

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
دانشکده مهندسی مکانیک

عنوان:

مطالعه تأثیر پارامترهای مؤثر در شکل‌دهی صفحات دوقطبی با شیار مارپیچ موازی با
روش هیدروفورمینگ با استفاده از روش‌های تجربی و شبیه‌سازی

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

اساتید راهنما:

دکتر محمد بخشی

دکتر سید جمال حسینی پور

استاد مشاور:

دکتر عبدالحمید گرجی

نگارش:

نفیسه محمدتبار

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به:

پدرم بابوسه بردستانش که وجودش مایه دلگرمی ام است

و

مادرم بابوسه بردستانش که وجودش برایم همه مهر است

و

خواهر عزیزم که عطر حضورش تکرار خوشی‌های من است

و

دخوشی همیشگی ام؛ برادر عزیزم که صفایش مایه آرامش من است

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او را ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

بی شک جایگاه و منزلت استاد، بزرگتر از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از استاد، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ برحسب وظیفه بر خود واجب می‌دانم که:

از زحمات بی‌دریغ اساتید راهنمای گرامی، آقایان دکتر بخشی و دکتر حسینی‌پور که با ایجاد عشق به نوشتن، صبورانه، با ارائه‌ی رهنمودها، انتقادهای و پیشنهادهایشان، در تمامی مراحل اجرای پایان‌نامه مرا حمایت و تشویق نموده‌اند و جناب آقای دکتر گرجی که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننموده‌اند و زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید؛ کمال سپاس و قدردانی را دارم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

همچنین از آقایان مهندس قربان محمدعلی‌نژاد، مهندس جمشید صادقی و مهندس غلامرضا میانسری که در تهیه قالب‌های موردنیاز همواره صمیمانه با اینجانب همکاری داشتند و از هیچ مساعدتی فروگذار نکردند، کمال سپاس و قدردانی را دارم.

در پایان بر خود ملزم می‌دانم که از کمک‌های بی‌دریغ جناب آقای مهندس اوصیا که صادقانه در طول اجرای پایان‌نامه مرا همراهی نمودند، صمیمانه قدردانی نمایم. همچنین از همه خوبانی که با همکاری و همراهی‌شان این پروژه به نتیجه رسید، تشکر می‌نمایم.

چکیده

صفحات دوقطبی یکی از مهمترین اجزای پیل سوختی بشمار می‌آیند که بیشترین وزن و هزینه را در ساخت آن به خود اختصاص می‌دهند. در صنعت این قبیل صفحات را با روش‌های متنوعی همچون استمپینگ، شکل‌دهی با لایه لاستیکی، شکل‌دهی الکترومغناطیسی و هیدروفرمینگ تولید می‌کنند که هر کدام از آنها دارای معایب خاص خود می‌باشند. در این بین، فرآیند هیدروفرمینگ به دلیل دارا بودن مزایای متعدد، بعنوان یک روش کاربردی در شکل‌دهی صفحات دوقطبی با الگوی پیچیده مطرح است. صفحات دوقطبی دارای هندسه مسیر جریان سیال مختلفی هستند که عبارتند از: شیاری، پینی، متصل بهم و مارپیچ. در این میان، شکل‌دهی الگوی شیاری مارپیچ به دلیل پیچیدگی و دقت هندسی بالای الگوی مسیر جریان، فاصله کم بین شیارها و نیز ضخامت بسیار کم ورق، کار بسیار مشکلی است. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه الگوهای شیاری صورت گرفته است اما نکته قابل توجهی که در شکل‌دهی این الگوها از اهمیت خاصی برخوردار است، دستیابی به نسبت عمق به عرض بالا در کانال‌ها می‌باشد که در این پژوهش مدنظر قرار داده شده است. از طرفی پژوهش‌هایی که تاکنون در زمینه شکل‌دهی الگوهای شیار مارپیچی انجام شده محدود به شکل‌دهی به روش لایه لاستیکی بوده و تاکنون شکل‌دهی این الگوی پیچیده به روش هیدروفرمینگ بررسی نشده است. از این رو در این پژوهش، قابلیت شکل‌دهی صفحات دوقطبی با الگوی شیار مارپیچ موازی به کمک روش هیدروفرمینگ به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، صفحاتی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به ضخامت ۰/۱۱ میلی‌متر شکل داده شدند و تاثیر برخی از پارامترهای هندسی و فرآیندی بر شکل‌دهی این صفحات مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که حالت مطلوب برای شکل‌دهی صفحات، شیارهایی به پهنای دیواره ۰/۶۵ میلی‌متر، عرض ۱/۵ میلی‌متر، زاویه دیواره ۱۰ درجه، شعاع فیلد داخلی ۰/۲ و خارجی ۰/۳ میلی‌متر و نسبت شعاع مارپیچ کانال ۲ می‌باشد. با دستیابی به پارامترهای هندسی و فرآیندی مطلوب، امکان شکل‌دهی صفحاتی با نسبت عمق به عرض بالا در حدود ۰/۵۳ در حالت مقعر و ۰/۶۲ در حالت محدب و با درصد پرشدگی ۹۵/۹۱٪ در حالت کلی میسر گردید.

واژگان کلیدی: پیل سوختی، صفحات دوقطبی، هیدروفرمینگ، شکل‌دهی فلزات

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

۱	
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- تعریف فرآیند هیدروفرمینگ
۴	۳-۱- معرفی انواع اصلی فرآیند هیدروفرمینگ
۴	۱-۳-۱- هیدروفرمینگ لوله
۵	۲-۳-۱- هیدروفرمینگ ورق
۵	۴-۱- تشریح روش هیدروفرمینگ ورق
۵	۱-۴-۱- روش‌های ماتریس- سیال
۷	۲-۴-۱- روش‌های هیدروفرمینگ سنبه- سیال
۷	۳-۴-۱- روش ترکیبی هیدروفرمینگ
۸	۵-۱- تکنولوژی پیل سوختی
۹	۶-۱- اجزاء تشکیل دهنده یک سلول پیل سوختی، ویژگی‌ها و وظایف آنها
۹	۱-۶-۱- غشای پلیمری متخلخل (PEM)
۹	۲-۶-۱- الکتروود
۱۰	۳-۶-۱- صفحات دوقطبی
۱۱	۷-۱- نحوه عملکرد یک سلول پیل سوختی
۱۳	۸-۱- طراحی حوزه جریان
۱۴	۹-۱- روش‌های ساخت صفحات دوقطبی
۱۵	۱-۹-۱- صفحات دوقطبی گرافیتی
۱۵	۲-۹-۱- صفحات دوقطبی کامپوزیتی پلیمر- گرافیت
۱۶	۳-۹-۱- صفحات دوقطبی کامپوزیتی کربن- کربن
۱۷	۴-۹-۱- صفحات دوقطبی فلزی
۱۹	۱۰-۱- اهداف پژوهش
۲۰	۱۱-۱- مراحل انجام پژوهش

فصل دوم: مروری بر پژوهش‌های انجام شده

۲۱

- ۱-۲- مقدمه ۲۲
- ۲-۲- شکل‌دهی صفحات دوقطبی به روش هیدروفورمینگ ۲۲
- ۳-۲- شکل‌دهی صفحات دوقطبی به روش استمپینگ ۳۰
- ۴-۲- مقایسه شکل‌دهی صفحات دوقطبی به روش‌های هیدروفورمینگ و استمپینگ ۳۴
- ۵-۲- شکل‌دهی صفحات دوقطبی به روش شکل‌دهی با لایه لاستیکی ۳۷

فصل سوم: مراحل آزمایشگاهی

۴۷

- ۱-۳- مقدمه ۴۸
- ۲-۳- معرفی فرآیند شکل‌دهی ۴۸
- ۳-۳- معرفی دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایشات تجربی ۴۹
- ۱-۳-۳- دستگاه پرس ۴۹
- ۲-۳-۳- واحد اعمال فشار ۴۹
- ۳-۳-۳- سیال هیدرولیکی ۵۱
- ۴-۳-۳- ورق مورد آزمایش ۵۱
- ۵-۳-۳- قالب مورد استفاده و اجزای آن ۵۱
- ۴-۳- معرفی پارامترهای مورد بررسی ۵۴
- ۵-۳- مراحل انجام آزمایش ۵۵
- ۶-۳- فرآیند آنیل‌کاری ورق ۵۶
- ۷-۳- تعیین خواص مکانیکی ورق ۵۷
- ۸-۳- روش تعیین توزیع ضخامت و پروفیل شکل داده شده نمونه‌ها ۶۰

فصل چهارم: شبیه‌سازی اجزای محدود

۶۴

- ۱-۴- مقدمه ۶۵
- ۲-۴- شبیه‌سازی اجزای محدود با استفاده از Abaqus/CAE ۶۶
- ۱-۲-۴- ایجاد مدل هندسی ۶۷

۶۸.....	۲-۲-۴- تعیین خصوصیات ورق
۶۹.....	۳-۲-۴- مونتاژ ورق و قالب
۷۰.....	۴-۲-۴- مراحل شکل‌دهی
۷۱.....	۵-۲-۴- تعیین تماس بین سطوح
۷۱.....	۶-۲-۴- شرایط مرزی و بارگذاری
۷۳.....	۷-۲-۴- المان‌بندی
۷۶.....	۸-۲-۴- تحلیل فرآیند
۷۷.....	۹-۲-۴- مشاهده نتایج

فصل پنجم: نتایج و بحث ۷۸

۷۹.....	۱-۵- مقدمه
۷۹.....	۲-۵- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی
۸۳.....	۳-۵- بررسی اثر پارامترهای هندسی قالب بر شکل‌دهی صفحات دوقطبی
۸۴.....	۱-۳-۵- اثر پهنای دیواره کانال (s) بر شکل‌دهی صفحات دوقطبی
۸۶.....	۲-۳-۵- اثر عرض کانال (w) بر شکل‌دهی صفحات دوقطبی
۹۲.....	۳-۳-۵- اثر زاویه دیواره کانال (α) بر شکل‌دهی صفحات دوقطبی
۹۶.....	۴-۳-۵- اثر شعاع فیلت خارجی (R) و شعاع فیلت داخلی (r) بر شکل‌دهی صفحات دوقطبی
۱۰۰.....	۵-۳-۵- اثر نسبت شعاع مارپیچ کانال (r_2/r_1) بر شکل‌دهی صفحات دوقطبی
۱۰۱.....	۴-۵- بررسی اثر پارامتر فرآیندی بر شکل‌دهی صفحات دوقطبی
۱۰۱.....	۱-۴-۵- اثر فشار در شکل‌دهی یک مرحله‌ای
۱۰۲.....	۱-۱-۴-۵- بررسی اثر فشار بر توزیع ضخامت و درصد نازک‌شدگی در شکل‌دهی یک مرحله‌ای
۱۰۶.....	۲-۱-۴-۵- بررسی اثر فشار بر پروفیل و درصد پرشدگی در شکل‌دهی یک مرحله‌ای
۱۰۹.....	۳-۱-۴-۵- تکرارپذیری
۱۱۳.....	۲-۴-۵- اثر فشار در شکل‌دهی دو مرحله‌ای
۱۱۴.....	۱-۲-۴-۵- بررسی اثر فشار بر توزیع ضخامت در شکل‌دهی دو مرحله‌ای
۱۱۵.....	۲-۲-۴-۵- بررسی اثر فشار بر پروفیل و درصد پرشدگی در شکل‌دهی دو مرحله‌ای
۱۱۶.....	۳-۴-۵- اثر فشار در شکل‌دهی دومرحله‌ای با یک مرحله آنیل‌کاری میانی

۱-۳-۴-۵- بررسی اثر فشار بر توزیع ضخامت و درصد نازک‌شدگی در شکل‌دهی دومرحله‌ای با یک مرحله آنیل‌کاری میانی.....	۱۱۷
۲-۳-۴-۵- بررسی اثر فشار بر پروفیل و درصد پرشدگی در شکل‌دهی دومرحله‌ای با یک مرحله آنیل‌کاری میانی.....	۱۲۰
۴-۴-۵- اثر فشار در شکل‌دهی سه مرحله‌ای.....	۱۲۱
۱-۴-۴-۵- بررسی اثر فشار بر توزیع ضخامت در شکل‌دهی سه مرحله‌ای.....	۱۲۲
۲-۴-۴-۵- بررسی اثر فشار بر پروفیل و درصد پرشدگی در شکل‌دهی سه مرحله‌ای.....	۱۲۳
۵-۵- جمع‌بندی نتایج در دو حالت محدب و مقعر.....	۱۲۴

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۲۷

۱-۶- مقدمه.....	۱۲۸
۲-۶- نتیجه‌گیری.....	۱۲۸
۳-۶- پیشنهادها.....	۱۳۱

فهرست مراجع ۱۳۱

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) نمونه‌هایی از قطعات شکل داده شده به کمک روش هیدروفرمینگ، الف) لوله پله‌ای هیدروفرم شده [۶]، ب) قطعه شکل داده شده با فرآیند چندمرحله‌ای هیدروفرمینگ [۷]، ج) آگزوز هیدروفرم شده [۸]، د) قطعه شکل داده شده با فرآیند هیدروفرمینگ با دیافراگم لاستیکی [۹]، ه) قطعه مخروطی هیدروفرم شده از جنس مس [۱۰]..... ۳
- شکل (۲-۱) مراحل مختلف فرآیند هیدروفرمینگ لوله [۸]..... ۴
- شکل (۳-۱) شماتیک فرآیند هیدروفرمینگ ورق، الف) پیش از فرآیند، ب) پس از فرآیند [۱۳]..... ۵
- شکل (۴-۱) شماتیک انواع مختلف روش‌های ماتریس سیال، الف) هیدروفرمینگ استاندارد (هیدروفرمینگ با دیافراگم لاستیکی) [۹]، ب) کشش عمیق هیدرومکانیکی - هیدرواستاتیکی [۱۱]، ج) روش کشش عمیق هیدرومکانیکی - هیدرودینامیکی [۱۷]، د) کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۱۷]، ه) کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار یکنواخت روی ورق [۱۸]، و) کشش عمیق هیدروریم [۹]..... ۶
- شکل (۵-۱) الف) شماتیک فرآیند هیدروفرمینگ سنبه - سیال [۱۹]، ب) نمایی از نمونه هیدروفرم شده با الگوی تکرار شونده شیاری [۲۰]..... ۷
- شکل (۶-۱) شماتیک روش ترکیبی هیدروفرمینگ [۱۹]..... ۸
- شکل (۷-۱) یک مجموعه پیل سوختی غشاء تبادل پروتون (PEFMC) نمونه [۲۳]..... ۹
- شکل (۸-۱) ساختار پایه یک صفحه دوقطبی [۲۷]..... ۱۰
- شکل (۹-۱) شماتیک عملکرد یک پیل سوختی [۲۸]..... ۱۲
- شکل (۱۰-۱) نمودار تفکیک هزینه‌ها برای، الف) پیل سوختی، ب) یک استک پیل سوختی [۲۹]..... ۱۳
- شکل (۱۱-۱) انواع شکل حوزه جریان، الف) مارپیچ، ب) موازی، ج) متصل به هم، د) پین شکل [۳۰ و ۳۱]..... ۱۳
- شکل (۱۲-۱) انواع مواد مورد استفاده در صفحات دوقطبی، الف) صفحه گرافیتی ماشینکاری شده، ب) صفحه استمپ شده از جنس فولاد زنگ‌نزن، ج) صفحه قالبگیری شده از جنس کربن - کربن، د) صفحه فتو اچ شده از جنس فولاد زنگ‌نزن / تیتانیوم، ه) صفحه کامپوزیتی پلیمر - کربن قالبگیری شده، و) صفحه فلزی شکل داده شده به روش شکل‌دهی با لایه لاستیکی [۲۷] ۱۴
- شکل (۱۳-۱) صفحات دوقطبی میکرو EDM از جنس، الف) فولاد زنگ‌نزن L ۳۱۶ [۴۵]، ب) فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ [۴۶]..... ۱۸
- شکل (۱-۲) طرح مفهومی فرآیند ترکیبی شکل‌دهی و اتصال‌دهی صفحات دوقطبی فلزی [۲۷]..... ۲۳
- شکل (۲-۲) نمایی از تجهیزات هیدروفرمینگ استفاده شده در پژوهش‌های ماها بانفاچای و همکاران [۴ و ۲۷]..... ۲۳
- شکل (۳-۲) قالب‌های استفاده شده به منظور انجام آزمایشات تجربی به همراه ابعاد هندسی این قالب‌ها [۴]..... ۲۴
- شکل (۴-۲) نمونه‌های میکروکانال شکل داده شده با استفاده از ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با ضخامت ۰/۰۵۱ میلی‌متر [۴]..... ۲۴
- شکل (۵-۲) اندازه پروفیل میکروکانال‌های شکل داده شده به کمک اسکرن لیزری، الف) نمونه تک شیاری، ب) نمونه ۳ شیاری، ج) نمونه ۶ شیاری [۴]..... ۲۵

شکل (۲-۶) تغییرات ابعادی مربوط به سه ناحیه ابتدا، وسط و انتهای شیارهای شکل داده شده [۴]..... ۲۶

شکل (۲-۷) الف) اثر تغییرات نسبت w/t_0 بر نسبت h/w در میزان نازک‌شدگی ۲۵٪، ب) اثر تغییرات نسبت R_d/t_0 در سه زاویه دیواره ۵، ۱۰ و ۲۰ درجه بر نسبت h/w در میزان نازک‌شدگی ۲۵٪/ [۴]..... ۲۶

شکل (۲-۸) بالا: تصاویری از هندسه‌ها و کانال‌های مختلف شکل داده شده از جنس فویل مسی، پایین: شماتیک کلی از روش شکل‌دهی استفاده شده [۵۶]..... ۲۷

شکل (۲-۹) الف) نمای برش خورده از نمونه‌هایی با عرض دیواره ۱۲ و عرض شیار به ترتیب ۱۵، ۹، ۴ و ۱ میلی‌متر؛ ب) منحنی مربوط به کرنش ضخامتی کانال‌های شکل داده شده بر روی فویل مسی با قالب ویفر سیلیکونی [۵۶]..... ۲۸

شکل (۲-۱۰) نمایی از کانال‌های شکل داده شده بر روی فویل فولاد زنگ‌نزن AISI ۳۰۴ [۵۶]..... ۲۹

شکل (۲-۱۱) الف) شماتیک محفظه فشار بالا، ب) نقشه دو بعدی قالب بکار رفته، ج) قالب ماشینکاری شده، د) چند نمونه از صفحات شکل داده شده [۵۷]..... ۲۹

شکل (۲-۱۲) الف) نتایج مربوط به اسکن لیزری به منظور اندازه‌گیری پروفیل شکل داده شده، ب) نتایج مربوط به روند تغییرات میانگین عمق شکل داده شده در سطوح فشار مختلف [۵۷]..... ۳۰

شکل (۲-۱۳) نمودار شماتیک فرآیند استمپینگ چندمرحله‌ای (MSS) [۵۸]..... ۳۱

شکل (۲-۱۴) تصویر نمونه شکل داده شده، برش سیمی ساختار شیاری شکل داده شده و مقایسه طول اولیه ورق (مقدار: ۱) و طول تغییرشکل یافته سطح مقطع (مقدار: ۱/۱۷) در یک سلول واحد: نسبت طول = ۱:۱/۱۷ [۵۸]..... ۳۲

شکل (۲-۱۵) شماتیک فرآیند تست کشش چندمرحله‌ای (MST) [۵۸]..... ۳۲

شکل (۲-۱۶) تجهیزات آزمایش استمپینگ [۵۸]..... ۳۳

شکل (۲-۱۷) نمای شماتیک شکل و ابعاد قالب: قالب و سنبه منطبق، ساختار تغییرشکل یافته ورق [۵۸]..... ۳۳

شکل (۲-۱۸) مقایسه عمق شکل یافته (h) بر اساس فشار سنبه بین فرآیند استمپینگ مرحله اول و دوم [۵۸]..... ۳۴

شکل (۲-۱۹) تصویر میکروگراف نوری ساختار شیاری شکل داده شده، تغییرات ضخامت پس از استمپ مرحله دوم [۵۸]..... ۳۴

شکل (۲-۲۰) نقشه دوبعدی و صفحات دوقطبی فلزی شکل داده شد در دو ارتفاع شیار ۲۵۰ و ۷۵۰ میکرومتر [۲۰]..... ۳۵

شکل (۲-۲۱) نتایج مربوط به اثر تغییرات نیرو و سرعت شکل‌دهی بر تغییرات مقاومت تماسی در فشار تماسی 140 N/cm^2 برای نمونه‌های ساخته شده با ابعاد ۷۵۰ میکرومتر از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L [۲۰]..... ۳۵

شکل (۲-۲۲) پروفیل اندازه‌گیری شده به کمک اسکنر لیزری مربوط به، الف) اندازه نمونه‌های مختلف از صفحات شکل داده شده، ب) اندازه مقاطع مختلف از یک شیار [۲۳]..... ۳۷

شکل (۲-۲۳) اثر، سرعت و نیروی استمپینگ، ب) نرخ اعمال فشار بر عمق شیارهای شکل داده شده [۲۳]..... ۳۷

شکل (۲-۲۴) شماتیک فرآیند شکل‌دهی با لایه لاستیکی، الف) روش تغییرشکل مقعر، ب) روش تغییرشکل محدب [۵۲]..... ۳۸

شکل (۲-۲۵) تصویر تجهیزات شکل‌دهی آزمایش [۵۲]..... ۳۸

- شکل (۲-۲۶) فرآیندهای شکل‌دهی با لایه لاستیکی ، الف) روش تغییرشکل مقعر، ب) روش تغییرشکل محدب [۵۲]..... ۳۹
- شکل (۲-۲۷) نیروهای شکل‌دهی دو روش تغییرشکل مختلف ($h/w = 0/5$) [۵۲]..... ۳۹
- شکل (۲-۲۸) تغییرات ضخامت قطعات شکل داده شده [۵۲]..... ۴۰
- شکل (۲-۲۹) حداکثر کاهش ضخامت قطعات شکل داده شده با h/w مختلف [۵۲]..... ۴۱
- شکل (۲-۳۰) شبیه‌سازی المان محدود قطعات شکل داده شده، الف) روش تغییرشکل مقعر، ب) روش تغییرشکل محدب [۵۲]..... ۴۱
- شکل (۲-۳۱) تأثیر h/w بر درصد پرشدگی [۵۲]..... ۴۲
- شکل (۲-۳۲) صفحه دوقطبی شکل داده شده بصورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود [۵۳]..... ۴۳
- شکل (۲-۳۳) میکروکانال‌های شبیه‌سازی شده با $\alpha=20^\circ$ و شعاع متفاوت، الف) ($R=0/1$ ، $r=0/2$) ب) ($R=0/2$ ، $r=0/2$) ج) [۵۳]..... ۴۳
- شکل (۲-۳۴) صفحات ساخته شده با $\alpha=20^\circ$ و شعاع داخلی متفاوت، الف) ($R=0/1$ ، $r=0/2$) ب) ($R=0/3$ ، $r=0/2$) [۵۳]..... ۴۴
- شکل (۲-۳۵) تغییرات نیروی شکل‌دهی برحسب زمان در زاویه دیواره قالب (α) مختلف [۵۳]..... ۴۴
- شکل (۲-۳۶) تغییرات ضخامت صفحه شکل داده شده [۵۳]..... ۴۵
- شکل (۲-۳۷) تجهیزات شکل‌دهی برای آزمایش [۵۳]..... ۴۵
- شکل (۲-۳۸) نمای، الف) جلو، ب) پشت صفحه دوقطبی فلزی شکل داده شده با فرآیند شکل‌دهی با لایه لاستیکی [۵۳]..... ۴۶
- شکل (۲-۳۹) پروفیل میکروکانال‌های اندازه‌گیری شده با سیستم اندازه‌گیری اسکن لیزر 3D در، الف) محل A، ب) محل B [۵۳]..... ۴۶
- شکل (۳-۱) الف، ب) نمایی از قطعه مورد نظر (الگوی شیار مارپیچ موازی)، ج) جهت نیروی کششی و سیلان ماده در بحث شکل‌دهی الگوی شیار مارپیچ موازی..... ۴۸
- شکل (۳-۲) پرس هیدرولیکی خاورپرس با ظرفیت ۴۰ تن و اجزای جانبی آن..... ۴۹
- شکل (۳-۳) تصویر واحد اعمال فشار استفاده شده در تست‌های تجربی..... ۵۰
- شکل (۳-۴) نمایی از مسیر فشار اعمالی در تست‌های تجربی در سه سطح فشار ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ بار..... ۵۰
- شکل (۳-۵) نمای برش خورده از قالب ساخته شده..... ۵۲
- شکل (۳-۶) نمایی از دو نیمه قالب ساخته شده..... ۵۲
- شکل (۳-۷) نمایی از دستگاه CNC فرز ۳/۵ محور John Ford..... ۵۳
- شکل (۳-۸) نمایی از اینسرت‌های ماشینکاری شده با دو هندسه، الف) مقعر، ب) محدب..... ۵۳
- شکل (۳-۹) پارامترهای ابعادی قالب..... ۵۵

- شکل (۳-۱۰) کوره استفاده شده برای فرآیند آنیل کاری ۵۶
- شکل (۳-۱۱) نمایی از الف) دستگاه برش سیمی، ب) دستگاه تست کشش انیورسال ۵۷
- شکل (۳-۱۲) ورق فولاد زنگ‌نزن، الف) نمونه اولیه، ب) نمونه‌های کشیده شده در راستای نورد، ج) نمونه‌های کشیده شده در راستای 45° ، د) نمونه‌های کشیده شده در راستای عمود بر نورد [۶۰] ۵۸
- شکل (۳-۱۳) فولاد زنگ‌نزن آنیل شده، الف) نمونه اولیه، ب) نمونه‌های کشیده شده در راستای نورد، ج) نمونه‌های کشیده شده در راستای 45° ، د) نمونه‌های کشیده شده در راستای عمود بر نورد ۵۸
- شکل (۳-۱۴) منحنی تنش حقیقی- کرنش حقیقی مربوط به نمونه‌های کشیده شده فولاد زنگ‌نزن 304 در ابعاد کوچک در سه جهت مختلف [۶۰] ۵۹
- شکل (۳-۱۵) منحنی تنش حقیقی- کرنش حقیقی مربوط به نمونه‌های کشیده شده فولاد زنگ‌نزن 304 آنیل شده در ابعاد کوچک در سه جهت مختلف ۵۹
- شکل (۳-۱۶) راستاهای برش نمونه‌ها ۶۱
- شکل (۳-۱۷) روند آماده‌سازی نمونه‌های شکل داده شده به منظور بررسی توزیع ضخامت و درصد پرشدگی پروفیل، الف) نمونه برش سیمی شده، ب) نمایی از سطح مقطع نمونه بریده شده، ج) میکروسکوپ نوری، د) نمونه‌های مانده شده، ه) و تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع برش شده در جهت شعاع ماریپیچ کانال به ترتیب در فشارهای 800 و 900 بار، ز) ح) تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع برش شده در جهت عمود بر شیار به ترتیب در فشارهای 800 و 900 بار ۶۱
- شکل (۳-۱۸) معیار درصد پرشدگی ارایه شده توسط لیو و همکاران، الف) نسبت d/D ، ب) نسبت I/L [۵۲] ۶۲
- شکل (۳-۱۹) نمونه‌هایی از حالت نامناسب معیار پرشدگی لیو برای نسبت، الف) d/D ، ب) I/L [۵۲] ۶۳
- شکل (۳-۲۰) نمایی از مساحت پر شده و ضخامت اولیه و نهایی در تعیین درصد پرشدگی و نازک‌شدگی [۶۰] ۶۳
- شکل (۴-۱) مدل اجزای، الف) قالب و ب) ورق در شبیه‌سازی دوبعدی ۶۸
- شکل (۴-۲) مدل اجزای، الف) قالب و ب) ورق در شبیه‌سازی سه‌بعدی ۶۸
- شکل (۴-۳) مونتاژ اجزای قالب و ورق در شبیه‌سازی ۶۹
- شکل (۴-۴) مونتاژ اجزای ورق و قالب در شبیه‌سازی ۶۹
- شکل (۴-۵) شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی، الف) دوبعدی، ب) سه‌بعدی ۷۲
- شکل (۴-۶) ناحیه اعمال فشار در شبیه‌سازی، الف) دوبعدی، ب) سه‌بعدی ۷۳
- شکل (۴-۷) شبکه‌بندی ورق اولیه و اجزای قالب در شبیه‌سازی، الف) دوبعدی، ب) سه‌بعدی ۷۴
- شکل (۴-۸) اثر تغییر ابعاد دانه‌بندی بر روی نتایج کرنش پلاستیک معادل در فشار 800 بار در راستای عمود بر شیار ۷۵
- شکل (۴-۹) اثر تغییر ابعاد مش بر روی نتایج کرنش پلاستیک معادل در فشار 800 بار در راستای شعاع ماریپیچ کانال ۷۶

- شکل (۵-۱) نمونه‌های شکل داده شده به روش هیدروفرمینگ در فشارهای، الف) ۸۰۰، ب) ۹۰۰ و ج) ۱۰۰۰ بار، سمت راست؛ تجربی، سمت چپ؛ شبیه‌سازی ۸۰
- شکل (۵-۲) منحنی‌های توزیع ضخامت نمونه‌های شکل داده شده در دو راستای، الف) عمود بر شیار، ب) شعاع مارپیچ کانال ۸۱
- شکل (۵-۳) منحنی توزیع ضخامت همه شیارهای نمونه شکل داده شده در فشار ۸۰۰ بار در دو راستای، الف) عمود بر شیار، ب) شعاع مارپیچ کانال ۸۳
- شکل (۵-۴) نتایج شبیه‌سازی‌های شکل‌دهی ورق با قالب‌هایی با ابعاد جدول (۵-۱) ۸۵
- شکل (۵-۵) مقایسه درصد پرشدگی در نسبت عرض به پهنای دیواره کانال (w/s) مختلف، $w = 1$ ۸۵
- شکل (۵-۶) منحنی توزیع ضخامت ورق‌های شکل داده شده با قالب‌هایی با ابعاد جدول (۵-۱) ۸۶
- شکل (۵-۷) نتایج شبیه‌سازی‌های شکل‌دهی ورق با قالب‌هایی با ابعاد جدول (۵-۲) ۸۷
- شکل (۵-۸) موضع پارگی در نسبت $w/s = 1/92$ ۸۸
- شکل (۵-۹) مقایسه درصد پرشدگی در نسبت عرض به پهنای دیواره کانال (w/s) مختلف، $s = 0/65$ ۸۸
- شکل (۵-۱۰) منحنی توزیع ضخامت ورق‌های شکل داده شده با قالب‌هایی با ابعاد جدول (۵-۲) ۸۹
- شکل (۵-۱۱) منحنی توزیع ضخامت ناحیه بحرانی برحسب نسبت عرض به پهنای دیواره کانال (w/s) ۸۹
- شکل (۵-۱۲) نتایج شبیه‌سازی شکل‌دهی ورق در مقادیر عرض و پهنای دیواره کانال مختلف با نسبت w/s یکسان ۲/۷ ۹۰
- شکل (۵-۱۳) مقایسه درصد پرشدگی در مقادیر عرض و پهنای دیواره کانال مختلف با نسبت w/s یکسان ۲/۷، برحسب عرض کانال (w) ۹۱
- شکل (۵-۱۴) منحنی توزیع ضخامت ورق شکل داده شده با مقادیر عرض و پهنای دیواره کانال مختلف و با نسبت w/s یکسان ۲/۷ ۹۱
- شکل (۵-۱۵) نتایج شبیه‌سازی‌های شکل‌دهی ورق با قالب‌هایی با زاویه دیواره کانال ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ درجه ۹۳
- شکل (۵-۱۶) تغییرات درصد پرشدگی قالب برحسب زاویه دیواره کانال ۹۴
- شکل (۵-۱۷) منحنی توزیع ضخامت ورق شکل داده شده با قالب‌هایی با زاویه دیواره کانال ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ درجه ۹۴
- شکل (۵-۱۸) تغییرات درصد نازک‌شدگی ورق در ناحیه بحرانی (ناحیه B) بر حسب زاویه دیواره کانال ۹۵
- شکل (۵-۱۹) نتایج شبیه‌سازی‌های شکل‌دهی ورق با قالب‌هایی با شعاع فیلت داخلی $r = 0$ ۹۶
- شکل (۵-۲۰) منحنی توزیع ضخامت ورق شکل داده شده با قالب‌هایی با شعاع فیلت داخلی $r = 0$ ۹۷
- شکل (۵-۲۱) مقایسه درصد پرشدگی قالب برای کانال‌هایی با شعاع فیلت داخلی $r = 0$ ۹۷
- شکل (۵-۲۲) نتایج شبیه‌سازی‌های شکل‌دهی ورق با قالب‌هایی با شعاع فیلت خارجی $R = 0/3$ ۹۸
- شکل (۵-۲۳) منحنی توزیع ضخامت ورق شکل داده شده با قالب‌هایی با شعاع فیلت خارجی $R = 0/3$ ۹۹

- شکل (۵- ۲۴) نتایج شبیه‌سازی‌های شکل‌دهی ورق با قالب‌هایی با نسبت شعاع ماریپیچ (r_2/r_1)، الف) ۱، ب) ۱/۵، ج) ۲ ... ۱۰۰
- شکل (۵- ۲۵) منحنی توزیع ضخامت ورق شکل داده شده با نسبت شعاع ماریپیچ (r_2/r_1) مختلف در راستای عمود بر شیار ۱۰۰
- شکل (۵- ۲۶) منحنی توزیع ضخامت ورق شکل داده شده با نسبت شعاع ماریپیچ (r_2/r_1) مختلف در راستای شعاع ماریپیچ
کانال ۱۰۱.....
- شکل (۵- ۲۷) نمونه‌های شکل داده شده در فشارهای، الف) ۸۰۰ بار، ب) ۹۰۰ بار، ج) ۱۰۰۰ بار ۱۰۲.....
- شکل (۵- ۲۸) نمایی از سطح برش خورده نمونه شکل داده شده در راستاهای، الف) عمود بر شیار، ب) شعاع ماریپیچ کانال ۱۰۲
- شکل (۵- ۲۹) مقایسه توزیع ضخامت نمونه تجربی و شبیه‌سازی در راستای عمود بر شیار در فشارهای، الف) ۸۰۰، ب) ۹۰۰،
ج) ۱۰۰۰ بار ۱۰۴.....
- شکل (۵- ۳۰) مقایسه توزیع ضخامت نمونه تجربی و شبیه‌سازی در راستای شعاع ماریپیچ کانال در فشارهای، الف) ۸۰۰، ب) ۹۰۰،
ج) ۱۰۰۰ بار ۱۰۵.....
- شکل (۵- ۳۱) تغییرات درصد نازک‌شدگی ورق در ناحیه بحرانی در اثر افزایش فشار شکل‌دهی در راستای عمود بر شیار ۱۰۵
- شکل (۵- ۳۲) تغییرات درصد نازک‌شدگی ورق در ناحیه بحرانی در اثر افزایش فشار شکل‌دهی در راستای شعاع ماریپیچ کانال
۱۰۶.....
- شکل (۵- ۳۳) مقایسه منحنی‌های پروفیل شکل داده شده شبیه‌سازی و تجربی در فشارهای، الف) ۸۰۰، ب) ۹۰۰ و ج) ۱۰۰۰
بار در راستای عمود بر شیار ۱۰۷.....
- شکل (۵- ۳۴) مقایسه منحنی‌های پروفیل شکل داده شده شبیه‌سازی و تجربی در فشارهای، الف) ۸۰۰، ب) ۹۰۰ و ج) ۱۰۰۰
بار در راستای شعاع ماریپیچ کانال ۱۰۸.....
- شکل (۵- ۳۵) اثر فشار شکل‌دهی بر درصد پرشدگی پروفیل در نمونه‌های تجربی ۱۰۹.....
- شکل (۵- ۳۶) منحنی توزیع ضخامت نمونه‌های تجربی شکل داده شده در دو راستای، الف) عمود بر شیار، ب) شعاع ماریپیچ
کانال ۱۱۰.....
- شکل (۵- ۳۷) منحنی پروفیل پرشدگی نمونه‌های تجربی شکل داده شده در راستای عمود بر شیار در فشارهای، الف) ۸۰۰،
ب) ۹۰۰ و ج) ۱۰۰۰ بار ۱۱۱.....
- شکل (۵- ۳۸) منحنی پروفیل پرشدگی نمونه‌های تجربی شکل داده شده در راستای شعاع ماریپیچ کانال در فشارهای،
الف) ۸۰۰، ب) ۹۰۰ و ج) ۱۰۰۰ بار ۱۱۲.....
- شکل (۵- ۳۹) نمونه‌های شکل داده شده به روش شکل‌دهی دو مرحله‌ای با فشار مرحله اول ۸۰۰ بار و فشار مرحله دوم، الف) ۶۰۰
و ب) ۸۰۰ بار ۱۱۳.....
- شکل (۵- ۴۰) منحنی توزیع ضخامت نمونه شکل داده شده به روش شکل‌دهی دو مرحله‌ای با فشار مرحله اول ۸۰۰ بار و فشار
مرحله دوم ۶۰۰ بار، در دو راستای، الف) عمود بر شیار، ب) شعاع ماریپیچ کانال ۱۱۴.....

شکل (۵- ۴۱) منحنی پروفیل پرشدگی نمونه شکل داده شده به روش شکل‌دهی دومرحله‌ای با فشار مرحله اول ۸۰۰ بار و فشار مرحله دوم ۶۰۰ بار در دو راستای، الف) عمود بر شیار، ب) شعاع ماریپیچ کانال ۱۱۶

شکل (۵- ۴۲) نمونه‌های شکل داده شده در فشار ۸۰۰ بار با آنیل کاری ورق قبل از مرحله اول شکل‌دهی ۱۱۷

شکل (۵- ۴۳) نمونه‌های شکل داده شده به روش شکل‌دهی دومرحله‌ای با یک مرحله آنیل میانی ۱۱۷

شکل (۵- ۴۴) منحنی توزیع ضخامت تجربی نمونه‌های شکل داده شده به روش شکل‌دهی دومرحله‌ای (با فشار مرحله دوم ۱۱۰۰ بار) با یک مرحله آنیل میانی در دو راستای، الف) عمود بر شیار، ب) شعاع ماریپیچ کانال ۱۱۸

شکل (۵- ۴۵) اثر فشار شکل‌دهی مرحله اول بر تغییرات درصد نازک‌شدگی ورق در ناحیه بحرانی نمونه تجربی شکل داده شده به روش شکل‌دهی دو مرحله‌ای (با فشار مرحله دوم ۱۱۰۰ بار) با یک مرحله آنیل میانی در دو راستای، الف) عمود بر شیار و ب) شعاع ماریپیچ کانال ۱۱۹

شکل (۵- ۴۶) منحنی پروفیل پرشدگی تجربی نمونه شکل داده شده به روش شکل‌دهی دومرحله‌ای (با فشار مرحله دوم ۱۱۰۰ بار) با یک مرحله آنیل میانی در دو راستای، الف) عمود بر شیار، ب) شعاع ماریپیچ کانال ۱۲۰

شکل (۵- ۴۷) اثر فشار شکل‌دهی مرحله اول بر درصد پرشدگی پروفیل نمونه‌های تجربی شکل داده شده به روش شکل‌دهی دو مرحله‌ای (با فشار مرحله دوم ۱۰۰۰ بار) با یک مرحله آنیل میانی ۱۲۱

شکل (۵- ۴۸) نمونه شکل داده شده به روش شکل‌دهی سه مرحله‌ای، $P_1=1160$ ، $P_2=1100$ و $P_3=800$ ۱۲۲

شکل (۵- ۴۹) منحنی توزیع ضخامت تجربی نمونه شکل داده شده به روش شکل‌دهی سه مرحله‌ای (فشار مرحله اول ۱۱۶۰ بار، فشار مرحله دوم ۱۱۰۰ بار و فشار مرحله سوم ۸۰۰ بار) در دو راستای، الف) عمود بر شیار، ب) شعاع ماریپیچ کانال ۱۲۳

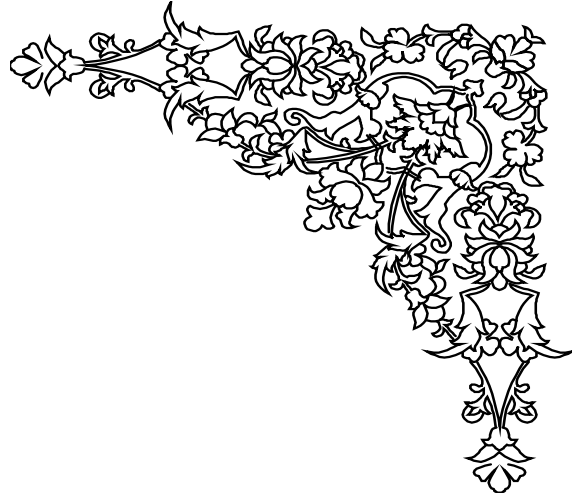
شکل (۵- ۵۰) منحنی پروفیل پرشدگی نمونه شکل داده شده به روش شکل‌دهی سه مرحله‌ای (فشار مرحله اول ۱۱۶۰ بار، فشار مرحله دوم ۱۱۰۰ بار و فشار مرحله سوم ۸۰۰ بار) در دو راستای، الف) عمود بر شیار، ب) شعاع ماریپیچ کانال ۱۲۴

شکل (۵- ۵۱) مقایسه درصد پرشدگی برای حالت شکل‌دهی مقعر در فرآیندهای یک مرحله‌ای و دومرحله‌ای بر حسب فشار شکل‌دهی مرحله اول ۱۲۵

شکل (۵- ۵۲) مقایسه درصد نازک‌شدگی برای حالت شکل‌دهی مقعر در فرآیندهای یک مرحله‌ای و دومرحله‌ای بر حسب فشار شکل‌دهی مرحله اول ۱۲۶

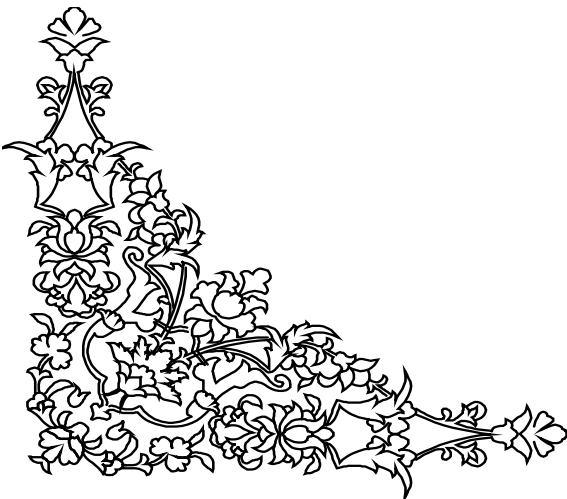
فهرست جدول‌ها

- جدول (۳-۱) ترکیب شیمیایی ورق فولادی زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ ۵۱
- جدول (۳-۲) ابعاد دقیق اینسرت‌های ماشینکاری شده با دو هندسه، الف) مقعر، ب) محدب (برحسب میلیمتر) ۵۴
- جدول (۳-۳) خواص مکانیکی ورق فولادی زنگ نزن ۳۰۴ ۶۰
- جدول (۵-۱) مقادیر پارامترهای قالب (برحسب میلیمتر) ۸۴
- جدول (۵-۲) مقادیر پارامترهای قالب (برحسب میلیمتر) ۸۷



فصل اول

کلیات



۱-۱- مقدمه

از زمانیکه رقابت بین المللی بین صنایع خودروسازی بسیار جدی شد، بیشتر شرکت‌ها سعی در کاهش هزینه‌ها و افزایش در تولید، خواص تکنولوژیکی و کیفیت داشتند [۱]. به‌منظور نیل به این اهداف و با در نظر داشتن مسائل اقتصادی، تولیدکنندگان می‌بایست از مواد و آلیاژهای جدید و سبک بهره می‌بردند و همچنین از فناوری‌های تولید جدیدی استفاده می‌کردند که قادر باشند از طریق آنها این مواد را به سازه‌های مستحکم، مقرون به صرفه و باکیفیت تبدیل نمایند. یکی از این روش‌ها فرآیند هیدروفرمینگ می‌باشد.

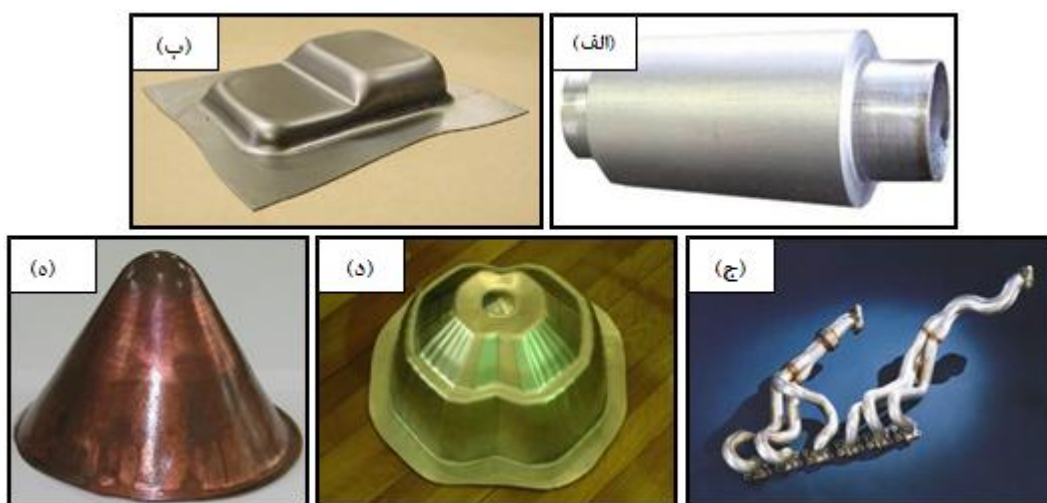
روش شکل‌دهی به کمک فشار سیال (هیدروفرمینگ) یکی از روش‌های نسبتاً نوین شکل‌دهی می‌باشد که از اواخر دهه ۱۹۴۰ در کانون توجه صاحبان صنایع قرار گرفته است [۲]. در سال‌های اخیر به علت افزایش تقاضا برای قطعاتی با وزن کم در زمینه‌های مختلف مانند دوچرخه‌سازی، خودروسازی، هواپیماسازی و صنایع هوا و فضا، فرآیند هیدروفرمینگ شهرت زیادی یافته است [۳]. یکی از مهمترین کاربردهای فرآیند هیدروفرمینگ که در طی سال‌های اخیر مورد استقبال زیادی قرار گرفت است، شکل‌دهی قطعاتی در ابعاد میکرو از قبیل میکرو راکتور، میکرو مبدل حرارتی و صفحات دوقطبی فلزی با الگوی شیاری (میکرو شیار و میکرو پین) می‌باشد [۴].

در مقایسه با فرآیندهای ساخت مرسوم مانند استمپینگ و جوشکاری، هیدروفرمینگ لوله و ورق مزایای زیادی دارند که از جمله آن می‌توان به کاهش هزینه قطعه‌کار، هزینه ابزار، وزن محصول، بهبود ثبات ساختاری و افزایش استحکام و سختی قطعات شکل داده شده، توزیع ضخامت یکنواخت‌تر، عملیات ثانویه کمتر و ... اشاره کرد [۳]. با توجه به مزیت‌های فراوان فرآیند هیدروفرمینگ پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ای نزدیک، یکی از مهمترین و پرکاربردترین روش‌ها در تولید انبوه قطعات فلزی (ورقی یا لوله‌ای)، روش هیدروفرمینگ باشد [۵].

در ادامه فصل، به تعریف فرآیند هیدروفرمینگ و بیان انواع، مزایا و محدودیت‌های آن می‌پردازیم.

۲-۱- تعریف فرآیند هیدروفرمینگ

فرآیند هیدروفرمینگ یکی از فرآیندهای شکل‌دهی فلزات است که در آن از سیال تحت فشار بعنوان جایگزینی برای ابزار سخت (سنبه، ماتریس، قالب، اینسرت و ...) و به منظور ایجاد تغییرشکل پلاستیک در ماده‌ی خام استفاده می‌شود [۵]. در شکل (۱-۱) چند نمونه از قطعات شکل داده شده به کمک فرآیند هیدروفرمینگ نشان داده شده است.



شکل (۱-۱) نمونه‌هایی از قطعات شکل داده شده به کمک روش هیدروفرمینگ، الف) لوله پله‌ای هیدروفرم شده [۶]، ب) قطعه شکل داده شده با فرآیند چندمرحله‌ای هیدروفرمینگ [۷]، ج) آگزوز هیدروفرم شده [۸]، د) قطعه شکل داده شده با فرآیند هیدروفرمینگ با دیافراگم لاستیکی [۹]، ه) قطعه مخروطی هیدروفرم شده از جنس مس [۱۰]

از جمله مزایای فرآیند هیدروفرمینگ می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۵، ۱۱]:

- ۱- کاهش هزینه ابزار
- ۲- دقت ابعادی بالا
- ۳- قابلیت تکرارپذیری بالا
- ۴- قابلیت شکل‌دهی اشکال پیچیده
- ۵- قابلیت شکل‌دهی قطعاتی با کیفیت بالاتر
- ۶- امکان ساخت قطعات با وزن کم و با استفاده از فلزات سبک