# دانشگاه تهران

دانشکده فنی- گروه مهندسی مکانیک

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تاریخ ثبت ۱۳۸۲/۱/۲۰

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک- گرایش طراحی کاربردی

موضوع:

## تحلیل اکستروژن سه بعدی مقاطع پیچیده

استاد راهنما:

آقای دکتر کارن ابری نیا

نگارش:

حمید زارع بغدادآبادی

بهمن ۱۳۸۱

۴۵۹۸۰

دانشگاه تهران

دانشکده فنی- گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک- گرایش طراحی کاربردی

موضوع:

# تحلیل اکستروژن سه بعدی مقاطع پیچیده

نگارش:حمید زارع بغدادآبادی

**از این پایان‌نامه در تاریخ ۱۳۸۱/۱۱/۱۹ در مقابل هیئت داوران دفاع به عمل آمد و مورد تصویب قرار گرفت.**

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر بهنی هاشمی

مدیر گروه اموزشی: دکتر منصور نیکخواه بهرامی

نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر نصر الله تابنده

استاد راهنما: دکتر کارن ابری نیا

استاد مشاور: دکتر محمد رضا حائری یزدی

استاد مشاور: دکتر سید اسد ا... قاضوی

استاد مدعو: دکتر فرید رضا بیگلری

۴۵۹۸۰

تقدیم به پدر و مادرم و تمامی کسانی که دوستشان دارم

# تشکر و قدردانی

بدینوسیله از استاد عزیزم آقای دکتر کارن ابری‌نیا که در تمام مراحل انجام این پایان‌نامه مرا یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.
همچنین از تمامی کسانی که به نوعی مرا در انجام این پایان‌نامه یاری و راهنمایی نمودند متشکرم.

**تحلیل اکستروژن سه بعدی مقاطع پیچیده**

**توسط: حمید زارع**

**استاد راهنما: دکتر کارن ابری‌نیا**

**رشته: مهندسی مکانیک**

**تاریخ: ۱۳۸۱/۱۱/۱۹**

**چکیده پایان‌نامه کارشناسی ارشد**

اکستروژن مقاطع پیچیده بدون محور تقارن از جمله مسائل شکل دهی فلزات می‌باشد که بسیار مشکل بوده و کمتر مورد تحلیل قرار گرفته است. اغلب حل‌های موجود برای اکستروژن و یا حتی تحلیل‌های کلی ارائه شده قابل توسعه به شکل‌های پیچیده نمی‌باشد.

اساس کار این تئوری بر پایه قضیه حد بالا است. شرایط هندسی قالب و فرض تراکم ناپذیری به گونه‌ای با هم ترکیب می‌شوند که میدان سرعت عمومی‌حاصل شده به طور خودکار از لحاظ سینماتیکی قابل قبول و مجاز باشد. یکی از مشکلات اکستروژن مقاطع پیچیده بوجود آمدن منطقه کور می‌باشد. در این پژوهش میدان تغییر شکل جدیدی در نظر گرفته شده است که با استفاده از آن بوجود آمدن مناطق کور خللی در تحلیل ایجاد نمی‌کند. در این پژوهش یک روش جدید در اکستروژن مقاطع پیچیده ارائه شده است که می‌تواند در اکستروژن سایر شکل‌های پیچیده نیز مورد استفاده قرار گیرد. این روش نتایج بهتری را نسبت به گذشته در بر داشته است و توانایی طراحی قالب‌های پیچیده را نیز دارا می‌باشد.

در روش جدید خطوط جریان هیچ گونه تقاطعی ندارند و فرض شده است که بعضی از نقاط مرزی در سطح مقطع خروجی از نقاط داخل سطح مقطع ورودی تشکیل می‌شود.

فرض جدید در نظر گرفته شده قابل تعمیم به اغلب مقاطع می‌باشد ولی برای بررسی درستی نتایج، حلِ مقطع I با این روش انجام شده است و با نتایج کارهای انجام شده قبلی برای مقطع I مقایسه و بهبود نتایج مشاهده شده است. در ادامه حل یک مقطع خاص با فرض جدید انجام شده است و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است. اثرات تغییر ضریب اصطکاک، درصد کاهش سطح و سرعت اکستروژن روی فشار مورد نیاز برای فرایند به صورت نمودارهایی مورد بررسی قرار گرفته است.

۱. فصل اول : مقدمه ..... ۱

۱-۱- تعریف اکستروژن ..... ۲

۱-۲- تاریخچه اکستروژن ..... ۲

۱-۳- ویژگیها و کاربردهای اکستروژن ..... ۲

۱-۴- مزایا و معایب اکستروژن ..... ۳

۱-۵- روش‌های اکستروژن ..... ٤

۱-۵-۱- اکستروژن مستقیم ..... ٤

۱-۵-۲- اکستروژن غیر مستقیم ..... ٤

۱-۵-۳- اکستروژن هیدرواستاتیک ..... ٦

۲. فصل دوم : پیشینه پژوهش ..... ۷

۳. فصل سوم : تئوری حد بالا و میدان سرعت ..... ۱٦

۳-۱- مقدمه ..... ۱۷

۳-۲- شکل کلی تئوری حد بالا برای مسائل محورتقارن و سه بعدی شکل دهی فلزات ..... ۱۸

۳-۳- میدان تغییر شکل و میدان سرعت سینماتیکی مجاز ..... ۲۰

۳-۳-۱- میدان کلی تغییر شکل ..... ۲۰

۳-۳-۲- تعریف ریاضی میدان تغییر شکل ..... ۲۲

۳-۳-۳- تعریف میدان سرعت ..... ۲۳

۳-۳-٤- سازگاری میدان سرعت و بدست آوردن تابع مجهول $M(u,q,t)$ ..... ۲٤

۳-۴- حد بالای فشار اکستروژن ..... ۳۱

۳-٤-۱- توان تغییر شکل داخلی ..... ۳۱

۳-٤-۲- توان برشی ..... ۳۲

۳-٤-۳- توان اصطکاک ..... ۳۲
۳-٤-٤- فشار کل اکستروژن ..... ۳٤
۳-۵- میدان تغییر شکل با در نظر گرفتن قالب خطی ..... ۳٤
۴. فصل چهارم : میدان تغییر شکل جدید در اکستروژن مقاطع خاص ..... ۳۷
۴-۱- مقدمه ..... ۳۸
۴-۲- حل جدید برای مقطع I ..... ٤۱
٤-۲-۱- بیان کلی روش جدید ..... ٤۱
٤-۲-۲- حل مثلث $O' K' B'$ ..... ٤٦
۴-۲-۳- حل مثلث $O' B' C'$ ..... ٤۷
۴-۲-۴- حل مثلث $O' C' D'$ ..... ٤۹
٤-۲-۵- حل مثلث $O'H'I'$ ..... ۵۱
۴-۳- حل یک مقطع نامشخص به روش جدید ..... ۵۲
٤-۳-۱- حل قسمت اول ..... ۵٤
٤-۳-۲- حل قسمت دوم ..... ۵٤
۴-۳-۳- حل قسمت سوم ..... ۵۵
٤-۳-٤- حل قسمت چهارم ..... ۵۵
٤-۳-۵- حل قسمت پنجم ..... ۵۵
٤-۳-٦- حل قسمت ششم ..... ۵٦
٤-۳-۷- حل قسمت هفتم ..... ۵٦
٤-۳-۸- حل قسمت هشتم ..... ۵۷
۵. فصل پنجم : بررسی و تحلیل نتایج ..... ۵۸
۵-۱- مقدمه ..... ۵۹

۵-۲- نتایج حل مقطع I ..... ۶۰
۵-۳- نتایج حل مقطع جدید (مقطع شکل ٤-١٤ ) ..... ۷۱
۶. فصل ششم : نتیجه‌گیری و پیشنهاد ..... ۷۸
۶-۱- نتیجه‌گیری ..... ۷۹
۶-۲- پیشنهادها ..... ۷۹
۷. مراجع ..... ۸۰

شکل ۱-۱. اکستروژن مستقیم ..... ٤
شکل ۱-۲. اکستروژن غیر مستقیم ..... ٥
شکل ۱-۳. اکستروژن هیدروستاتیک ..... ٦
شکل ۳-۱. مقایسه بار بدست آمده از روش حد بالا و حد پایین با بار واقعی ..... ۱۸
شکل ۳-۲. میدان تغییر شکل کلی برای اکستروژن ..... ۲۱
شکل ۴-۱. تقسیم مقطع خروجی به سطوح ساده ..... ۳۸
شکل ۴-۲. بوجود آمدن منطقه کور در اکستروژن مقطع I ..... ۳۹
شکل ۴-۳. تغییر مبدا در حل مقطع I ..... ۳۹
شکل ۴-۴. عدم استفاده از حل موجود برای مقاطع خاص ..... ٤۰
شکل ۴-۵. ۱/۴ از سطح مقطع I و خطوط جریان در نظر گرفته شده ..... ٤۱
شکل ۴-۶. تغییر تقسیم بندی در مقطع I ..... ٤۲
شکل ۴-۷. ابعاد ۱/۴ مقطع I ..... ٤۳
شکل ٤-۸. مقایسه نتایج حل عددی و حل تحلیلی ..... ٤٤
شکل ٤-۹. مقایسه نتایج حل عددی و حل تحلیلی در ناحیه‌ای خاص ..... ٤٥
شکل ۴-۱۰. میدان تغییر شکل قسمت اول مقطع I ..... ٤٦
شکل ۴-۱۱. میدان تغییر شکل قسمت دوم مقطع I ..... ٤۷
شکل ۴-۱۲. میدان تغییر شکل قسمت سوم مقطع I ..... ٤۹
شکل ۴-۱۳. میدان تغییر شکل قسمت چهارم مقطع I ..... ٥۱
شکل ٤-۱٤. مقطع جدید غیر متقارن ..... ٥۲
شکل ٤-۱٥. ابعاد مقطع جدید غیر متقارن ..... ٥۳
شکل ٤-۱٦. میدان تغییر شکل کلی مقطع جدید ..... ٥۳
شکل ٤-۱۷. قسمت هفتم مقطع جدید ..... ٥٦

شکل ٤-١٨. قسمت هشتم مقطع جدید ..... ٥٧
شکل ٥-١. نقش مولفه‌های مختلف انرژی در اکستروژن قسمت اول مقطع I ..... ٦١
شکل ٥-٢. نقش مولفه‌های مختلف انرژی در اکستروژن قسمت سوم مقطع I ..... ٦١
شکل ٥-٣. نقش مولفه‌های مختلف انرژی در اکستروژن قسمت ششم مقطع I ..... ٦٢
شکل ٥-٤. مولفه‌های مختلف انرژی در اکستروژن کل مقطع I ..... ٦٢
شکل ٥-٥. تغییرات ضریب اصطکاک روی توان اکستروژن برای قسمت اول مقطع I ..... ٦٣
شکل ٥-٦. تغییرات ضریب اصطکاک روی توان اکستروژن برای قسمت دوم مقطع I ..... ٦٤
شکل ٥-٧. تغییرات ضریب اصطکاک روی توان اکستروژن برای قسمت سوم مقطع I ..... ٦٤
شکل ٥-٨. تغییرات ضریب اصطکاک روی توان اکستروژن برای کل مقطع I ..... ٦٥
شکل ٥-٩. مقایسه نتایج نویسنده و مرجع ٢٤ برای مقطع I در m= 0 ..... ٦٦
شکل ٥-١٠. مقایسه نتایج نویسنده و مرجع ٢٤ برای مقطع I در m= 0.2 ..... ٦٦
شکل ٥-١١. مقایسه نتایج نویسنده و مرجع ٢٤ برای مقطع I در m= 0.4 ..... ٦٧
شکل ٥-١٢. مقایسه نتایج نویسنده و مرجع ٢٤ برای کل مقطع I در m= 0.6 ..... ٦٧
شکل ٥-١٣. مقایسه نتایج نویسنده و مرجع ٢٤ برای کل مقطع I در m= 0.8 ..... ٦٨
شکل ٥-١٤. مقایسه نتایج نویسنده و مرجع ٢٤ برای کل مقطع I در m= 1 ..... ٦٨
شکل ٥-١٥. مولفه‌های توان اکستروژن برای قسمت دوم مقطع جدید ..... ٧١
شکل ٥-١٦. مولفه‌های توان اکستروژن برای قسمت پنجم مقطع جدید. ..... ٧٢
شکل ٥-١٧. مولفه‌های توان اکستروژن برای قسمت هفتم مقطع جدید. ..... ٧٢
شکل ٥-١٨. مولفه‌های توان اکستروژن برای قسمت هشتم مقطع جدید. ..... ٧٣
شکل ٥-١٩. مولفه‌های توان اکستروژن برای کل مقطع جدید. ..... ٧٣
شکل ٥-٢٠. تغییرات ضریب اصطکاک روی توان اکستروژن مقطع جدید ..... ٧٤
شکل ٥-٢١. تغییرات درصد کاهش سطح روی مولفه تغییر شکل داخلی قسمت اول مقطع جدید ... ٧٥

شکل ۵-۲۲. تغییرات درصد کاهش سطح روی مولفه ناپیوستگی سرعت قسمت ششم مقطع جدید ۷۵.

شکل ۵-۲۳. تغییرات درصد کاهش سطح روی مولفه اصطکاک قسمت هشتم مقطع جدید .....۷۶

شکل ۵-۲۴. تغییرات درصد کاهش سطح روی توان اکستروژن مقطع جدید .....۷۷

شکل ۵-۲۵. تغییرات سرعت ورودی بیلت روی توان اکستروژن قسمت هشتم مقطع جدید .....۷۷

# فصل اول : مقدمه

## ۱-۱- تعریف اکستروژن

اکستروژن به فرآیندی اطلاق می‌شود که بر اساس آن طی تغییر شکل پلاستیک حجمی‌از فلز یا غیرفلز، بر اثر وارد آوردن فشار درون یک قالب ، شکل مقطع خروجی قالب را به خود می‌گیرد. این مقطع خروجی می‌تواند دارای یک یا چند دهانه باشد.

## ۱-۲- تاریخچه اکستروژن

اولین ایدهٔ اکستروژن در سال ۱۷۹۷ توسط آقای جوزف برماه[1] مطرح شد. وی شرح پرسی را برای ساخت لوله از سرب یا هر فلز نرم دیگری در مقاله‌ای ارائه داده بود که می‌توانست لوله‌های با قطرهای مختلف و طولهای دلخواه را بوجود آورد.

در سال ۱۸۲۰ آقای توماس بور[2] پرس هیدرولیکی را ساخت و در سال ۱۸۹۴ الکساندر[3] از مس و برنج در اکستروژن استفاده کرد. استفاده موفقییت آمیز از فلزاتی مانند مس، سرب و برنج در فرایند اکستروژن، استفاده آلومینیوم و فولاد را نیز ممکن ساخت.

## ۱-۳- ویژگیها و کاربردهای اکستروژن

اولین و ضروری‌ترین ویژگی اکستروژن فشار بسیار زیاد است که این فشار باعث افزایش درجه حرارت در ناحیه در حال تغییر شکل می‌شود. بنابراین این عمل باید به آهستگی انجام شود تا مانع از ذوب شدن محصول شود.

محصولات زیادی بوسیله اکستروژن بوجود می‌آید. شکلهای مختلفی از آلیاژهای آلومینیوم بوسیله عمل اکستروژن بدون روانکاری در قالب‌های تخت ساخته می‌شود. در صنایع هسته‌ای اکستروژن موادی نظیر تیتانیوم، زیرکونیوم، بریلیوم و آلیاژهای فولاد بوسیله تکنیکهای اکستروژن گرم صورت می‌گیرد. همچنین اکستروژن سرد برای ساخت محصولاتی با مقاومت مکانیکی بالا و کیفیت سطح خوب بطور

---

[1] Joseph Bermah

[2] Thomas Burr

[3] Alexander

وسیعی استفاده می‌شود. محدوده کاربرد اکستروژن، تولید از محصولات ساده متقارن تا اشکال با سطوح مقطع پیچیده مثل چرخ دنده و هزار خار وسعت دارد.

## ۱-۴- مزایا و معایب اکستروژن

از مزایای اکستروژن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

- تولید شکلهای متنوع که با روشهای دیگر مثل نورد قابل تولید نیستند.
- کاهش سطح زیاد در یک مرحله اکستروژن
- قیمت پایین قالب. قالبهای اکستروژن بعد از قالبهای ریخته گری دارای پایین‌ترین قیمت هستند.
- دقت بالای فرآورده‌ها. (دقت تا $\pm 0.0005 in$ قابل دسترسی است).
- کیفیت سطح خوب محصولات و عدم نیاز به ماشین کاری.
- بهبود ساختمان دانه‌ای در اکستروژن گرم.
- بهبود بعضی از خواص مکانیکی در اکستروژن سرد به علت انجام کار سرد.

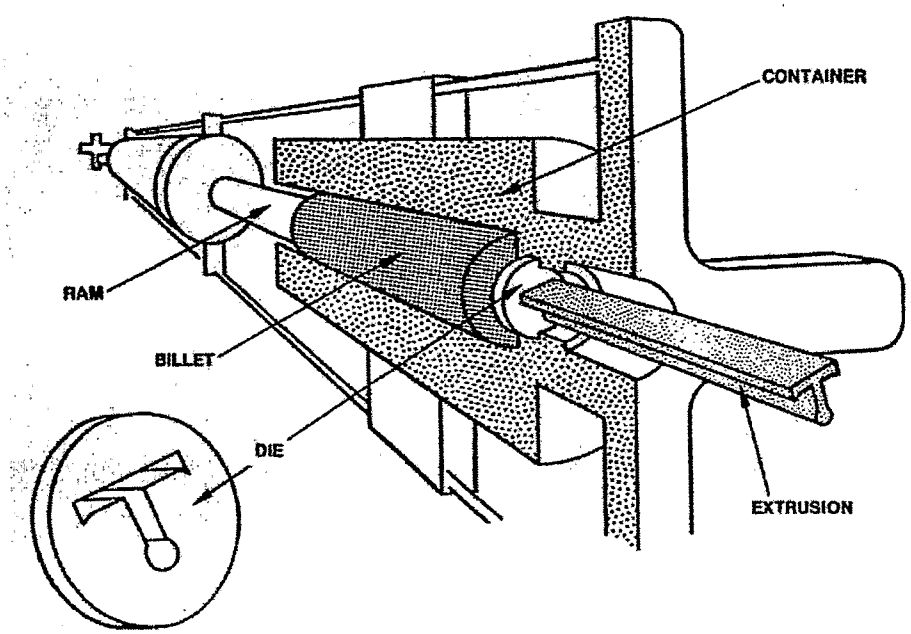
از معایب اکستروژن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

- پیچیده بودن جریان فلز در قالب. به همین دلیل برای جلوگیری از ترک و دیگر نقایص، در عملِ اکستروژن دقت بسیار بالا مورد نیاز است.
- در اکستروژن غیر مستقیم ناخالصی‌ها و معایب سطح بیلت روی سطح محصول اثر می‌گذارد.
- یکسان نبودن جریان مواد در قالب به طوری که موادی که در نزدیکی سطح قالب قرار دارند تغییر شکل بسیار بیشتری نسبت به مواد نزدیک به خط محور می‌دهند و این پدیده باعث سخت شدن کنترل فرایند اکستروژن می‌شود.

## ۱-۵- روش‌های اکستروژن

### ۱-۵-۱- اکستروژن مستقیم[1]

در این روش بیلت در محفظه‌ای با دیوارهای ضخیم قرار دارد و از طریق قالبی که بوسیله یک نگه‌دارنده ثابت شده است خارج می‌شود. جهت جریان مواد با جهت حرکت کوبه (Ram) یکی است. این روش متداولترین روش اکستروژن است که در شکل ۱-۱ آمده است.




شکل ۱-۱. اکستروژن مستقیم

### ۱-۵-۲- اکستروژن غیر مستقیم[2]

در این روش بیلت نسبت به دیواره محفظه ثابت می‌باشد و قالب بوسیله یک کوبه توخالی بیلت را فشرده می‌کند(شکل ۲-۲) و محصول تولید شده از داخل کوبه تو خالی خارج می‌شود. طول بیلت بستگی به پایداری کوبه در برابر کمانش دارد. هر چند در این روش اصطکاک بین مواد و دیواره کمتر

---

[1] Direct Extrusion

[2] Indirect Extrusion