



دانشکده فنی مهندسی
گروه مهندسی ساخت و تولید

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

عنوان

مطالعه عددی و تجربی تأثیر مسیر بارگذاری بر توزیع ضخامت و
هندسه محصول در فرآیند هیدروفرمینگ لوله های پله ای

استادان راهنما

دکتر بهنام داودی

دکتر محمد بخشی جویباری

استاد مشاور

دکتر امیر مصطفی پور اصل

پژوهشگر

حسن خانلری بهنمیری

بهمن ۱۳۸۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

که بوسه بر خاک پایشان برآیم عبادتست

منت خدای عز و جل را که همواره همراهم بود و او را شکر که زندگیم را با علم پیوند داد.

از خانواده عزیزم که در تمامی مراحل تحصیل حامی و مشوقم بوده اند، بی اندازه قدردارم.

از آقای دکتر بهنام داودی که رهنمودهای ایشان در انجام این پایان نامه بسیار مؤثر بوده است، خاضعانه سپاسگزارم. همچنین از زحمات بی کران آقای پروفسور محمد بخشی که از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل استاد راهنمایی این پایان نامه را به عهده داشته اند، صمیمانه قدردانی می نمایم. زحمات آقای دکتر امیر مصطفی پور، استاد مشاور پایان نامه، نیز مزید امتنان است. از آقای دکتر محمد زادشکویان که زحمت بازخوانی پایان نامه را تقبل فرمودند، کمال تشکر را دارم.

کلیه آزمایش های تجربی انجام شده در این پایان نامه در آزمایشگاه شکل دهی فلزات دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل انجام شد که در همین جا مراتب سپاس و قدردانی خود را از مسئولین آن دانشگاه و به ویژه از مهندس گرجی، از مسئولین آزمایشگاه یاد شده، ابراز می دارم. همچنین از مساعدت و همراهی مهندس مجید الیاسی، دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، نهایت سپاس را دارم.

در پایان، از همه کسانی که به هر نحوی در طی یک سال و نیم انجام این پایان نامه یاریم نموده اند، تشکر و قدردانی می نمایم.

حسن خانلری بهنمیری

بهمن ۱۳۸۸

نام و نام خانوادگی دانشجو: خانلری بهنمیری	نام: حسن
عنوان پایان نامه: مطالعه عددی و تجربی تأثیر مسیر بارگذاری بر توزیع ضخامت و هندسه محصول در فرآیند هیدروفرمینگ لوله های پله ای	
استادان راهنما: دکتر بهنام داودی دکتر محمد بخشی جویباری استاد مشاور: دکتر امیر مصطفی پور اصل	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک گرایش: ساخت و تولید دانشگاه: تبریز دانشکده: فنی مهندسی تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۸۸/۱۰/۱۴ تعداد صفحه: ۱۱۸	
کلید واژه ها: شکل دهی فلزات، شبیه سازی اجزای محدود، هیدروفرمینگ لوله، لوله های پله ای.	
<p>چکیده:</p> <p>امروزه فرآیند هیدروفرمینگ لوله به طور وسیعی در صنایع توسعه یافته است و برای تولید قطعات لوله ای با سطح مقطع های مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. در این فرآیند، لوله با استفاده از فشار داخلی و تغذیه محوری به طور همزمان به شکل حفره قالب در می آید. کاهش وزن و هزینه، یکپارچگی بهتر ساختار، افزایش استحکام و کاهش در تعداد مراحل تولید از مزایای اصلی این فرآیند می باشد.</p> <p>لوله های پله ای کاربرد فراوانی در بسیاری از صنایع، به ویژه صنایع خودروسازی دارند. یکی از روش های ساخت این لوله ها، هیدروفرمینگ است. توزیع ضخامت و هندسه لوله های پله ای از موضوعات مهم در رابطه با این لوله ها می باشد. از طرفی مسیر فشار مؤثرترین پارامتر در فرآیند هیدروفرمینگ لوله محسوب می شود. در صورت اعمال نامناسب مسیر بارگذاری، امکان بروز عیوبی از قبیل پارگی یا چروکیدگی لوله وجود دارد.</p> <p>در این تحقیق، اثر مسیر فشار بر توزیع ضخامت و هندسه محصول در فرآیند هیدروفرمینگ لوله های پله ای بررسی شده است. لوله پله ای مورد نظر در این پژوهش بدون درز، از جنس فولاد زنگ نزن کم کربن (SS316L) و دارای مقطع دایره ای بوده است.</p> <p>در این پایان نامه، یک مسیر فشار سه خطی مد نظر قرار گرفته است. در این راستا، به کمک شبیه سازی اجزای محدود، اثر هر یک از پارامترهای مسیر فشار بر هندسه و توزیع ضخامت محصول مورد بررسی قرار گرفته است. این پارامترها شامل فشارهای اولیه و نهایی و تغذیه های محوری اولیه و نهایی می باشد. مشخص شده است که با افزایش فشارهای اولیه و نهایی و کاهش تغذیه محوری اولیه، میزان بالج لوله افزایش و میزان چروکیدگی و میانگین ضخامت لوله کاهش می یابد و توزیع ضخامت لوله یکنواخت تر می گردد. همچنین نشان داده شده است که اثر فشار نهایی نسبت به فشار اولیه بر هندسه و توزیع ضخامت لوله بیشتر است. با افزایش تغذیه محوری</p>	

نهایی نیز، میزان بالج و چروکیدگی لوله افزایش می یابد. جواب های حاصل از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و درستی نتایج حاصل از روش اجزای محدود تأیید شده است. در این تحقیق، علاوه بر مسیر بارگذاری، اثر پارامترهای هندسی قالب و لوله، ضریب اصطکاک و خواص ماده نیز بر هندسه و توزیع ضخامت محصول به کمک شبیه سازی اجزای محدود، مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده است که با کاهش طول ناحیه انبساط، سطح تماس بین لوله و قالب افزایش می یابد اما با کاهش بیش از حد آن، نه تنها ممکن است دیواره لوله با دیواره قالب تماس نیابد بلکه احتمال تابیدگی و چروکیدگی لوله نیز وجود دارد. همچنین با کاهش عرض ناحیه انبساط، سطح تماس لوله و قالب افزایش می یابد. با افزایش شعاع گوشه قالب، پرشدگی حفره قالب و نازک شدگی ضخامت لوله افزایش می یابد. فاصله لبه لوله تا مرکز قالب و همچنین ضریب اصطکاک، در محدوده بررسی شده در این تحقیق، اثری بر هندسه و توزیع ضخامت لوله نداشته است. با افزایش توان کرنش سختی (n) و کاهش ضریب استحکام (K)، میزان بالج و نازک شدگی لوله افزایش و میزان چروکیدگی آن کاهش می یابد.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: کلیات

۱	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ شکل دهی فلزات
۳	۳-۱ هیدروفرمینگ
۴	۴-۱ انواع فرآیند هیدروفرمینگ
۴	۱-۴-۱ هیدرو فرمینگ ورق
۵	۲-۴-۱ هیدروفرمینگ لوله
۷	۵-۱ بررسی منابع
۲۴	۶-۱ اهداف پژوهش

فصل دوم: مراحل آزمایشگاهی

۲۶	۱-۲ مقدمه
۲۶	۲-۲ معرفی فرآیند
۲۶	۳-۲ دستگاه پرس
۲۸	۴-۲ اجزای قالب هیدروفرمینگ لوله پله ای استوانه ای
۳۰	۵-۲ سیستم هیدرولیک
۳۲	۶-۲ خواص لوله اولیه
۳۳	۷-۲ مسیر بارگذاری
۳۴	۸-۲ مراحل انجام آزمایش
۳۵	۹-۲ اندازه گیری ابعاد قطعات

فصل سوم: شبیه سازی اجزای محدود

۳۷	۱-۳ مقدمه
۳۸	۲-۳ مدلسازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ لوله پله ای استوانه ای
۳۹	۱-۲-۳ مدلسازی سه بعدی لوله و اجزای قالب در محیط ایجاد قطعه (part)
۴۰	۲-۲-۳ تعریف خصوصیات لوله در محیط (Property)
۴۰	۳-۲-۳ مونتاژ لوله و قالب در محیط سرهم سازی (Assembly)
۴۱	۴-۲-۳ تعریف تعداد مراحل و نوع حل مسأله در محیط (Step)

۴۲	..... ۵-۲-۳ تعریف نوع تماس سطوح اجزا با هم (Interaction)
۴۲	..... ۶-۲-۳ تعریف فشار داخلی لوله و شرایط مرزی در محیط (Load)
۴۳	..... ۷-۲-۳ شبکه بندی مدل در محیط (Mesh)
۴۶	..... ۸-۳-۳ حل مساله در محیط (Job)

فصل چهارم: نتایج و بحث

۴۷	..... ۱-۴ مقدمه
۴۷	..... ۲-۴ بررسی اثر مسیر بارگذاری بر هندسه و توزیع ضخامت محصول
۴۷	..... ۱-۲-۴ فشار نهایی
۶۳	..... ۲-۲-۴ فشار اولیه
۷۳	..... ۳-۲-۴ تغذیه محوری اولیه
۸۳	..... ۴-۴-۲ تغذیه محوری نهایی
۹۲	..... ۳-۴ بهترین مسیر بارگذاری، معیار پارگی و پنجره فرآیند
۹۳	..... ۴-۴ بررسی اثر پارامترهای هندسی بر هندسه و توزیع ضخامت محصول
۹۴	..... ۱-۴-۴ طول ناحیه انبساط
۹۸	..... ۲-۴-۴ ارتفاع ناحیه انبساط
۱۰۰	..... ۳-۴-۴ شعاع گوشه قالب
۱۰۱	..... ۴-۴-۴ فاصله لبه لوله تا مرکز ناحیه انبساط
۱۰۲	..... ۵-۴ اثر ضریب اصطکاک (μ) بر هندسه و توزیع ضخامت محصول
۱۰۳	..... ۶-۴ اثر خواص ماده بر هندسه و توزیع ضخامت محصول
۱۰۳	..... ۱-۶-۴ توان کرنش سختی (n)
۱۰۵	..... ۱-۶-۴ ضریب استحکام (K)

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۱۰۶	..... ۱-۵ مقدمه
۱۰۶	..... ۲-۵ نتیجه گیری
۱۰۸	..... ۳-۵ پیشنهادها
۱۱۰	..... مراجع
۱۱۵	..... ضمیمه (نقشه های فنی)

فهرست شکل ها

صفحه

شکل

فصل اول: کلیات

- شکل (۱-۱): شماتیک مراحل فرآیند هیدروفرمینگ لوله..... ۶
- شکل (۲-۱): لوله های پله‌ای شکل داده شده با روش هیدروفرمینگ لوله با مقاطع دایره‌ای، چهارگوش و مخروطی..... ۷
- شکل (۳-۱): نمونه‌های پیچیده‌ای از لوله های پله‌ای شکل داده شده با روش هیدروفرمینگ لوله؛ قاب شاسی، شاسی موتور مونتاژ شده، لوله‌های کنگره‌ای، شیرآلات، آگروز، اجزای سیستم‌های آبرسانی..... ۷
- شکل (۴-۱): مسیرهای فشار مورد استفاده در تحقیق هاما و همکارانش..... ۱۶
- شکل (۵-۱): قطعات به دست آمده از آزمایش برای فشار ثابت پایین، فشار ثابت بالا و فشار نوسانی..... ۱۸
- شکل (۶-۱): شماتیک مدل تحلیلی در حین انبساط لوله در قالب مربعی قبل از انبساط و بعد از انبساط..... ۲۱

فصل دوم: مراحل آزمایشگاهی

- شکل (۱-۲): شماتیک فرآیند هیدروفرمینگ لوله پله ای استوانه ای، ابعاد به میلیمتر..... ۲۷
- شکل (۲-۲): دستگاه پرس انیورسال مورد استفاده در آزمایشگاه هیدروفرمینگ..... ۲۷
- شکل (۳-۲): اجزای قالب استفاده شده در آزمایش هیدروفرمینگ لوله پله‌ای استوانه‌ای..... ۲۸
- شکل (۴-۲): نمای برش خورده مجموعه مونتاژی اجزای قالب..... ۲۹
- شکل (۵-۲): اجزای مونتاژ شده قالب را بر روی دستگاه پرس در آزمایشگاه هیدروفرمینگ..... ۲۹
- شکل (۶-۲): مدار هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایشگاه هیدروفرمینگ..... ۳۰
- شکل (۷-۲): پمپ هیدرولیک مورد استفاده در آزمایشگاه هیدروفرمینگ..... ۳۱
- شکل (۸-۲): شیرها و اتصالات هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایشگاه هیدروفرمینگ..... ۳۱
- شکل (۹-۲): دستگاه کشش لوله به همراه نمونه کشش..... ۳۲
- شکل (۱۰-۲): منحنی تنش- کرنش حقیقی به دست آمده از آزمون کشش لوله SS316L..... ۳۲
- شکل (۱۱-۲): مسیر بارگذاری سه خطی به کار رفته در این تحقیق..... ۳۴
- شکل (۱۲-۲): مراحل بستن قالب..... ۳۵
- شکل (۱۳-۲): دستگاه پروفیل پروژکتور..... ۳۶
- شکل (۱۴-۲): ضخامت سنج آلتراسونیک..... ۳۶

فصل سوم: شبیه سازی اجزای محدود

- شکل (۳-۱): مدل سه بعدی (الف) لوله و (ب) قالب در محیط ایجاد قطعه در نرم افزار
۴۰ ABAQUS
- شکل (۳-۲): مجموعه مونتاژ شده لوله و قالب در محیط سرهم سازی (Assembly)
نرم افزار ABAQUS
۴۱
- شکل (۳-۳): شرایط مرزی لوله و قالب در محیط (Load) در نرم افزار ABAQUS
۴۳
- شکل (۳-۴): شبکه بندی لوله به وسیله المان S4R با تعداد المان بهینه در محیط
(Mesh) در نرم افزار ABAQUS
۴۵

فصل چهارم: نتایج و بحث

- شکل (۴-۱): مسیره های بارگذاری به کار رفته برای بررسی اثر فشار نهایی
۴۷
- شکل (۴-۲): هندسه به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود برای فشار های نهایی
(الف) ۱۸/۵ ، (ب) ۱۹ ، (ج) ۱۹/۵ ، (د) ۲۰ و (ه) ۲۰/۵ MPa
۴۹
- شکل (۴-۳): قطعات به دست آمده از آزمایش برای فشارهای نهایی (الف) ۱۸/۵ ، (ب) ۲۰ و
..... ۲۰/۵ MPa
۵۰
- شکل (۴-۴): پروفیل به دست آمده از آزمایش و شبیه سازی اجزای محدود برای فشار
نهایی ۲۰ MPa
۵۰
- شکل (۴-۵): پروفیل لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند،
برای فشار های نهایی (الف) ۱۸/۵ ، (ب) ۱۹ ، (ج) ۱۹/۵ ، (د) ۲۰ MPa
۵۱
- شکل (۴-۶): شعاع فرورفتگی و برآمدگی چروکیدگی لوله به دست آمده از شبیه سازی
اجزای محدود در پایان فرآیند، برای فشار های نهایی ۱۸/۵ ، ۱۹ ، ۱۹/۵ و
..... ۲۰ MPa
۵۲
- شکل (۴-۷): میزان چروکیدگی لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان
فرآیند، برای فشار های نهایی ۱۸/۵ ، ۱۹ ، ۱۹/۵ و (د) ۲۰ MPa
۵۳
- شکل (۴-۸): شعاع بالج لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در مرکز ناحیه
انبساط و در پایان فرآیند، برای فشار های نهایی ۱۸/۵ ، ۱۹ ، ۱۹/۵ و ۲۰ MPa
۵۴
- شکل (۴-۹): درصد پرشدگی حفره قالب به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود برای
فشارهای نهایی ۱۸/۵ ، ۱۹ ، ۱۹/۵ و ۲۰ MPa
۵۵
- شکل (۴-۱۰): توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان
فرآیند، برای فشارهای نهایی (الف) ۱۸/۵ ، (ب) ۱۹ ، (ج) ۱۹/۵ ، (د) ۲۰ و (ه) ۲۰/۵ MPa
۵۸
- شکل (۴-۱۱): الگوی تغییرات ضخامت لوله به دست آمده از روش اجزای محدود، در فشار
نهایی ۲۰/۵ MPa و تغذیه محوری ۱۶mm
۵۸

- شکل (۴-۱۲): میزان فرورفتگی و برآمدگی توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای فشارهای نهایی ۱۹، ۱۸/۵ و ۱۹/۵MPa. ۵۹
- شکل (۴-۱۳): عدم یکنواختی توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای فشارهای نهایی ۱۹، ۱۸/۵ و ۱۹/۵MPa..... ۶۰
- شکل (۴-۱۵): میانگین ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در ناحیه تغذیه و در پایان فرآیند، برای فشارهای نهایی ۱۹، ۱۸/۵، ۱۹/۵ و ۲۰/۵MPa.... ۶۱
- شکل (۴-۱۶): میانگین ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در نیمه راست و چپ ناحیه انبساط و در پایان فرآیند، برای فشارهای نهایی ۱۹، ۱۸/۵، ۱۹/۵، ۲۰ و ۲۰/۵MPa..... ۶۲
- شکل (۴-۱۷): توزیع ضخامت بدست آمده از آزمایش و شبیه سازی اجزای محدود برای فشار نهایی ۲۰MPa..... ۶۲
- شکل (۴-۱۸): مسیرهای بارگذاری به کار رفته برای بررسی اثر فشار اولیه..... ۶۳
- شکل (۴-۱۹): هندسه به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود برای فشار های اولیه الف) ۱۱، ب) ۱۲، ج) ۱۳، د) ۱۴ و ه) ۱۵MPa..... ۶۴
- شکل (۴-۲۰): قطعات به دست آمده از آزمایش برای فشارهای اولیه الف) ۱۱، ب) ۱۴ و : ۱۵MPa..... ۶۵
- شکل (۴-۲۱): پروفیل به دست آمده از آزمایش و شبیه سازی اجزای محدود برای فشار اولیه ۱۱MPa..... ۶۵
- شکل (۴-۲۲): پروفیل به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای فشار های اولیه الف) ۱۱، ب) ۱۲، ج) ۱۳، د) ۱۴MPa..... ۶۶
- شکل (۴-۲۳): شعاع فرورفتگی و برآمدگی چروکیدگی لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای فشارهای اولیه ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴MPa..... ۶۷
- شکل (۴-۲۴): میزان چروکیدگی لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای فشارهای اولیه ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴MPa..... ۶۸
- شکل (۴-۲۵): شعاع بالچ لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در مرکز ناحیه انبساط و در پایان فرآیند، برای فشارهای اولیه ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴MPa..... ۶۹
- شکل (۴-۲۶): درصد پرشدگی حفره قالب به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود برای فشارهای نهایی ۱۹، ۱۸/۵، ۱۹/۵ و ۲۰MPa..... ۶۹
- شکل (۴-۲۷): توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای فشارهای اولیه الف) ۱۱، ب) ۱۲، ج) ۱۳، د) ۱۴ و ه) ۱۵MPa..... ۷۱
- شکل (۴-۲۸): الگوی تغییرات ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود، در فشار اولیه ۱۵MPa و تغذیه محوری ۱۶mm..... ۷۲

- شکل (۴-۲۹): میانگین ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در ناحیه انبساط و در پایان فرآیند، برای فشارهای اولیه ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵MPa ۷۳
- شکل (۴-۳۰): توزیع ضخامت بدست آمده از آزمایش و شبیه سازی اجزای محدود برای فشار اولیه ۱۱MPa ۷۳
- شکل (۴-۳۱): مسیرهای بارگذاری به کار رفته برای بررسی اثر تغذیه محوری اولیه ۷۴
- شکل (۴-۳۲): هندسه به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود برای تغذیه های محوری اولیه (الف) ۱۸، (ب) ۱۵، (ج) ۱۲، (د) ۹ و (ه) ۶mm ۷۵
- شکل (۴-۳۳): قطعات به دست آمده از آزمایش برای تغذیه های محوری اولیه (الف) ۱۵، (ب) ۹ و (ج) ۶mm ۷۶
- شکل (۴-۳۵): پروفیل بدست آمده از آزمایش و شبیه سازی برای تغذیه محوری اولیه ۱۵mm ۷۶
- شکل (۴-۳۶): پروفیل لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای تغذیه های محوری اولیه (الف) ۱۸، (ب) ۱۵، (ج) ۱۲، (د) ۹mm ۷۷
- شکل (۴-۳۷): شعاع فرورفتگی و برآمدگی چروکیدگی لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای تغذیه های محوری اولیه ۱۸، ۱۵، ۱۲ و ۹mm ۷۸
- شکل (۴-۳۸): میزان چروکیدگی لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای تغذیه های محوری اولیه ۱۸، ۱۵، ۱۲ و ۹mm ۷۹
- شکل (۴-۳۹): شعاع بالچ لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در مرکز ناحیه انبساط و در پایان فرآیند، برای تغذیه های محوری اولیه ۱۸، ۱۵، ۱۲ و ۹mm ۷۹
- شکل (۴-۴۰): درصد پرشدگی حفره قالب به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود برای تغذیه های محوری اولیه ۱۸، ۱۵، ۱۲ و ۹mm ۸۰
- شکل (۴-۴۱): توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در مراحل مختلف بارگذاری، برای تغذیه های محوری اولیه (الف) ۱۸، (ب) ۱۵، (ج) ۱۲، (د) ۹ و (ه) ۶mm ۸۲
- شکل (۴-۴۲): الگوی تغییرات ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود، در تغذیه محوری اولیه ۶mm و تغذیه محوری ۱۸mm ۸۲
- شکل (۴-۴۳): میانگین ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در ناحیه انبساط و در پایان فرآیند، برای تغذیه های محوری اولیه ۱۸، ۱۵، ۱۲، ۹ و ۶mm ۸۳
- شکل (۴-۴۴): توزیع ضخامت به دست آمده از آزمایش و شبیه سازی اجزای محدود، برای تغذیه محوری اولیه ۱۵mm ۸۳
- شکل (۴-۴۵): مسیرهای بارگذاری به کار رفته برای بررسی اثر تغذیه محوری نهایی ۸۴
- شکل (۴-۴۶): هندسه به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود برای تغذیه های محوری نهایی (الف) ۱۴، (ب) ۱۶، (ج) ۱۸، (د) ۲۰ و (ه) ۲۲mm ۸۵

- شکل (۴-۴۷): قطعات به دست آمده از آزمایش برای تغذیه های محوری نهایی الف) ۱۴،
 ۸۶ ۲۰ و ج) ۲۲mm
- شکل (۴-۴۸): پروفیل بدست آمده از آزمایش و شبیه سازی برای تغذیه محوری نهایی
 ۸۶ ۱۴mm
- شکل (۴-۴۹): پروفیل لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند،
 ۸۷ ۲۰mm (د) ۱۸، ۱۶ (ب) ۱۴، ج) ۱۸، د) ۲۰
- شکل (۴-۵۰): شعاع بالچ لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در مرکز ناحیه
 ۸۸ ۹mm و ۱۲، ۱۵، ۱۸
- شکل (۴-۵۱): توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان
 ۸۹ ۲۲mm (ه) ۲۰ و ۲۲mm
- شکل (۴-۵۲): الگوی تغییرات ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود،
 ۹۰ ۲۱mm و تغذیه محوری ۲۲mm
- شکل (۴-۵۳): میانگین ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در ناحیه
 ۹۱ ۲۲mm و ۲۰، ۱۸، ۱۶، ۱۴
- شکل (۴-۵۴): توزیع ضخامت بدست آمده از آزمایش و شبیه سازی اجزای محدود برای
 ۹۱ ۱۴mm نهایی محوری نهایی
- شکل (۴-۵۵): پنجره فرآیند هیدروفرمینگ لوله پله ای با مقطع دایره ای از جنس
 ۹۳ SS316L
- شکل (۴-۵۶): پارامترهای هندسی مورد بررسی در این بخش، ابعاد به میلیمتر.....
 ۹۴ ۲۵mm (د) ۵۰، ج) ۷۵، ب) ۱۰۰، الف) ۱۰۰
- شکل (۴-۵۷): پروفیل لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند،
 ۹۶ ۲۵mm (د) ۵۰، ج) ۷۵، ب) ۱۰۰، الف) ۱۰۰
- شکل (۴-۵۸): توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان
 ۹۷ ۲۵mm (د) ۵۰، ج) ۷۵، ب) ۱۰۰، الف) ۱۰۰
- شکل (۴-۵۹): پروفیل لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند،
 ۹۸ ۴mm (ب) ۵/۵ و ج) ۴mm
- شکل (۴-۶۰): توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان
 ۹۹ ۴mm (ب) ۵/۵ و ج) ۴mm
- شکل (۴-۶۱): پروفیل لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند،
 ۱۰۰ ۵mm و ۳، ۱
- شکل (۴-۶۲): توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان
 ۱۰۱ ۵mm و ۳، ۱
- شکل (۴-۶۳): پروفیل لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند،
 ۱۰۱ ۱۴۵mm و ۱۲۵، ۱۰۵، شامل ۱۰۵، ۱۲۵ و ۱۴۵mm

- شکل (۴-۶۴): توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای فواصل مختلف لبه لوله تا مرکز قالب شامل ۱۰۵، ۱۲۵ و ۱۴۵mm ۱۰۲
- شکل (۴-۶۵): پروفیل لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای ضرایب اصطکاک (μ)، ۰، ۰/۰۶ و ۰/۱ ۱۰۳
- شکل (۴-۶۶): توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای ضرایب اصطکاک (μ)، ۰، ۰/۰۶ و ۰/۱ ۱۰۳
- شکل (۴-۶۷): پروفیل لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای توان های کرنش سختی (n) ۰/۴۴، ۰/۴۷ و ۰/۵ ۱۰۴
- شکل (۴-۶۸): توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای توان های کرنش سختی (n) ۰/۴۴، ۰/۴۷ و ۰/۵ ۱۰۴
- شکل (۴-۶۹): پروفیل لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای ضریب های استحکام (K) ۱۴۴۰، ۱۴۷۰ و ۱۵۰۰MPa ۱۰۵
- شکل (۴-۷۰): توزیع ضخامت لوله به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود در پایان فرآیند، برای ضریب های استحکام (K) ۱۴۴۰، ۱۴۷۰ و ۱۵۰۰MPa ۱۰۵

فهرست جداول

صفحه

جدول

فصل دوم: مراحل آزمایشگاهی

جدول (۱-۲): خواص مکانیکی و ابعاد لوله اولیه به کار رفته در آزمایش..... ۳۳

جدول (۲-۲): ترکیب شیمیایی لوله SS316L..... ۳۳

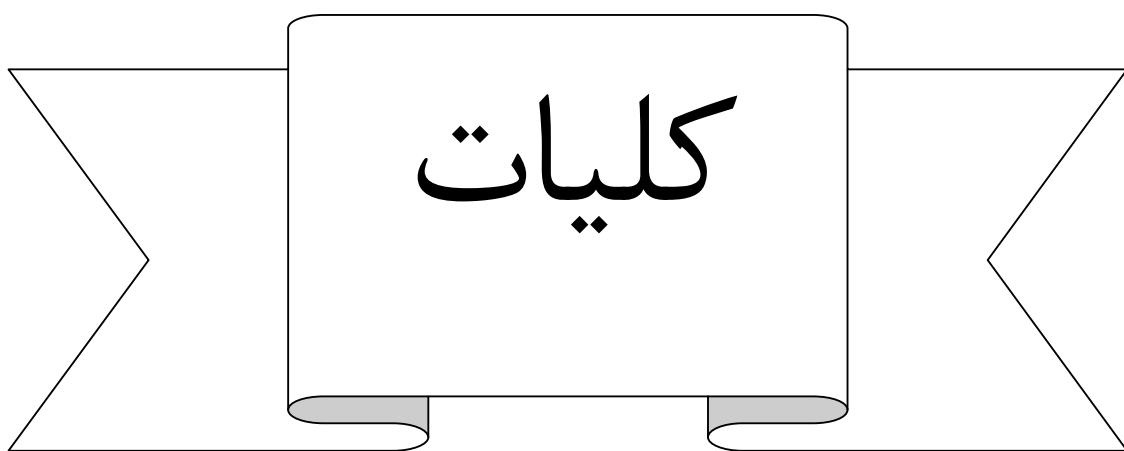
فصل سوم: شبیه سازی اجزای محدود

جدول (۱-۳): نتایج شبیه سازی ها با تعداد دانه های مختلف در محیط (Mesh) در

نرم افزار ABAQUS..... ۴۵

فهرست علائم اختصاصی

تنش جریان ماده	σ
کرنش معادل	ε
ضریب استحکام	K
توان کرنش سختی	n
سطح مقطع کل حفره قالب	A_0
سطح مقطع پر شده قالب	A
ضخامت اولیه لوله	t_0
ضخامت لوله در حین فرآیند	t



فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

با پیشرفت روز افزون تکنولوژی و رقابتی تر شدن بازار تجارت، شرکت‌های تولید کننده خودرو برای ماندن در عرصه رقابت به سمت کاهش هزینه و زمان تولید و همچنین تولید محصولات سبکتر، کم مصرف تر و باکیفیت بالاتر و سیستم تولید انعطاف پذیر روی آورده اند. به همین دلیل استفاده از مواد جدید و فرآیندهای تولید پیشرفته مدنظر قرار گرفته است [۱].

با در نظر گرفتن مسایل ذکر شده محققان و صنعتگران به سمت فرآیندهای تولیدی جدید روی آورده اند. یکی از فرآیندهایی که امروزه به شدت توجه تولید کنندگان را به خود جلب نموده، استفاده از محیط‌های انعطاف پذیر در تولید قطعات توخالی و پیچیده است. مخصوصاً استفاده از سیال با فشار بالا به جای ابزار صلب، فرآیندی است که به دلیل نیاز به تکنولوژی نسبتاً بالا، کاربرد آن تا مدت‌ها محدود به موارد خاص بود. اما با پیشرفت تکنولوژی، ماشین‌آلات تولیدی، سیستم‌های آب‌بندی، و فرآیندهای کنترل کامپیوتری در دهه اخیر، شکل‌دهی با فشار سیال به صورت یک روش شکل‌دهی قابل استفاده در صنعت به جهانیان معرفی گردید [۱].

در این فصل، ابتدا فرآیندهای شکل‌دهی فلزات معرفی و دسته بندی می‌گردد و به جایگاه هیدروفرمینگ در بین آنها اشاره می‌شود. بعد از معرفی هیدروفرمینگ و انواع آن، پژوهش‌های انجام شده پیرامون هیدروفرمینگ لوله و اهداف و ویژگی‌های پایان نامه حاضر ارایه خواهد شد.

۱-۲ شکل دهی فلزات

از دیدگاه کلی، فرآیندهای تولید محصولات فلزی و مونتاژ آنها را می توان به پنج دسته تقسیم نمود که عبارتند از [۲]:

۱- فرآیندهای شکل دهی اولیه، نظیر ریخته گری، حدیده کاری مذاب و ریختگری در قالب

که در آنها ماده در ابتدا بی شکل است اما از طریق فرآیند، هندسه به خوبی تعریف شده ای خواهد یافت.

۲- فرآیندهای شکل دهی فلزات نظیر نوردکاری، حدیده کاری، آهنگری، خمکاری و کشش عمیق که در آنها فلز در اثر تغییر شکل مومسان، شکل داده می شود.

۳- فرآیندهای برش فلزات، نظیر اره کاری، تراشکاری، فرزکاری و خان کشی که در آنها براده برداری موجب ایجاد شکل جدید می شود.

۴- فرآیندهای عملیات روی فلزات، نظیر عملیات حرارتی، آندکاری و سختکاری سطحی که در آنها شکل قطعه کار لزوماً تغییر نمی کند اما خواص یا ظاهر آن تغییر می کند.

۵- فرآیندهای اتصالی، شامل (الف) اتصال دهی متالورژیکی نظیر جوشکاری و لحیم کاری و (ب) اتصال دهی مکانیکی مانند پرچکاری، جازدن انقباضی و مونتاژ مکانیکی.

در بین تمام فرآیندهای تولید، فناوری شکل دهی فلزات دارای جایگاه ویژه ای است، زیرا موجب تولید قطعات با خواص مکانیکی بهتر و با حداقل اتلاف مواد می گردد. در شکل دهی فلزات، ماده اولیه دارای هندسه نسبتاً ساده ای است. ماده در طی یک یا چند عملیات، تغییر شکل مومسان می یابد و به هندسه نسبتاً پیچیده ای در می آید. شکل دهی به ابعاد نهایی یا نزدیک به ابعاد نهایی شدیداً موجب کاهش براده برداری می شود و در نتیجه موجب صرفه جویی قابل توجه در مواد و انرژی می گردد. شکل دهی فلزات معمولاً به ابزاربندی نسبتاً پرهزینه ای نیاز دارد. از این رو، این فرآیند تنها زمانی از دیدگاه اقتصادی جذاب است که تعداد زیادی از قطعات تولید شوند یا هنگامی

که خواص مکانیکی مورد نظر در محصول نهایی را صرفاً با یک فرآیند شکل دهی بتوان به دست آورد [۲].

شکل دهی فلزات شامل تعداد زیادی از فرآیندهای تولید است که از طریق آنها محصولات صنعتی، قطعات نظامی و کالاهای مصرفی تولید می شوند. به طور کلی فرآیندهای شکل دهی فلزات را می توان به دو گروه عمده دسته بندی کرد که عبارتند از [۲]:

۱- شکل دهی حجمی مانند آهنگری، نورد و کشش.

۲- شکل دهی ورق مانند کشش عمیق و خمکاری.

فرآیندهای شکل دهی فلزات غالباً همراه با سایر فرآیندهای تولید نظیر ماشینکاری، سنگ زنی و عملیات حرارتی مورد استفاده قرار می گیرند تا تبدیل ماده خام را به قطعه نهایی و آماده مونتاژ کامل کنند.

۳-۱ هیدروفرمینگ

هیدروفرمینگ یکی از فرآیندهای شکل دهی ورق های فلزی می باشد که حداقل از قبل از جنگ جهانی دوم به کار گرفته شده است. در آن زمان، کاربرد این فرآیند در صنعت هواپیماسازی، به علت عیوب موجود در قطعات تولیدی و عدم انجام تحقیقات و آزمایش های عملی کافی، محدود به قطعات خاصی بوده است، ولی از سال ۱۹۹۰، کاربرد هیدروفرمینگ در بسیاری از صنایع به ویژه صنایع خودروسازی به طور فزاینده ای رشد کرده است [۳].

در فرآیند هیدروفرمینگ، قطعه خام اولیه، در اثر اعمال فشار سیال به شکل حفره درون قالب در می آید. قطعه خام اولیه معمولاً به صورت ورق یا لوله است. اگر در این فرآیند از ورق استفاده شود، آن را فرآیند هیدروفرمینگ ورق^۱ و در صورت استفاده از مقاطع لوله ای، آن را فرآیند