسانتر کردن تغییر شکل پلاستیک، بیلت پیش گرم می‌شود [۲].

1- Indirect\_Compression  
2- Container  
3- Breaking Down

## ۳-۱- طبقه بندی فرآیند اکستروژن

عموماً از اکستروژن برای تولید میله‌های توپر و استوانه‌ای سوراخ‌دار یا تیوپ‌ها استفاده می‌گردد. اما شکل‌هایی که دارای مقاطع نامنظم هستند از فلزاتی مانند آلومینیوم که قابلیت اکستروژن شدن بالاتری دارند تولید می‌گردند. این امر به این دلیل می‌باشد که برای اکستروژن محصولات، نیروی زیادی لازم می‌باشد. بیشتر فلزات به صورت داغ اکستروژن می‌گردند چرا که در این حالت مقاومت تغییر شکل فلز پایین می‌باشد. با این حال اکستروژن سرد نیز برای خیلی از فلزات امکان‌پذیر بوده و به عنوان یک فرآیند تجاری مهم شناخته شده است. یکی از مهم‌ترین دلایلی که سبب افزایش تمایل به استفاده از اکستروژن برای شکل‌دهی فلزات می‌گردد این است که هر چند نیروی لازم برای شکل‌دهی فلز در این روش زیاد می‌باشد، ولی با استفاده از اکستروژن داغ برای فلزاتی مانند فولاد، آلیاژهای نیکل و فلزات با دمای ذوب بالا به آسانی و با صرف نیروی کمتر می‌توان به شکل دلخواه دست یافت [۲].

دو نوع اصلی اکستروژن عبارتند از: اکستروژن مستقیم<sup>۱</sup> و غیرمستقیم<sup>۲</sup> که به آن اکستروژن معکوس یا بازگشتی نیز می‌گویند. شکل (۱-۱-الف) فرآیند اکستروژن مستقیم را نشان می‌دهد. قطعه کار فلزی در محفظه قرار داده شده و به وسیله سمبه داخل قالب حرکت داده می‌شود. یک بلوک مجازی در انتهای سمبه تعبیه شده که در تماس با قطعه کار می‌باشد. در شکل (۱-۱-ب) فرآیند اکستروژن غیرمستقیم نمایش داده شده است. در اکستروژن غیرمستقیم، قالب در جلوی قسمت انتهایی کوبه توخالی قرار دارد و نسبت به محفظه حرکت می‌کند، ولی تغییر مکان نسبی بین بیلت و محفظه وجود ندارد. به این دلیل که هیچ حرکت نسبی بین دیواره محفظه و قطعه کار در اکستروژن غیرمستقیم وجود ندارد، نیروهای اصطکاکی کمتر بوده و در نتیجه نیروهای لازم برای اکستروژن در حالت غیرمستقیم از اکستروژن مستقیم کمتر می‌باشد. اما در فرآیند اکستروژن غیرمستقیم یک سری محدودیت‌های اجرایی وجود دارد چرا که با استفاده از سمبه سوراخ‌دار، نیروهای اعمالی محدود

1- Direct Extrusion

2- Indirect Extrusion