

دانشکده فنی

گروه مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

بررسی تجربی و تحلیلی تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای تحت بارگذاری

هیدرودینامیکی

از

سید میلاد حسینی

استاد راهنما

دکتر هاشم بابایی

دکتر ابوالفضل درویزه

شهریور ۹۳

تقدیم بہ:

تقدیم بہ ساحت مقدس امیرالمومنین علی (ع)

پدر بزرگوار - مادر مہربانم

و خواہران عزیزم

شکرشایان نثار ایزدمنان که توفیق رارفق را هم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم.

پس از سپاس خداوند متعال، بسنی شایسته است از استاد فریخته و فرزانه جناب آقایان پروفور دروینزه و دکتر بابایی که با کرامتی چون

خوشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را بار اهنایی های کار ساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر

نایم. در ادامه از تمامی اساتید و مسئولین گروه مهندسی مکانیک دانشگاه کیلان که بنده را در این راه یاری فرمودند، کمال تشکر و

قدردانی را دارم. همچنین از پدر و مادر عزیز، دلسوز و مهربانم و خواهران عزیزم بخاطر همه ی تلاشهای محبت آمیزی که در دوران

مختلف زندگی ام انجام داده اند و با مهربانی چگونگی زیستن را به من آموختند تا در کمال آراش و با حمایت های همه جانبه مراتب

تحصیل را به پایان برسانم سپاسگزارم.

بررسی تجربی و تحلیلی تغییر شکل ورقهای دایره ای تحت بارگذاری هیدرودینامیکی

سید میلاد حسینی

در این پایان نامه تغییر شکل پلاستیک ورقهای دایره‌ای گیردار فولادی و آلومینیومی تحت شرایط بارگذاری هیدرودینامیکی با بهره‌گیری از آزمایشات تجربی به وسیله دستگاه چکش پرتابه‌ای مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. تست‌های تجربی متعددی با به‌کار بردن دستگاه چکش پرتابه‌ای با استفاده از تغییرات ضخامت و جنس ورق مورد استفاده و همچنین ارتفاع‌های مختلف برای سقوط وزنه، انجام شده است. نتایج بدست‌آمده از آنها برحسب خیز مرکز ورق، توزیع کرنش‌ها و ... ارزیابی و همچنین تاثیر پارامترهایی نظیر خواص مکانیکی ورق، ضخامت آن و فاصله استقرار چکش یا انرژی انتقالی، بر روی رفتار تغییر شکل ورق، مطالعه شده است. در روش مدلسازی تحلیلی، مدل ارائه شده با استفاده از روش انرژی و با در نظر گرفتن تابع مفروض گسترده تغییر شکل بر اساس شواهد تجربی، تعیین شده است. در این مدل اثرات نرخ کرنش، کرنش شعاعی و محیطی و همچنین اثرات انرژی کرنشی، خمشی و غشایی توامان لحاظ شده است. محاسبه مدل ارائه شده بر اساس مفروضات منطقی و پایه‌ای است. لذا این روش می‌تواند در مطالعه رفتار تغییر شکل پلاستیک ورقها تحت بارگذاری دینامیکی استفاده شود. نتایج حاصل از این مدل برای خیز مرکز ورق، توافق مطلوبی را با نتایج اندازه‌گیری شده در تست‌های تجربی نشان می‌دهد. لذا به‌کار بردن این مدل در پیش‌بینی خیز مرکز ورق تحت شرایط مختلف بارگذاری هیدرودینامیکی مناسب است. در روش مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار ANSYS WORKBENCH استفاده شده است. نتایج بدست‌آمده در این شبیه‌سازی با نتایج تجربی انجام گرفته مطابقت خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: بار هیدرودینامیکی، دراپ‌همر، ورق دایره‌ای، تغییر شکل ورق، آزمایشگاهی

فهرست مطالب

چ	فهرست شکل ها	۱
ر	فهرست جدول ها	۱
ز	چکیده فارسی	۱
ژ	چکیده انگلیسی	۱
۱	فصل اول - پیشگفتار :	۱
۲	مقدمه	۱-۱
۴	انواع فرآیندهای شکل دهی	۲-۱
۴	۱-۲-۱ فرآیند کشش عمیق	۱-۲-۱
۵	۲-۲-۱ فرآیند شکل دهی کششی	۲-۲-۱
۵	۳-۲-۱ فرآیند شکل دهی انفجاری	۳-۲-۱
۶	۴-۲-۱ فرآیندهای شکل دهی افزایشی ورق (ISF)	۴-۲-۱
۷	۵-۲-۱ فرآیند هیدروفرمینگ	۵-۲-۱
۷	۳-۱ معرفی روش های اصلی هیدروفرمینگ ورق	۳-۱
۷	۱-۳-۱ روش های ماتریس - سیال	۱-۳-۱
۱۲	۲-۳-۱ روش های سنبه - سیال	۲-۳-۱
۱۲	۳-۳-۱ روش ترکیبی	۳-۳-۱
۱۲	۴-۱ هیدروفرمینگ ورق به وسیله دراپ هم	۴-۱
۱۳	۱-۴-۱ روش هیدروفرمینگ ورق به وسیله دراپ هم	۱-۴-۱
۱۷	۲-۴-۱ نمونه هایی از دستگاههای دراپ هم موجود	۲-۴-۱
۲۲	۵-۱ لزوم مطالعه	۵-۱
۲۴	فصل دوم - مروری بر مطالعات پیشین :	۲۴
۲۵	مقدمه	۱-۲
۲۵	تاریخچه فرآیند هیدروفرمینگ	۲-۲
۲۸	مطالعه انجام شده بر روی شاکتیوب	۳-۲
۳۲	مطالعه انجام شده بر روی دراپ هم	۲-۴
۳۵	فصل سوم - آزمایشات انجام شده	۳۵
۳۶	مقدمه	۱-۳
۳۶	جزئیات دستگاه انجام آزمایشات	۲-۳

۳۷	۱-۲-۳ بدنه دستگاه دراپهمر
۳۸	۲-۲-۳ سیلندر و پیستون
۳۹	۳-۲-۳ جعبه وزنه دراپ همر
۳۹	۴-۲-۳ ورقگیر
۴۱	۵-۲-۳ سنسورها
۴۲	۳-۳ مدهای تخریب
۴۳	۴-۳ آزمایشهای انجام شده
۴۳	۱-۴-۳ مراحل انجام آزمایش
۴۴	۲-۴-۳ خواص مکانیکی ورقهای مورد آزمایش
۴۷	۵-۳ بررسی نتایج و مشاهدات در آزمایشات
۴۷	۱-۵-۳ بررسی خیز ماکزیمم بدست آمده روی ورقها
۵۱	۲-۵-۳ بررسی کرنشها در ورقهای شکل داده شده
۶۲	۳-۵-۳ نمودارهای فشار
۶۵	فصل چهارم - مدل سازی تحلیلی فرآیند شکل دهی هیدروفرمینگ
۶۶	۱-۴ مقدمه
۶۶	۲-۴ ارائه مدل تحلیلی
۶۷	۱-۲-۴ محاسبه کار پلاستیک
۷۰	۲-۲-۴ تنش تسلیم دینامیکی
۷۰	۳-۲-۴ نرخ کرنش
۷۳	۴-۲-۴ بدست آوردن تنش دینامیکی و پارامترهای آن
۷۴	۵-۲-۴ بدست آوردن رابطه خیز مرکز ورق
۷۵	۳-۴ نتایج مدل تحلیلی
۷۹	۴-۴ مقایسه نتایج تحلیلی و نتایج آزمایشات
۸۱	فصل پنجم - شبیه سازی اجزای محدود با نرم افزار Ansys workbench
۸۲	۱-۵ مقدمه
۸۳	۲-۵ معرفی نرم افزار انسیس ورکبنچ
۸۴	۳-۵ شبیه سازی فرآیندهای شکل دهی
۸۴	۱-۳-۵ مدل سازی ورق
۸۵	۲-۳-۵ مش بندی

۸۵.....	۳-۳-۵ تعیین خواص ماده.....
۸۷.....	۴-۳-۵ اعمال قیود و پارامترهای مورد نیاز شبیه‌سازی.....
۹۰.....	۴-۵ نتایج.....
۱۰۳.....	فصل ششم - بحث و نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات
۱۰۴.....	۱-۶ مقدمه.....
۱۰۴.....	۲-۶ ارائه نتایج.....
۱۱۰.....	۳-۶ پیشنهادات جهت ادامه‌ی کار.....
۱۱۳أ.....	مراجع
۱۱۶.....	ضمائم

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ فرآیندهای کشش چند مرحله‌ای، اسپینینگ یا با شکلهای انفجاری ۳
- شکل ۲-۱ فرآیند شکل دهی کشش عمیق ۴
- شکل ۳-۱ فرآیند شکلهای کششی ۵
- شکل ۴-۱ فرآیند شکل دهی انفجاری [۱] ۶
- شکل ۵-۱ فرآیندهای شکلهای افزایشی ورق ۶
- شکل ۶-۱ فرآیند شکلهای هیدروفرمینگ ۷
- شکل ۷-۱ (الف) - غالب هیدروفرمینگ استاندارد (ب) - قطعه تولید شده با این روش [۱۱] ۸
- شکل ۸-۱ شماتیک فرآیند شکلهای هیدرومکانیکی. [۷] ۹
- شکل ۹-۱ شماتیک فرآیند شکلهای هیدرودینامیکی [۱۳] ۹
- شکل ۱۰-۱ شماتیک روش شکلهای هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۱۳] ۱۰
- شکل ۱۱-۱ شماتیک روش شکلهای هیدرودینامیکی با فشار یکنواخت روی ورق [۱۴] ۱۱
- شکل ۱۲-۱ شماتیک روش شکلهای هیدرووریم [۱۱] ۱۱
- شکل ۱۳-۱ شماتیک هیدروفرمینگ سنبه - سیال ۱۲
- شکل ۱۴-۱ شماتیک هیدروفرمینگ ترکیبی ۱۲
- شکل ۱۵-۱ شماتیک دراپ هم ۱۳
- شکل ۱۶-۱ نمونه آزمایش انجام شده با دستگاه دراپ هم ۱۴
- شکل ۱۷-۱ ایجاد ترک در ورق ۱۴
- شکل ۱۸-۱ نمونه ای از قطعات تولیدی به وسیله هیدروفرمینگ ۱۶
- شکل ۱۹-۱ دراپ هم دانشگاه ویتواتراسرند ۱۷
- شکل ۲۰-۱ شمایی برش خورده از فریم استفاده شده در حالت بدون غالب ۱۸
- شکل ۲۱-۱ تغییر شکل ورق را در هنگام وارد شدن ضربه ۱۸
- شکل ۲۲-۱ مکانیزم وزنه و هدایت آن به سوی ورق ۱۹
- شکل ۲۳-۱ نمایی از اجزاء مختلف دراپ هم مدرس ۲۰

- شکل ۱-۲۴ نماهایی از دراپ همر مدل شده دانشگاه گیلان ۲۱
- شکل ۱-۲۵ مکانیزم مهار محفظه دراپ همر ۲۲
- شکل ۱-۲۶ موارد منتشر شده در مورد شکلدهی انفجاری طی سالهای ۲۳
- شکل ۲-۱ نمونه‌های از گراف فشار ۲۹
- شکل ۲-۲ ورق مسی با ضخامت ۰/۵۵ میلی‌متر ۲۹
- شکل ۲-۳ ورق مسی با ضخامت ۰/۹ میلی‌متر ۲۹
- شکل ۲-۴ مقایسه خیز محاسبه شده و نتایج تستها ۳۰
- شکل ۲-۵ مقایسه خیز محاسبه شده و نتایج تستها ۳۱
- شکل ۲-۶ گراف فشار حاصل از معادله ۳۲
- شکل ۲-۷ گراف فشار حاصل از سنسور فشار ۳۳
- شکل ۲-۸ پروفایل تغییر شکل ورق دایره‌ای ۳۳
- شکل ۲-۹ نمونه تست انجام شده، مدل انسیس، حل تنشی مدل ۳۴
- شکل ۳-۱ نمایی از بدنه دراپهمر ۳۷
- شکل ۳-۲ مدلی کلی از اجزا سیلندر پیستون ۳۸
- شکل ۳-۳ نماهایی از جعبه وزنه دراپهمر ۳۹
- شکل ۳-۴ نماهایی از غالب آزاد ۴۰
- شکل ۳-۵ نماهایی از غالب مخروطی ۴۰
- شکل ۳-۶ نمونه‌های از مد تخریب ۴۲
- شکل ۳-۷ سامانه سیلندر پیستون و اجزا آن ۴۳
- شکل ۳-۸ تصویر دستگاه تست کشش و خروجی این دستگاه ۴۵
- شکل ۳-۹ منحنی تنش و کرنش برای ورقهایی از جنس فولاد ۴۶
- شکل ۳-۱۰ منحنی تنش و کرنش برای ورقهایی از جنس آلومینیوم ۴۶
- شکل ۳-۱۱ نمونه‌های از تستها ۴۷
- شکل ۳-۱۲ نمایش خیز ماکزیمم هر تست ۴۹

- شکل ۳-۱۳ رسم تغییرات خیز تستها بر حسب انرژی ورودی ۴۹
- شکل ۳-۱۴ نمایی از تستهای ورق فولادی و آلومینیومی ۵۰
- شکل ۳-۱۵ مقایسه خیزها با یکدیگر برای جنس و ضخامتهای متفاوت ۵۰
- شکل ۳-۱۶ نمونه ورق قبل و بعد از انجام آزمایش ۵۱
- شکل ۳-۱۷ نمودار کرنش محیطی برای تستهای فولاد ۱ میلیمتر ۵۳
- شکل ۳-۱۸ نمودار کرنش محیطی برای تستهای فولاد ۲ میلیمتر ۵۴
- شکل ۳-۱۹ نمودار کرنش محیطی برای تستهای آلومینیوم ۱ میلیمتر ۵۴
- شکل ۳-۲۰ نمودار کرنش محیطی برای تستهای آلومینیوم ۲ میلیمتر ۵۵
- شکل ۳-۲۱ نمودار کرنش محیطی برای تستهای آلومینیوم ۳ میلیمتر ۵۵
- شکل ۳-۲۲ نمودار کرنش محیطی برای ورقهای فولادی ۵۶
- شکل ۳-۲۳ نمودار کرنش محیطی برای ورقهای آلومینیومی ۵۷
- شکل ۳-۲۴ نمودار میلههای تغییرات کرنش محیطی برای ورقهای فولادی ۵۷
- شکل ۳-۲۵ نمودار میلههای تغییرات کرنش محیطی برای ورقهای آلومینیومی ۵۸
- شکل ۳-۲۶ کرنش ضخامتی ورق فولادی ۱ میلیمتر ۶۰
- شکل ۳-۲۷ کرنش ضخامتی ورق فولادی ۲ میلیمتر ۶۰
- شکل ۳-۲۸ نمودار کرنش ضخامتی برای تستهای آلومینیوم ۶۱
- شکل ۳-۲۹ نمودار کرنش ضخامتی برای تستهای فولادی ۶۱
- شکل ۳-۳۰ محل قرار گیری و شکل ظاهری سنسور فشار ۶۲
- شکل ۳-۳۱ گراف فشار خروجی از سنسور فشار - ارتفاع وزنه ۱/۵ متر ۶۳
- شکل ۳-۳۲ گراف فشار خروجی از سنسور فشار - ارتفاع وزنه ۲ متر ۶۳
- شکل ۳-۳۳ گراف فشار خروجی از سنسور فشار - ارتفاع وزنه ۲ متر ۶۴
- شکل ۴-۱ پروفیل انتخابی بر اساس α متفاوت ۶۷
- شکل ۴-۲ نمودار تنش کرنش برای نرخ کرنش پایین و بالا ۷۱
- شکل ۴-۳ اثر نرخ کرنش روی منحنیهای تنش کرنش در تستهای برشی SHPB، a-آلومینیوم b-تیتانیوم ۷۱

- شکل ۴-۴ اثر نرخ کرنش روی منحنیهای تنش کرنش در تستهای برشی SHPB، c- فولاد نرم d- اورانیوم ۷۲
- شکل ۵-۴ مقایسه خیزهای بی بعد تحلیلی با یکدیگر برای جنس و ضخامتهای متفاوت ۷۷
- شکل ۶-۴ نمودار خیز بی بعد بر حسب پارامتر ω ۷۷
- شکل ۷-۴ نمایش خیز ماکزیمم بیبعد در هر تست ۷۸
- شکل ۸-۴ مقایسه نرخ کرنشهای متوسط برای جنس و ضخامتهای متفاوت ۷۹
- شکل ۹-۴ مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشات انجام شده برای ورق فولادی ۷۹
- شکل ۱۰-۴ مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشات انجام شده برای ورق آلومینیومی ۸۰
- شکل ۱-۵ مدل ورق ۸۵
- شکل ۲-۵ مشبندی ورق ۸۵
- شکل ۳-۵ اعمال شرایط مرزی ۸۷
- شکل ۴-۵ محل اعمال فشار ۸۸
- شکل ۵-۵ زیر ساختار شبیهسازی فرآیند ضربه ۸۹
- شکل ۶-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-A11100-1-7 ۹۰
- شکل ۷-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-A11100-1-8 ۹۱
- شکل ۸-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-A11100-1-9 ۹۱
- شکل ۹-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-A11100-2-10 ۹۲
- شکل ۱۰-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-A11100-2-11 ۹۲
- شکل ۱۱-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-A11100-2-12 ۹۳
- شکل ۱۲-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-A11100-3-13 ۹۳
- شکل ۱۳-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-A11100-3-14 ۹۴
- شکل ۱۴-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-A11100-3-15 ۹۴
- شکل ۱۵-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-ST13-1-1 ۹۵
- شکل ۱۶-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-ST13-1-2 ۹۵
- شکل ۱۷-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-ST13-1-3 ۹۶

- شکل ۱۸-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-ST13-2-1..... ۹۶
- شکل ۱۹-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-ST13-2-2..... ۹۷
- شکل ۲۰-۵ نتیجه شبیه سازی SMH-ST13-2-3..... ۹۷
- شکل ۲۱-۵ نتایج خیز مرکز ورق به ضخامت..... ۹۸
- شکل ۲۲-۵ شبیه سازی توزیع تنش در ورق فولادی..... ۹۹
- شکل ۲۳-۵ نمایش محل ماکزیمم تنش ایجاد شده بر روی ورق..... ۹۹
- شکل ۲۴-۵ نمونه های از آزمایشات که گسیخته شده است..... ۱۰۰
- شکل ۲۵-۵ توزیع سرعت تغییر شکل ورق در مدل شبیه سازی..... ۱۰۰
- شکل ۲۶-۵ گراف تغییر سرعت شکلدهی تست SMH-A11100-1-8..... ۱۰۱
- شکل ۲۷-۵ نمونه های از آزمایشات انجام شده بر روی سرعت تغییر شکل ورق..... ۱۰۱
- شکل ۲۸-۵ توزیع شتاب در هنگام شکلدهی در ۴ بازه زمانی..... ۱۰۲
- شکل ۲۹-۵ شتاب تغییر شکل ورق..... ۱۰۲
- شکل ۱-۶ نمودار مقایسه خیز بی بعد مرکز ورق در ورق فولادی ۱ میلی متر..... ۱۰۴
- شکل ۲-۶ نمودار مقایسه خیز بی بعد مرکز ورق در ورق فولادی ۲ میلی متر..... ۱۰۵
- شکل ۳-۶ نمودار مقایسه خیز بی بعد مرکز ورق در ورق آلومینیومی ۱ میلی متر..... ۱۰۵
- شکل ۴-۶ نمودار مقایسه خیز بی بعد مرکز ورق در ورق آلومینیومی ۲ میلی متر..... ۱۰۶
- شکل ۵-۶ نمودار مقایسه خیز بی بعد مرکز ورق در ورق آلومینیومی ۳ میلی متر..... ۱۰۶
- شکل ۶-۶ نمودار مقایسه خیز بی بعد مرکز ورق در ورق فولادی..... ۱۰۷
- شکل ۷-۶ نمودار مقایسه خیز بی بعد مرکز ورق در ورق آلومینیومی..... ۱۰۷
- شکل ۸-۶ نمایش میزان درصد خطا مدل تحلیلی نسبت به نتایج آزمایشات..... ۱۰۸
- شکل ۹-۶ نمایش میزان درصد خطا شبیه سازی نسبت به نتایج آزمایشات..... ۱۰۸

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲	نتایج آزمایشهای انجام شده کسینگ	۳۱
جدول ۱-۳	مشخصات سنسورها و متعلقات آن	۴۱
جدول ۲-۳	خلاصه ای از مشخصه و ابعاد قطعه کار و نمونهها	۴۴
جدول ۳-۳	خواص مکانیکی مواد پس از انجام آزمایشات	۴۷
جدول ۴-۳	نتایج تستهای انجام شده بر حسب پارامترهای ضخامت، انرژی و خیز مرکز ورق	۴۸
جدول ۵-۳	اطلاعات کرنش محیطی برای تستهای ورق آلومینیومی ۳ میلیمتر	۵۲
جدول ۶-۳	اطلاعات کرنش ضخامتی برای تستهای ورق فولادی ۱ میلیمتر	۵۹
جدول ۱-۴	پارامترهای رابطه تنش تسلیم دینامیکی	۷۰
جدول ۲-۴	پارامترهای ورودی مدل تحلیلی	۷۵
جدول ۳-۴	نتایج روابط تحلیلی	۷۶
جدول ۴-۴	مقدار نرخ کرنش در هر تست	۷۸
جدول ۵-۴	مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشات برای خیز بی بعد مرکز ورق	۸۰
جدول ۱-۵	خواص فولاد مورد استفاده	۸۶
جدول ۲-۵	خواص آلومینیوم مورد استفاده	۸۶
جدول ۳-۵	ضرایب مدل جانسون کوک آلیاژ آلومینیوم AL1100 [۳۴]	۸۷
جدول ۴-۵	نتایج بدست آمده از خیز مرکز ورق	۹۸

فصل اول :

پیشگفتار

شکل‌دهی فلزات در صنعت دارای کاربرد گسترده‌ای می‌باشد. از این رو شناخت هر چه دقیق‌تر آن، صنعتگران را به سمت تولید قطعات با کیفیت بالاتر سوق می‌دهد. بشر از سالهای دور نیاز خود به ساخت قطعات و شکل‌دهی فلزات خام را درک کرده و لذا شکل‌دهی، یکی از قدیمی‌ترین شاخه‌های صنعت گردیده است. پیشرفت علم و تکنولوژی مقارن با انقلاب صنعتی در اروپا سبب شد تا شکل‌دهی فلزات نیز در مسیر تازه‌ای قرار گیرد.

بعد از انقلاب صنعتی اروپا تا جنگ جهانی دوم، هر از گاهی روش‌های نوینی برای ساخت و شکل‌دهی فلزات با اشکال پیچیده، ابداع می‌شد. همچنان که جهان به پیشرفت‌های صنعتی خود در زمینه‌های فضایی، موشکی و هسته‌ای ادامه می‌دهد، نیاز این صنایع به قطعات پیچیده و دقیق‌تر آشکارتر می‌گردد.

یکی از چالش‌های اصلی در پیش روی این پیشرفت‌های جدید، همانا مشکلاتی است که در راه ساخت چنین قطعاتی وجود دارد. توانایی تغییر شکل دائمی یکی از ارزشمندترین خصوصیات فلزات به شمار می‌آید. بدون شک تولید ورق، تسمه، میل‌گرد، لوله، مقاطع ساختمانی و به طور کلی شکل‌دهی فلزات وابسته به این قابلیت است. با توجه به این که شکل‌دهی فلزات یکی از روش‌های مهم ساخت و تولید قطعات است، شناخت هرچه دقیق‌تر فرآیندهای شکل‌دهی از اهمیت بسزایی برخوردار است. تیرها، ورق‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای و کروری از جمله عناصر اولیه و اصلی سازه‌ها می‌باشند.

سازه‌های ورقی شکل که در اینجا موضوع مورد بررسی ما می‌باشند، در هوا و فضا، کاربردهای زیردریایی و زمینی مانند هواپیماها، انواع کشتی‌ها، سکوها، ساحلی، پل‌ها، نیروگاه‌ها، مخازن و غیره دارای کاربرد هستند در صنعت شکل‌دهی ورق‌ها عموماً با کشش چند مرحله‌ای [۱]، اسپینینگ^۱ [۲] یا با شکل‌دهی انفجاری [۳]-[۴] شکل داده می‌شوند.

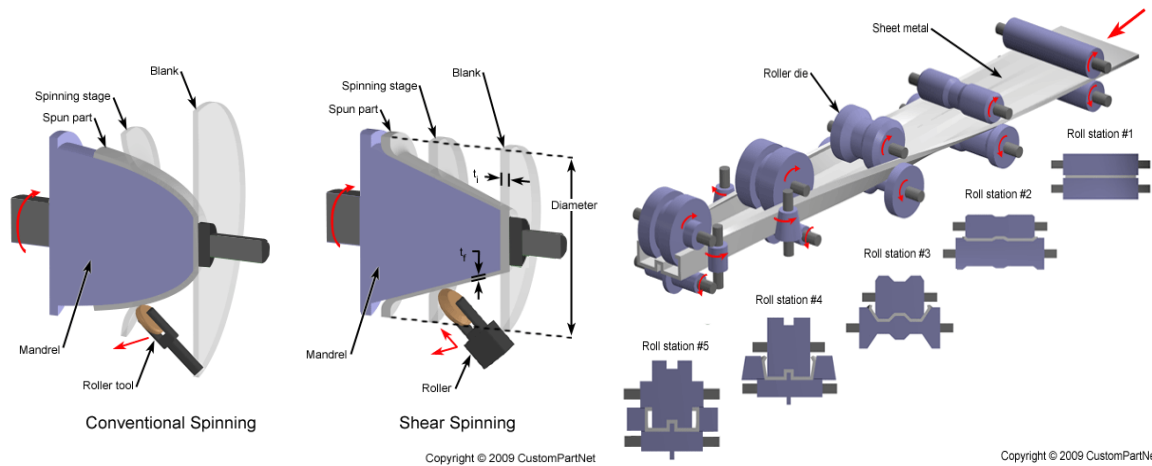
در طی سال‌های اخیر فرآیند هیدروفرمینگ به عنوان یک جایگزین مناسب برای شکل‌دهی قطعات پیچیده ورقی مورد توجه قرار گرفته است. در روش هیدروفرمینگ از یک سیال تحت فشار، بطور خاص در درون محفظه فشار، به عنوان محیط تغییر شکل دهنده استفاده می‌شود [۵].

قطعاتی که با هیدروفرمینگ تولید می‌شوند در مقایسه با روش‌های دیگر، دارای مزایای قابل توجهی می‌باشند که از آن نمونه می‌توان به نسبت کشش بیشتر (نسبت قطر ورق اولیه به قطر سنبه در صورتی قطعه بصورت کامل کشیده شود)، عملیات ثانویه کمتر، حذف جوشکاری، بهبود بخشیدن به استحکام و چقرمگی، کاهش هزینه غالب، کیفیت سطح بهتر، کاهش برگشت فنی، دقت ابعادی بالاتر و قابلیت شکل‌دهی اشکال پیچیده اشاره کرد [۶].

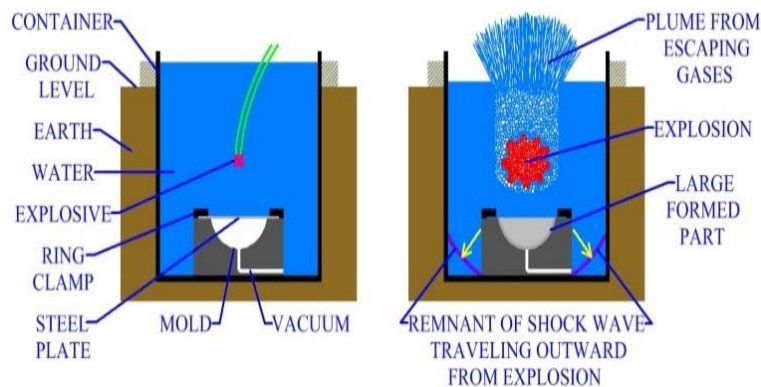
فرآیند هیدروفرمینگ به دسته‌های متعددی تقسیم می‌شود که به عنوان مثال می‌توان از روش‌های هیدرو مکانیکی، هیدرووریم و روش هیدرو دینامیکی نام برد. امروزه، روش هیدروفرمینگ از طرف صنایع مختلف مورد توجه خاصی قرار گرفته

¹ spinning

است. پارامترهای موثر بر فرآیند هیدروفرمینگ شامل فشار اولیه داخل محفظه غالب، مسیر فشار، نسبت کشش، هندسه ورق، جنس ورق و ضریب اصطکاک می‌باشد [۵].



EXPLOSIVE FORMING



شکل ۱-۱ فرآیندهای کشش چند مرحله‌ای، اسپینینگ یا با شکل‌دهی انفجاری

استفاده از سیال برای شکل‌دهی یا هیدروفرمینگ از زمان جنگ جهانی دوم مرسوم بوده است. اولین قطعات هیدروفرم شده در سال‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ تولید شدند. از سال ۱۹۹۰ هیدروفرمینگ به عنوان یک فرآیند قابل قبول در صنایع خودروسازی مطرح شد و مورد استفاده قرار گرفته است و پس از آن فعالیت‌های پژوهشی در این زمینه متمرکز شده و مراکز تحقیقاتی مرتبط همکاری خود را با شرکت‌های سازنده خودرو و اتصالات فلزی گسترش داده‌اند [۶].

در یک دسته‌بندی کلی هیدروفرمینگ^۱ به دو دسته هیدروفرمینگ ورق و هیدروفرمینگ لوله تقسیم می‌شود. از این روش‌ها در صنایع نظامی، صنایع اتومبیل‌سازی، صنایع پتروشیمی و صنایع مرتبط دیگر استفاده می‌شود [۶].

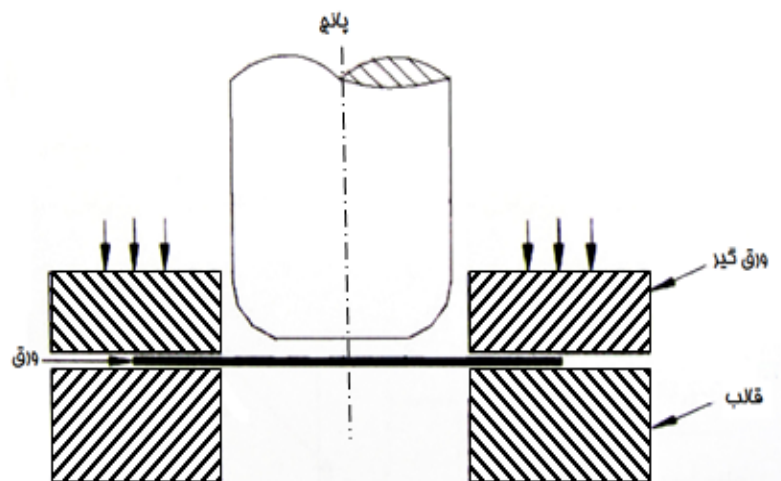
۲-۱ انواع فرآیندهای شکل‌دهی

روش‌های شکل‌دهی گوناگونی در صنعت وجود دارند. بسیاری از این روش‌ها قدیمی بوده ولی هنوز در صنعت و در ساخت بسیاری از قطعات کاربرد دارند. در اینجا به منظور آشنایی بیشتر، برخی از فرآیندهای متداول شکل‌دهی و روش‌هایی که برای شکل دادن قطعات امروزه به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، به طور خلاصه توضیح داده می‌شوند.

۱-۲-۱ فرآیند کشش عمیق^۱

فرآیند کشش عمیق، یک روش شناخته شده برای شکل دادن قطعات عموماً فنجان‌ی شکل یا کروی شکل و حتی قطعات چهارگوش می‌باشد، که به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل پانچ مورد استفاده باید دقیقاً هم‌شکل با قطعه‌ی موردنظر باشد. با حرکت پانچ به سمت پایین، ورق بین غالب و ورق‌گیر قرار می‌گیرد.

شکل پانچ مورد استفاده باید دقیقاً هم‌شکل با قطعه مورد نظر باشد. با حرکت پانچ به سمت پایین ورق تحت کشش قرار می‌گیرد و از سوئی ورق‌گیر و غالب به سمت داخل حرکت می‌کند که میزان حرکت به سمت داخل را نیروی عمودی وارده از ورق‌گیر به ورق تعیین می‌کند.



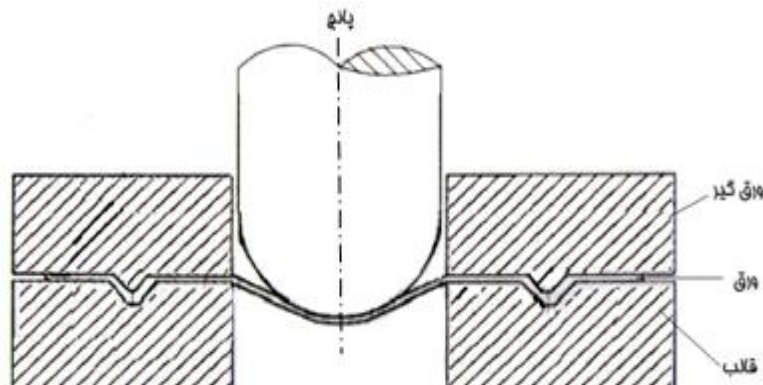
شکل ۲-۱ فرآیند شکل‌دهی کشش عمیق

در صورت زیاد بودن این نیرو، عملاً از حرکت ورق به سمت داخل جلوگیری به عمل می‌آید، که باعث پارگی زودتر ورق می‌شود. اگر نیروی ورق‌گیر به اندازه کافی زیاد نباشد، لبه‌های ورق دچار چروکیدگی می‌شوند. وجود یک ماده روانکار بین ورق‌گیر و غالب و همچنین بین پانچ و ورق بسیار ضروری می‌باشد. از این روش برای تولید قطعاتی چون مخازن فولادی تحت فشار، فشنگ‌ها و انواع قوطی‌های کنسرو استفاده می‌شود.

³ Deep Drawing

۲-۲-۱ فرآیند شکل‌دهی کششی^۱

فرآیند شکل‌دهی کششی، مشابه فرآیند کشش عمیق می‌باشد و تفاوت اصلی بین دو فرآیند این است که پیرامون ورق در این فرآیند ثابت می‌باشد و اجازه‌ی حرکت ورق به سمت داخل به ورق داده نمی‌شود. این روش معمولاً برای شکل دادن قطعات کم عمق‌تر نسبت به فرآیند کشش عمیق به کار می‌رود، زیرا عدم حرکت ورق به سمت داخل باعث پارگی زود هنگام ورق می‌شود. در این روش تمام تغییر، ناشی از کشش و نازک شدن ضخامت ورق می‌باشد.



شکل ۳-۱ فرآیند شکل‌دهی کششی

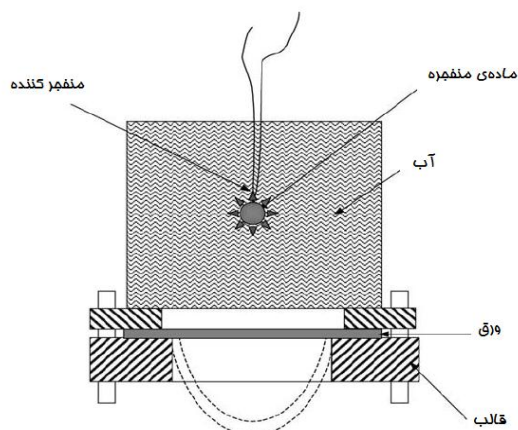
۳-۲-۱ فرآیند شکل‌دهی انفجاری

شکل دادن صفحات فلزی با استفاده از انرژی حاصل از انفجار و به کارگیری محیط واسط برای انتقال انرژی را فرآیند شکل دهی انفجاری می‌نامند [۷]. سیستم شکل‌دهی انفجاری دارای چهار بخش اساسی است:

۱. منبع انرژی که همان ماده‌ی منفجره و یا گاز قابل انفجار است.
۲. محیط واسط انتقال انرژی، که انرژی حاصل از انفجار و موج شوک تولید شده را به سمت قطعه هدایت می‌کند.
۳. غالبی که میزان تغییر شکل قطعه را تنظیم می‌کند و شکل نهایی قطعه را به آن می‌دهد.
۴. ماده‌ی تحت شکل‌گیری که قطعه کار نام دارد و معمولاً یک ورق فلزی است.

در این فرآیند ورق به‌طور کامل در پیرامونش ثابت شده است و با انفجار خرج انرژی در مدت کوتاهی مقدار زیادی انرژی آزاد می‌شود و ورق را شکل می‌دهد. بنابراین فرآیند شکل‌دهی انفجاری یک فرآیند با سرعت بالای شکل‌دهی می‌باشد. گزارش‌های متعددی در مورد فرآیند شکل‌دهی انفجاری حاکی از آن است که فلزات در سرعت‌های بالای فرم‌دهی، بهتر از روش‌های متداول شکل می‌گیرند [۷]. این روش برای ساخت انواع قطعات پیچیده و بزرگ گنبدی شکل و قطعات مخروطی کاربرد دارد.

¹ Stretch Forming

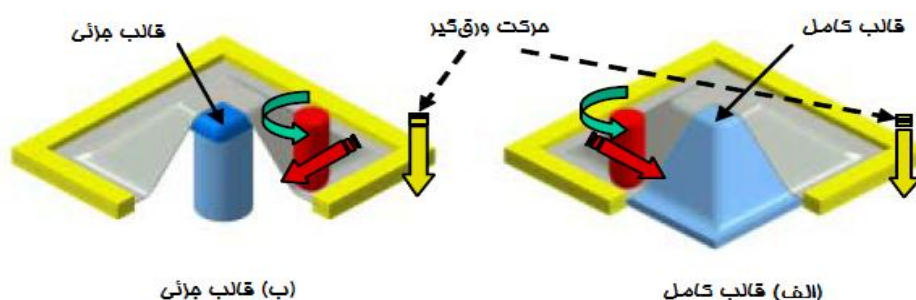


شکل ۴-۱ فرآیند شکل دهی انفجاری [۱]

۴-۲-۱ فرآیندهای شکل‌دهی افزایشی ورق (ISF)^۱

نوع جدیدی از فرآیندهای شکل‌دهی وجود دارند که به فرآیندهای شکل‌دهی نرم معروفند. در فرآیند شکل‌دهی نرم هندسه‌ی محصول شکل داده شده بدون آن‌که از ابزارهای مختلف برای شکل دادن استفاده شود، با کنترل ابزار تغییر می‌کند. از سال ۱۹۹۰ انواع جدیدی از فرآیندهای شکل‌دهی نرم در کشور ژاپن توسعه پیدا کردند به گونه‌ای که هنوز بسیاری از این فرآیندها در سایر نقاط جهان ناشناخته می‌باشند.

اما یک علاقه‌ی رو به رشد در در سایر کشورها در مورد این فرآیندها وجود دارد. فرآیندهای شکل‌دهی افزایشی زیرمجموعه‌ای از فرآیندهای شکل‌دهی نرم به شمار می‌آیند، که در آن از یک ابزار کوچک صلب که در هر لحظه فقط با ناحیه‌ی مشخصی از قطعه کار در تماس است، برای شکل دادن اشکال مختلف استفاده می‌شود. در این فرآیندها مسیر حرکت ابزار هندسه‌ی شکل را تعیین می‌کند نه شکل ابزار. بنابراین با تنظیم مسیر حرکتی یک ابزار کوچک اغلب سر کروی صلب، می‌توان اشکال بسیار پیچیده‌ای را مانند صورت انسان بر روی ورق ایجاد کرد. توسعه‌ی عمده‌ی فرآیندهای شکل‌دهی افزایشی در ژاپن به وسیله‌ی ایسکی^۲ و دیگران [۸] انجام شده است.



شکل ۵-۱ فرآیندهای شکل‌دهی افزایشی ورق

1 Incremental Sheet Forming

2 Iseky