بسم الله الرحمن الرحيم

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

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

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

عنوان

تحلیل اکستروژن متقارن محوری با روش بدون المان و اعمال شرایط مرزی با روش تبدیل

استاد راهنما:

دکتر مهرداد فروتن

استاد مشاور:

دکتر محمود فرزین

نگارش:

رحیم ستوده بحرینی

مهر ماه ۱۳۸۸

سپاس خدای را به پاس پدری مهربان و مادری مهربان‌تر و سپاس که مرا مجال آموختن داد.

سپاس مادری که ذره ذره‌ی وجودم او را می‌پرستد و پدری که بندگیِ او بالاترین افتخارم است.

سپاس استاد عزیزی که او را اسوه علم و اخلاق می‌دانم و بی مودتش پیمودن راه دشوار می‌نمود.

بر دستانتان بوسه می‌نهم.

به دستانتان بوسه می‌زنم.

رحیم ستوده

تقدیم به

مادرم

به پاس ایثار و فداکاریش

چکیده: روش‌های بدون المان با توجه به مزایایی که نسبت به روش‌های المان محور دارند در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای در حوزه‌ی مسائل مکانیک جامدات پیدا کرده‌اند اما گسترش این روش‌ها برای تحلیل مسائل فرم‌دهی هنوز در ابتدای راه خود قرار دارد. در این پایان نامه یک روش جدید بدون المانِ فرم ضعیف، برای تحلیل فرآیند اکستروژن مستقیم متقارن محوری بکار گرفته شده است. این روش بر پایه‌ی تقریب بدون المان حداقل مربعات متحرک و فرم ضعیفِ معادله تعادل بنا نهاده شده است. این توابع شکل و مشتقات آن‌ها در مختصات اولیه مسئله بیان می‌شوند. بدین ترتیب گره‌های داخل حوزه اثر هر ذره در طول شبیه‌سازی ثابت مانده و توابع شکل و مشتقاتشان فقط یک بار و در ابتدای حل محاسبه می‌شود. با توجه به استفاده از فرم ضعیف، انتگرال‌گیری با استفاده از شبکه پس‌زمینه و روش گوس انجام می‌گیرد که پایداری بیشتر حل را نتیجه می‌دهد. شرایط مرزی اساسی با استفاده از روش تبدیل اعمال می‌شود. دراین روش با استفاده از ماتریس تبدیل توابع شکل تصحیح شده، سپس می‌توان به راحتی روش اجزاءمحدود شرایط مرزی را اعمال نمود. با توجه به بیان مادی توابع شکل، ماتریس تبدیل نیز فقط یکبار و در ابتدای حل شکل می‌گیرد. استفاده از روش‌های ذکر شده در کنار هم منجر به توسعه روشی جدید، پایدار و قوی برای حل مسائل فرم دهی صلب–پلاستیک شده است. همچنین بیان مادی توابع شکل حجم زیادی از محاسبات را کم کرده است. با استفاده از مدل توسعه داده شده فرآیند اکستروژنِ مستقیمِ متقارن محوری شبیه‌سازی شده است. رفتار ماده، صلب–پلاستیکِ کمی تراکم پذیر به همراه کار سختی در نظر گرفته شده است. جریان مواد و کانتورهای کرنش موثر بدست آمده از روش ارائه شده توافق بسیار خوبی با نتایج حلِ المان محدود دارد که دلالت بر صحت روش ارائه شده دارد.

فهرست

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه‌ای بر روش‌های بدون المان ۲
۱-۱-۱- مقدمه ۲
۱-۱-۲- چرا روش‌های بدون المان؟ ۲
۱-۲- مقایسه روش اجزاء محدود با روش‌های بدون المان ۴
۱-۲-۱- روند تحلیل مسائل به روش‌های بدون المان ۴
۱-۲-۲- مزایای بی نیازی روش‌های بدون المان به شبکه بندی ۶
۱-۲-۳- پیوستگی توابع شکل بدون المان ۷
۱-۲-۴- مقایسه روش اجزاء محدود و روش‌های بدون المان از دیدگاه محاسباتی ۸
۱-۲-۵- اعمال شرایط مرزی اساسی ۹
۱-۳- مقدمه‌ای بر فرآیند شکل دهی فلزات ۱۰
۱-۳-۱- مدل سازی فرآیند ۱۰
۱-۳-۲- فرمول بندی جریان و فرمول بندی حجمی ۱۲
۱-۴- فرآیندهای تغییر شکل فلزات ۱۳
۱-۴-۱- فرآیند شکل دهی فلزات به عنوان یک سیستم ۱۴
۱-۴-۱-۱- متغیرهای ماده ۱۵
۱-۴-۱-۲- ابزار و تجهیزات ۱۵
۱-۴-۱-۳- اصطکاک ۱۵
۱-۴-۱-۴- مکانیک شکل دهی ۱۶
۱-۴-۱-۵- خواص محصولات ۱۶
۱-۵- شرح مسئله ۱۶

فصل دوم: معادله‌های اساسی فرایند شکل دهی فلزات ۲۱

۲-۱- مقدمه ۲۲
۲-۱-۱- تنش جاری در فلزات ۲۳
۲-۱-۲- اصطکاک در شکل دهی فلزات ۲۴
۲-۲- تئوری پلاستیسیته و معادله‌های متشکله در فرآیند شکل دهی فلزات ۲۶
۲-۲-۱- تعادل و اصل نرخ کار مجازی ۲۷
۲-۲-۱-۱- معادله‌های تعادل ۲۷
۲-۲-۱-۲- تعادل با ترکشن‌ها ۲۷
۲-۲-۱-۳- اصل نرخ کار مجازی ۲۸
۲-۲-۲- پتانسیل پلاستیک و قانون جریان ۲۹
۲-۲-۳- کرنش سختی، تنش مؤثر و کرنش مؤثر ۳۰

عنوان **صفحه**

۲-۳- معادله‌های اساسی ۳۱
۲-۳-۱- فرمول‌بندی صلب-پلاستیک روش‌های عددی ۳۱
۲-۳-۱-۱- فرم ضعیف در تحلیل فرآیندهای شکل دهی فلزات صلب-پلاستیک ۳۲
۲-۴- روش تحلیل صلب-پلاستیک شکل دهی فلزات برای تغییر شکل‌های محدود ۳۳
۲-۴-۱- تئوری مواد صلب پلاستیک کم تراکم پذیر ۳۵
۲-۴-۲- تعادل نیروهای گره‌ای (تغییر شکل بینهایت کوچک) ۳۶
۲-۵- جمع بندی ۳۹

فصل سوم: مبانی روش بدون المان توسعه یافته ۴۱

۳-۱- مقدمه ای بر روش‌های عددی ۴۲
۳-۱-۱- دسته بندی روش‌های بدون المان ۴۳
۳-۱-۱-۱- دسته‌بندی بر اساس فرمول‌بندی فرآیند ۴۴
۳-۱-۱-۲- دسته‌بندی بر اساس شماتیک تابع تقریب ۴۶
۳-۱-۱-۳- دسته‌بندی بر اساس دامنه حل مسئله ۴۸
۳-۲- توابع شکل ۵۰
۳-۲-۱- توابع شکل اجزاء محدود ۵۱
۳-۲-۲- توابع شکل حداقل مربعات متحرک (MLS) ۵۲
۳-۲-۲-۱- ساختِ توابع شکل MLS به روش حداقل سازی مربعات خطای تقریب محلی ۵۴
۳-۲-۲-۲- مشتقات توابع شکل MLS ۵۹
۳-۲-۲-۳- خواص توابع شکل MLS ۵۹
۳-۲-۲-۴- ارزیابی تحلیلی توابع شکل MLS دوبعدی $\mathbf{X}=[x,y]$ و مشتقات آنها نظیر $n=1$ ۶۲
۳-۲-۳- انتخاب توابع وزن ۶۴
۳-۲-۳-۱- اندازه حوزه اثر تابع وزن ۶۵
۳-۲-۳-۲- توصیف لاگرانژی و اویلری تابع وزن ۶۶
۳-۲-۳-۳- فرم‌های ریاضی تابع وزن ۶۸
۳-۲-۴- وارون پذیری ماتریس ممان ۶۹
۳-۳- انتگرال گیری در روش‌های بدون المان فرم ضعیف ۷۰
۳-۳-۱- قوائد انتگرال گیری عددی ۷۱
۳-۳-۲- دقت انتگرال‌گیری ۷۱
۳-۳-۳- دسته بندی روش‌های انتگرال‌گیری ۷۱
۳-۳-۳-۱- انتگرال گیری مستقیم گره ای ۷۲
۳-۳-۳-۲- انتگرال گیری با شبکه پس زمینه ۷۲
۳-۴- ترکیب و یا سوار کردن معادله‌های ۷۳
۳-۵- اعمال شرایط مرزی اساسی ۷۴
۳-۵-۱- روش تبدیل ۷۵

عنوان **صفحه**

۳-۵-۱-۱- اعمال شرایط مرزی اساسی به روش اجزاء محدود ۷۸
۳-۵-۲- شرایط توجیه پذیر بودن استفاده از روش تبدیل ۷۹
۳-۶- حل دستگاه معادله‌های نهایی ۷۹
۳-۷- جمع بندی ۸۰

فصل چهارم: فرمول بندی بدون المان و الگوریتم حل ۸۱

۴-۱- مقدمه ۸۲
۴-۲- بیان مسئله ۸۲
۴-۲-۱- فرمول بندی فرم ضعیف کم تراکم پذیر صلب-پلاستیک و معادله‌های اساسی ۸۳
۴-۲-۲- فرمول‌بندی بدون المان ۸۵
۴-۳- الگوریتم حل مسئله ۸۹
۴-۳-۱- مرحله پیش پردازش ۸۹
۴-۳-۱-۱-تعیین ابعاد اولیه بیلت، ضریب اصطکاک و تعداد گره‌ها توسط کاربر ۸۹
۴-۳-۱-۲-گره بندی ۹۰
۴-۳-۱-۳-تعیین مختصات رئوس سلول‌های پس زمینه ۹۱
۴-۳-۱-۴-تعیین مختصات، وزن و جاکوبین نقاط گوس یک و دو بعدی ۹۱
۴-۳-۱-۵-محاسبه توابع شکل و مشتقاتشان در نقاط گوس ۹۵
۴-۳-۱-۶- محاسبه ماتریس تبدیل ۹۶
۴-۳-۲- مرحله حل ۹۶
۴-۳-۲-۱- حدس میدان سرعت اولیه ۹۶
۴-۳-۲-۲- محاسبه میدان سرعت مجازی ۹۷
۴-۳-۲-۳- محاسبه نرخ کرنش و نرخ کرنش موثر ۹۷
۴-۳-۲-۴- به روز شدن کرنش مؤثر، محاسبه تنش مؤثر ۹۸
۴-۳-۲-۵- محاسبه ماتریس سفتی و بردار نیرو ۱۰۱
۴-۳-۲-۶- تصحیح ماتریس سفتی و بردار نیرو و اعمال شرایط مرزی ۱۰۳
۴-۳-۲-۷- حل دستگاه معادله‌های جبری ۱۰۴
۴-۳-۲-۸- معیار همگرایی ۱۰۵
۴-۴- مرحله پس پردازش ۱۰۵
۴-۴-۱- به هنگام کردن هندسه ۱۰۵
۴-۴-۲- نمایش خروجی‌ها ۱۰۷
۴-۵- حل قدم بعد ۱۰۸
۴-۶- جمع بندی ۱۰۸

فصل پنجم: نتایج ۱۱۰

۵-۱- مقدمه ۱۱۱

عنوان **صفحه**

۵-۲- حل مسئله با روش بدون المان ۱۱۱
۵-۲-۱- تبیین هندسه و سایر پارامترها ۱۱۱
۵-۳- حل مسئله با روش المان محدود ۱۱۲
۵-۳-۱- تبیین هندسه ۱۱۲
۵-۳-۲- تبیین شرایط مرزی ۱۱۲
۵-۳-۳- تبیین رفتار ماده ۱۱۳
۵-۴- مقایسه نتایج ۱۱۴
۵-۵- تحلیل نتایج ۱۱۹
۵-۵-۱- نیروی شکل دهی ۱۲۴
۵-۶- نتیجه‌گیری ۱۲۶
۵-۷- پیشنهادهایی برای ادامه کار حاضر ۱۲۷
مراجع ۱۲۸
چکیده انگلیسی

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل(۱-۱) مقایسه روند تحلیل مسائل به روش اجزاء محدود و روشهای بدون المان ۵
شکل (۱-۲) جدا سازی حوزه مسئله و مرزهای آن ۵
شکل (۱-۳) اتصال گره ها به یکدیگر ۶
شکل (۱-۴) شبکه بندی سیلندر موتور اتومبیل به کمک نرم افزارهای اجزاء محدود ۶
شکل (۱-۵) تغییر شکل زیاد المان ها در تحلیل فرآیند کشش عمیق جام به روش اجزاء محدود ۷
شکل (۱-۶) تابع شکل مطلق (جهانی) دو بعدی ۸
شکل (۱-۷) محاسبه تقریب در نقطه ۹
شکل (۱-۸) نمودار بلوکی برای طراحی فرآیند و کنترل در شکل دهی فلزات ۱۱
شکل (۱-۹) نشان دادن سیستم شکل دهی فلزات با استفاده از فورجینگ قالب بسته ۱۵
شکل (۱-۱۰) شماتیکی از فرآیند اکستروژن مستقیم متقارن محوری ۱۹
شکل (۱-۱۱) شرایط مرزی و چگونگی چیدمان اولیه گره‌ها ۲۰
شکل(۲-۱) جریان یکنواخت و غیر یکنواخت فلز در فرآیندهای شکل دهی ۲۳
شکل (۲-۲) تعادل ترکشن‌های سطحی ۲۸
شکل (۲-۳) میله مستقیم پله‌ای ۳۴
شکل (۲-۴) تعادل نیروهای گره‌ای با نیروی خارجی ۳۸
شکل (۳-۱) تابع شکل مطلق (جهانی) گره i ام نظیر المانهای مثلث خطی در روش اجزاء محدود ۵۲
شکل (۳-۲) تقریب حداقل مربعات استاندارد نظیر بردار پایه خطی ۵۳
شکل(۳-۳) تقریب حداقل مربعات متحرک نظیر بردار پایه خطی و توابع وزن ۵۴
شکل (۳-۴) تقریب محلی تابع یک بعدی حول نقطه دلخواه و ثابت ۵۵
شکل (۳-۵) خطای تقریب محلی یک بعدی ۵۶
شکل (۳-۶) حرکت نقطه به نقطه تابع وزن و ساخت تقریب MLS ۵۸
شکل (۳-۷) توابع شکل MLS و مشتقات آنها نظیر بردار پایه خطی ۶۱
شکل (۳-۸) تابع شکل دوبعدی MLS ۶۳
شکل (۳-۹) مشتق مرتبه اول تابع شکل دوبعدی MLS ۶۳
شکل (۳-۱۰) مشتق مرتبه دوم تابع شکل دوبعدی MLS ۶۴
شکل (۳-۱۱) شکلهای مستطیلی ودایره ای حوزه اثر و فرم ضرب تانسوری(مستطیلی) تابع وزن ۶۵
شکل (۳-۱۲) مقایسه حوزه اثرهای دایره ای لاگرانژی و اویلری ۶۷
شکل (۳-۱۳) اعوجاج حوزه اثر لاگرانژی تابع وزن در شبیه سازی دینامیک سیالات ۶۷
شکل (۳-۱۴) شبکه پس زمینه انتگرل گیری و هم پوشانی حوزه اثر نقاط گوس ۷۲
شکل (۳-۱۵) الگوریتم تشکیل ماتریس سختی کل به روش اجزاء محدود ۷۳
شکل (۳-۱۶) الگوریتم تشکیل ماتریس سختی کل به روش‌های بدون المان ۷۴
شکل (۳-۱۷) مقادیر گره ای مجازی و حقیقی در تقریب های بدون المان ۷۶
شکل (۳-۱۸) توابع شکل نظیر بردار پایه خطی اصلاح نشده و اصلاح شده ۷۷

عنوان **صفحه**

شکل (۴-۱) شرایط مرزی اکستروژن مستقیم متقارن محوری ۸۳
شکل (۴-۲) الگوریتم مرحله پیش پردازش ۹۰
شکل (۴-۳) پنجره تعیین پارامترها توسط کاربر ۹۱
شکل (۴-۴) گره‌بندی اولیه بیلت خام ۹۲
شکل (۴-۵) نقاط گوس مرتبه ۴ داخل سلول مربعی در دستگاه مختصات طبیعی ۹۲
شکل (۴-۶) نقاط گوس مرتبه ۴ در سلول یک بعدی ۹۴
شکل (۴-۷) سلول‌های پس‌زمینه و نقاط گوس یک و دو بعدی و نگاشت به سلول مبنا
در حالت یک و دو بعدی ۹۵
شکل (۴-۸) الگوریتم مرحله حل ۱۰۰
شکل (۴-۹) نگاشت سلول تغییر شکل یافته به سلول اولیه و سپس به سلول مبنا ۱۰۲
شکل (۴-۱۰) الگوریتم مرحله پس پردازش ۱۰۷
شکل (۴-۱۱) الگوریتم کلی حل مسئله اکستروژن مستقیم متقارن محوری با روش بدون المان MLS ۱۰۹
شکل(۵-۱) ابعاد هندسه اولیه و گره‌بندی اولیه در حل بدون المان ۱۱۲
شکل(۵-۲) هندسه اولیه و مش‌بندی اولیه در حل المان محدود ۱۱۳
شکل(۵-۳) نمودار کرنش مؤثر-تنش مؤثر تعریف شده برای نرم افزار انسیس ۱۱۳
شکل(۵-۴) کانتورهای کرنش مؤثر در ۲ میلیمتر پیشروی پانچ معادل با ۱۳/۵٪ ۱۱۴
شکل(۵-۵) کانتورهای کرنش مؤثر در ۷/۴ میلیمتر پیشروی پانچ معادل با ۴۹/۵٪ ۱۱۵
شکل(۵-۶) کانتورهای کرنش مؤثر در ۱۱/۵ میلیمتر پیشروی پانچ معادل با ۷۷٪ ۱۱۶
شکل(۵-۷) الگوی پخش گره‌ها در ۵ میلیمتر پیشروی پانچ معادل با ۳۴٪ ۱۱۷
شکل(۵-۸) الگوی پخش گره‌ها در ۱۱/۵ میلیمتر پیشروی پانچ معادل با ۷۷٪ ۱۱۸
شکل(۵-۹) الگوی پخش گره‌ها در درصدهای مختلف پیشروی پانچ ۱۱۹
شکل(۵-۱۰) بردار سرعت گره‌ها در درصدهای مختلف پیشروی پانچ ۱۲۰
شکل(۵-۱۱) مقایسه میدان سرعت گره‌ها حاصل از حل با آلومینیوم خالص صنعتی و آلومینیوم ۲۰۲۴ ۱۲۱
شکل(۵-۱۲) کانتورهای نرخ کرنش مؤثر در سه مرحله از پیشروی پانچ ۱۲۱
شکل(۵-۱۳) کانتورهای تنش مؤثر در ۲۶٪ پیشروی پانچ ۱۲۲
شکل(۵-۱۴) کانتورهای تنش مؤثر در ۵۰٪ پیشروی پانچ ۱۲۳
شکل(۵-۱۵) کانتورهای تنش مؤثر در ۷۷٪ پیشروی پانچ ۱۲۳
شکل(۵-۱۶) ماکزیمم کرنش مؤثر بر حسب پیشروی پانچ در زوایای ۱۰،۲۰ و ۳۰ درجه قالب ۱۲۴
شکل(۵-۱۷) نمودار نیروی شکل دهی بر حسب کورس پانچ در ضریب اصطکاک‌های مختلف ۱۲۵

فهرست جدول‌ها

شماره جدول **صفحه**

جدول (۲-۱) اختلاف معیار تسلیم معادله از معیار فون میزز ۳۷
جدول (۳-۱) طبقه بندی روش‌های بدون المان..... ۴۹
جدول (۳-۲) شیوه‌های مختلف فرمول بندی روش‌های بدون المان ۵۰

علامت‌های اختصاری

مفهوم	علامت
ماتریس ضرایب	$\mathbf{A}$
ماتریس رابطه بین بردار سرعت عمومی و بردار نرخ کرنش	B
ثابت	C
ماتریس رابطه بین بردار نرخ کرنش و بردار تنش	D
جاکوبین نگاشت سلول اولیه به سلول انتگرال گیری گوس	J_1
جاکوبین نگاشت سلول جاری به سلول اولیه	J_2
ماتریس سختی	$\boldsymbol{k}$
ماتریس سختی اصلاح شده	$\boldsymbol{k'}$
ماتریس ممان	M
بردار توابع شکل اجزاء محدود	N
تعداد کل گره ها	N
بردار توابع پایه	P
مساحت	S
سطحی که ترکشن بر آن وارد می‌شود	S_F
سطحی که سرعت بر آن اعمال می‌شود	S_u
ماتریس تبدیل	T
کار نیروهای خارجی	W^{ext}
مختصات مادی یا لاگرانژی	X
موقعیت یک گره یا ذره	Xi
تنش تسلیم در کشش تک محوره	Y
بردار ضرایب مجهول گره ای	$\mathbf{a}$
بردار نیرو	$\mathbf{b}$
بعد	d
پارامتر اتساع	$d_{\max}$
تنش اصطکاکی	f_s
تابع تنش تسلیم	$f(\sigma_{ij})$
بردار نیرو	$\boldsymbol{f}$
بردار نیرو اصلاح شده	$\boldsymbol{f'}$
ثابت ماده برای مواد کم تراکم پذیر	g
تنش تسلیم برشی	k
عامل اصطکاک تنش برشی ثابت	m

مفهوم	علامت
زمان	t
نمو زمان	Δt
تابع وزن	w
مختصات فضایی یا اویلری	$\mathbf{x}$
اندیس چند گانه	$\boldsymbol{\alpha}$
بردار اندیسی	$\boldsymbol{\alpha}^i$
کرنش مؤثر	$\bar{\varepsilon}$
نرخ کرنش	$\dot{\varepsilon}_{ij}$
نرخ کرنش پلاستیک	$\dot{\varepsilon}_{ij}^{\ p}$
نرخ کرنش مؤثر	$\dot{\bar{\varepsilon}}$
انرژی کرنشی	Λ
ضریب پوآسون	υ
شعاع‌های حوزه اثرمستطیلی	ρ_x, ρ_y
تنش کوشی	σ_{ij}
تنش انحرافی	σ_{ij}'
تنش مؤثر ، تنش جاری	$\bar{\sigma}$
تنش میانگین	σ_m
بردارتوابع شکل بدون المان	$\boldsymbol{\Phi}$
بردارتوابع شکل اصلاح شده بدون المان	$\hat{\boldsymbol{\Phi}}$
بردار توابع آزمون	$\boldsymbol{\Psi}$
حوزه تحت بررسی	Ω
میدان سرعت مجازی	$\boldsymbol{u}$
میدان سرعت حقیقی	$\boldsymbol{U}$

فصل اول

مقدمه

فصل دوم

معادله‌های اساسی فرآیند شکل دهی فلزات

فصل سوم

مبانی روش بدون المان توسعه یافته

فصل چهارم

فرمول بندی بدون المان و الگوریتم حل

فصل پنجم

نتایج