

دانشکده فنی
گروه مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

تحلیل غیر خطی رفتار پلاستیک حلقه‌های فلزی تحت بارگذاری با نرخ بالا و نرخ متوسط

از:

سید وحید حسینی

استادان راهنما:

دکتر ابوالفضل درویشه

دکتر منصور درویشه

استاد مشاور:

دکتر رضا انصاری

شهریور ۱۳۸۹

تدویم بر پدر و مادر محبت با هم که آرزای ما هستند و دعا پریشان همواره بدرقه را هم بوده است.

تشکر و قدردانی

سپاس خداوند یکتا را که همواره الطاف بیکرانیش در تمام مراحل زندگی شامل حالم بوده است.

بر خود لازم می‌دانم که از راهنمایی‌های ارزنده‌ی استاد ارجمند جناب پروفیسور ابوالفضل درویزه و پروفیسور منصور درویزه که اصلی‌ترین نقش را در تعریف، شکل‌گیری و انجام این پایان‌نامه عهده‌دار بودند و استفاده از محضر ایشان همواره مایه‌ی مباحثات مان بوده است خالصانه تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین از اساتید محترم، دکتر غلامرضا زارع‌پور و دکتر رضا فلاحتگر که زحمت مطالعه و داوری این پایان‌نامه را بر عهده داشتند و نیز جناب دکتر علی باستی مدیر محترم گروه مکانیک صمیمانه سپاسگزارم.

تحلیل غیرخطی رفتار پلاستیک حلقه های فلزی تحت بار گذاری با نرخ بالا و نرخ متوسط

وحید حسینی

در این پایان نامه، شبیه سازی فرآیندهای شکل دهی دینامیکی حلقه های فلزی توسط مدل های یک بعدی بدون در نظر گرفتن تغییر شکل ها و اثرات طولی با نوشتن معادله ی حرکت شعاعی حلقه و همچنین مدل دو بعدی متقارن محوری با استفاده از اصل پایداری نرخ تغییرات انرژی و اعمال روش حساب تغییرات صورت گرفته است. بر پایه ی تئوری تغییر شکل هنکی و استفاده از مدل ساختاری توانی و رابطه ی کوپرسایموند اثرات سخت شوندگی کرنشی در نرخ کرنش اعمال شده است. معادله ی دینامیکی حاصل از مدل انرژی توسط الگوریتم نیومارک و روش نیوتن رفسون در هر مرحله حل شده و با به هنگام سازی مختصات حلقه در هر مرحله امکان تحلیل تغییرشکل های محدود نیز توسط مدل انرژی فراهم آمده است. مدل های دینامیکی بدست آمده برای شبیه سازی فرآیند شکل دهی انفجاری و الکترومغناطیس بکار گرفته شده و نتایج حاصله با نتایج پژوهش های پیشین مقایسه گردیده است.

واژه های کلیدی:

انبساط حلقه ها، شکل دهی انفجاری، شکل دهی الکترومغناطیسی، معادله ثبات انرژی، تغییر شکل های محدود، رفتار غیرخطی.

فهرست مطالب

۱	فصل اول : پیشگفتار
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ روش های شکل دهی سرعت بالا
۳	۳-۱ نگاهی بر پژوهش های پیشین
۶	۴-۱ روند انجام پژوهش
۸	فصل دوم : روش شکل دهی انفجاری
۹	۱-۲ مقدمه
۹	۲-۲ شکل دهی الکترومغناطیس
۱۰	۳-۲ شکل دهی الکتروهیدرولیک
۱۲	۴-۲ شکل دهی انفجاری
۱۲	۳-۴-۲ تاریخچه و کاربردها
۱۶	۴-۴-۲ اصول اولیه
۱۷	۵-۴-۲ انفجار و مواد منفجره
۱۹	۶-۴-۲ حساسیت ماده منفجره
۱۹	۷-۴-۲ مشخصات مواد منفجره ضعیف
۲۰	۸-۴-۲ مشخصات مواد منفجره قوی
۲۰	۹-۴-۲ انتشار انفجار
۲۲	۱۰-۴-۲ موج فشار، ضربه و انتقال آن
۲۳	۱۱-۴-۲ محیط های انتقال انرژی انفجار
۲۴	۱۲-۴-۲ روشهای استقرار مواد منفجره
۲۶	۱۳-۴-۲ سیستم های شکل دهی انفجاری
۲۹	فصل سوم : محاسبه فشار ایجاد شده در طی فرآیندهای شکل دهی انفجاری و الکترومغناطیس
۳۰	۱-۳ مقدمه
۳۰	۲-۳ شکل دهی الکترومغناطیس
۳۱	۳-۲-۳ جریان قطعه کار
۳۲	۴-۲-۳ پارامترهای مدار معادل
۳۳	۵-۲-۳ معادلات الکترودینامیک
۳۳	۶-۲-۳ فشار مغناطیسی
۳۵	۷-۲-۳ توزیع فشار الکترومغناطیس
۴۰	۳-۳ شکل دهی انفجاری
۴۲	۳-۳-۳ خرج نقطه ای

۴۳	۴-۳-۳	خرج خطی با طول محدود
۴۴	۵-۳-۳	خرج خطی
۴۵	۴-۳	جمع بندی

فصل چهارم: تحلیل تغییر شکل حلقه ها در طی فرآیندهای شکل دهی دینامیکی با استفاده از معادلات حرکت

۴۷	۱-۴	مقدمه
۴۸	۲-۴	بررسی تغییر شکل های کوچک حلقه
۴۹	۳-۲-۴	تغییر شکل الاستیک حلقه
۵۰	۴-۲-۴	تغییر شکل پلاستیک حلقه
۵۱	۵-۲-۴	برگشت الاستیک حلقه
۵۲	۳-۴	تحلیل تغییر شکل محدود حلقه
۵۳	۳-۳-۴	رابطه ساختاری شامل نرخ کرنش
۵۴	۴-۳-۴	معادلات حرکت در مختصات لاگرانژی و استفاده از کرنش لگاریتمی
۵۵	۵-۳-۴	معادله حرکت در مختصات اویلری و استفاده از کرنش المنسی

فصل پنجم: بررسی تغییر شکل حلقه های فلزی در طی فرآیندهای شکل دهی دینامیکی به روش انرژی

۵۷	۱-۵	مقدمه
۵۸	۲-۵	تنشها و کرنش های تعمیم یافته
۵۸	۳-۵	معیار تسلیم
۶۰	۳-۳-۵	حالت اول: صفحه $N_{\theta} = 0$
۶۱	۴-۳-۵	حالت دوم: صفحه $N_s = 0$
۶۲	۵-۳-۵	حالت سوم: صفحه $M_s = 0$
۶۳	۴-۵	اصل تعامد و تنش های منتهجه
۶۴	۵-۵	مدل ساختاری شامل اثرات سخت شوندگی کرنشی و نرخ کرنش
۶۵	۶-۵	اصل پایداری نرخ تغییرات انرژی
۶۷	۷-۵	نرخ کار نیروی خارجی
۶۷	۸-۵	نرخ تغییرات انرژی جنبشی
۶۹	۹-۵	نرخ کار پلاستیک
۷۰	۱۰-۵	تعیین تابع شکل ϕ
۷۱	۱۱-۵	استفاده از روش حساب تغییرات
۷۲	۱۲-۵	جمع بندی

فصل ششم: نتایج و بحث

۷۳	۱-۶	مقدمه
۷۴	۲-۶	روند حل معادلات بدست آمده
۷۴	۳-۲-۶	روش یک بعدی

۷۴	۴-۲-۶	روش انرژی	
۷۵	۳-۶	شکل دهی انفجاری حلقه	
۷۵	۳-۳-۶	ارزیابی صحت نتایج	
۷۷	۴-۳-۶	سرعت تغییر شکل و نرخ کرنش	
۷۹	۵-۳-۶	توزیع محوری فشار انفجار	
۸۰	۶-۳-۶	پروفیل تغییر شکل	
۸۲	۷-۳-۶	توزیع کرنش ها	
۸۷	۴-۶	شکل دهی الکترومغناطیس حلقه های فلزی	
۸۷	۳-۴-۶	ارزیابی صحت نتایج	
۹۱	۴-۴-۶	سرعت تغییر شکل و نرخ کرنش	
۹۲	۵-۴-۶	تنش سیلان پلاستیک	
۹۳	۶-۴-۶	پروفیل تغییر شکل	
۹۵	۷-۴-۶	توزیع تنش های منتجه در طول حلقه و کار پلاستیک ناشی از آنها	
۹۸	۵-۶	نتیجه گیری	
۹۹	۶-۶	پیشنهاد برای تحقیقات بیشتر	
۱۰۰			مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: تعداد مقالات منتشر شده در زمینه‌ی شکلدهی سرعت بالا در هر سال [۲] ۴
- شکل ۱-۲: پیکربندی شکل دهی الکترومغناطیس ۱۰
- شکل ۲-۲: پیکربندی شکل دهی الکتروهیدرودینامیک ۱۱
- شکل ۳-۲: نمونه ای محصولات فرآیند *EHF* ۱۱
- شکل ۴-۲: قطعه مثلثی ساخته شده از آلومینیوم برای بدنه سفینه ساترن [۲] ۱۳
- شکل ۵-۲: اجزاء گنبدی شکل ساخته شده به روش شکل دهی انفجاری [۱ و ۲] ۱۴
- شکل ۶-۲: اجزاء توربین؛ شکل داده شده به روش انفجاری ۱۴
- شکل ۷-۲: پوسته‌ی دوکی شکل (قبل و بعد از شکل دهی انفجاری) ۱۵
- شکل ۸-۲: قسمتی از ساختمان مخزن خلأ؛ ساخته شده به روش انفجاری [۲] ۱۵
- شکل ۹-۲: منی فولد ساخته شده به روش انفجاری [۲] ۱۶
- شکل ۱۰-۲: مقایسه نمودار فشار-زمان در مواد منفجره قوی و ضعیف ۱۹
- شکل ۱۱-۲: انتشار انفجار از یک نقطه ۲۰
- شکل ۱۲-۲: انفجار در یک خرج خطی ۲۱
- شکل ۱۳-۲: انتشار انفجار در خرج ۲۱
- شکل ۱۴-۲: سامانه‌ی انفجار با فاصله ۲۴
- شکل ۱۵-۲: سامانه‌ی شکل دهی شبه تماسی ۲۵
- شکل ۱۶-۲: تاثیر فاصله بر فشار وارد بر قطعه کار ۲۶
- شکل ۱۷-۲: سیستم شکل دهی بسته [۱] ۲۷
- شکل ۱۸-۲: سیستم شکل دهی باز ورق [۱] ۲۸
- شکل ۱-۳: نمای شماتیکی از سامانه شکل دهی الکترومغناطیسی استوانه ۳۰
- شکل ۲-۳: دیاگرام شماتیک مدار شکل دهی الکترومغناطیس ۳۲
- شکل ۳-۳: تاثیر نسبت طول استوانه به سیم پیچ؛ الف: الگوی توزیع نیرو ب: الگوی تغییر شکل ج: نمونه‌های تجربی [۲۷] ۳۶
- شکل ۴-۳: توزیع فشار الکترومغناطیس شعاعی به ازای نسبت های طولی مختلف [۳۳] ۳۷
- شکل ۵-۳: پروفیل فشار الکترومغناطیس شعاعی به ازای نسبت های طولی مختلف [۳۸] ۳۷
- شکل ۶-۳: توزیع فشار بدست آمده از رابطه‌ی ۲۸-۳ ۳۹
- شکل ۷-۳: میرا شدن موج انفجار با افزایش فاصله نسبت به مرکز [۴۰] ۴۰
- شکل ۸-۳: موج فشار حاصل از انفجار [۴۰] ۴۰
- شکل ۹-۳: شوک انفجار حاصل از خرج کروی در داخل حلقه ۴۲
- شکل ۱۰-۳: خرج خطی با طول محدود ۴۴
- شکل ۱۱-۳: خرج خطی با طول نامحدود ۴۵
- شکل ۱-۴: شمای کلی تغییر شکل حلقه: الف) پروفیل تغییر شکل؛ ب) المان حلقه در پیکربندی اولیه؛ پ) المان حلقه تغییر شکل یافته ۴۸
- شکل ۱-۵: المان حلقه در مختصات استوانه‌ای ۵۹

- شکل ۲-۵: معیار تسلیم سه بعدی معادله ۲-۵
- شکل ۳-۵: مقایسه معیار تسلیم رابطه ۵-۵ با سطح تسلیم ارائه شده در صفحه‌ی $N_{\theta} = 0$
- شکل ۴-۵: مقایسه معیار تسلیم رابطه ۷-۵ با سطح تسلیم ارائه شده در صفحه‌ی $N_s = 0$
- شکل ۵-۵: سطح تسلیم ارائه شده در صفحه‌ی $M_s = 0$
- شکل ۶-۵: هندسه تغییر شکل حلقه
- شکل ۱-۶: جابجایی نقطه‌ی میانی حلقه به ازای وزن خرج‌های مختلف به طول ۳۴ میلی‌متر
- شکل ۲-۶: جابجایی نقطه‌ی میانی حلقه به ازای وزن خرج‌های مختلف به طول ۳۸ میلی‌متر
- شکل ۳-۶: فشار وارد بر نقطه میانی دیواره‌ی حلقه به ازای رشته خرج‌های به طول ۳۴ میلی‌متر
- شکل ۴-۶: سرعت حلقه در طی تغییر شکل انفجاری
- شکل ۵-۶: نرخ کرنش بدست آمده در طی تغییر شکل انفجاری حلقه
- شکل ۶-۶: توزیع فشار بدست آمده برای حلقه با فرض انفجار یکباره‌ی خرج
- شکل ۷-۶: توزیع فشار بدست آمده برای حلقه با فرض انفجار تدریجی آن
- شکل ۸-۶: پروفیل تغییر شکل شعاعی حلقه به ازای انفجار یکباره‌ی خرج
- شکل ۹-۶: پروفیل تغییر شکل شعاعی حلقه به ازای انفجار تدریجی آن
- شکل ۱۰-۶: حلقه تغییر شکل یافته به روش انفجاری در مرجع [۵]
- شکل ۱۱-۶: توزیع کرنش محیطی در طول حلقه در زمانهای مختلف الف: انفجار یکباره خرج ، ب: انفجار تدریجی خرج
- شکل ۱۲-۶: توزیع کرنش طولی حلقه در زمانهای مختلف الف: انفجار یکباره خرج ، ب: انفجار تدریجی خرج
- شکل ۱۳-۶: توزیع کرنش موثر حلقه در زمانهای مختلف الف: انفجار یکباره خرج ، ب: انفجار تدریجی خرج
- شکل ۱۴-۶: توزیع تنش‌های منته‌ج حلقه در زمانهای مختلف الف: انفجار یکباره خرج ، ب: انفجار تدریجی خرج
- شکل ۱۵-۶: جریان ایجاد شده در سیم پیچ در طی فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس
- شکل ۱۶-۶: فشار الکترومغناطیس وارد بر حلقه در طی فرآیند الکترومغناطیس
- شکل ۱۷-۶: مقایسه تغییر شکل شعاعی پیش بینی شده در نقطه میانی دیواره حلقه $x=0$ بر حسب زمان در طی فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس
- شکل ۱۸-۶: سرعت شعاعی نقطه میانی حلقه در طی فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس
- شکل ۱۹-۶: نرخ کرنش ایجاد شده در طی فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس حلقه
- شکل ۲۰-۶: تنش سیلان بر حسب زمان
- شکل ۲۱-۶: پروفیل تغییر شکل
- شکل ۲۲-۶: توزیع طولی تنش‌های منته‌ج بی بعد شده در زمانهای مختلف
- شکل ۲۳-۶: سهم کار پلاستیک هر یک از تنش‌های منته‌ج در طی تغییر شکل

فهرست جدول‌ها

۱۸	جدول ۱-۲: تعدادی از مواد منفجره
۲۲	جدول ۲-۲: پارامترهای انفجار چند متداول [۲۸]
۸۷	جدول ۱-۶: مشخصات مکانیکی مربوط به قطعه کار
۸۸	جدول ۲-۶: مشخصات هندسی مربوط به سیم پیچ و قطعه کار
۸۸	جدول ۳-۶: مقادیر مشخصه معادله جریان

۱. فصل اول

پیشگفتار

۱-۱ مقدمه

به طور کلی تحلیل رفتار سازه ها تحت بار دینامیکی و ضربه‌ای به دو منظور مختلف انجام می‌گیرد. در برخی از سازه ها نظیر مخازن تحت فشار، این تحلیل به این علت انجام می‌شود که اطمینان حاصل گردد که سازه می‌تواند فشارهای ناگهانی در یک سیستم را تحمل نماید. برای بعضی دیگر از سازه ها این تحلیل کار اصلی سازه را تعریف می‌کند که از این گروه می‌توان به ضربه گیرهای مکانیکی خودروها اشاره کرد. در این میان تحلیل رفتار حلقه ها را می‌توان از دو جنبه دارای اهمیت دانست. اول اینکه تحلیل حلقه های جدار نازک یا جدار ضخیم به عنوان یکی از سازه‌های استوانه‌ای شکل می‌تواند برای طیف وسیعی از مسائل مورد استفاده قرار گیرد. دیگر آنکه شکل‌دهی حلقه‌های فلزی در کنار کاربردهای فراوان صنعتی یکی از اصلیت‌ترین روش‌های بررسی خواص مکانیکی مواد به ویژه در سرعت‌های بالا هستند. لذا ارائه‌ی مدل‌هایی برای بررسی رفتار و تغییر شکل پلاستیک حلقه‌ها، مورد توجه می‌باشد.

فرآیندهای شکل‌دهی را بسته به نرخ کرنش ایجاد شده در قطعه کار، می‌توان به فرآیندهای شبه استاتیکی ($\dot{\epsilon}_p < 10^{-4} s^{-1}$)، نرخ پایین ($10^{-4} < \dot{\epsilon}_p < 1 s^{-1}$)، نرخ متوسط ($1 < \dot{\epsilon}_p < 5 \times 10^2 s^{-1}$) و نرخ بالا تقسیم بندی کرد. در فرآیندهای نرخ پایین، صرف نظر از اثرات اینرسی و تحلیل استاتیکی فرض معقولی است. اما در فرآیندهای نرخ متوسط اثرات اینرسی قطعه کار بدلیل سرعت بالای تغییر شکل اهمیت یافته و تحلیل دینامیکی فرآیند را الزامی می‌کند. در فرآیندهای نرخ بالا، علاوه بر اینرسی، نرخ کرنش بالای ایجاد شده نیز در رفتار قطعه کار در حین تغییر شکل موثر خواهد بود. لذا به منظور شبیه سازی این فرآیندها، استفاده از مدل‌های دینامیکی که علاوه بر اینرسی اثرات نرخ کرنش را نیز لحاظ کند بسیار مورد توجه بوده و برای مجموعه ای از فرآیندهای شکل‌دهی دینامیکی نرخ متوسط و نرخ بالا قابل استفاده خواهد بود.

۲-۱ روش های شکل دهی سرعت بالا

فرآیند شکل دهی با سرعت بالا، فرآیندی است که در آن مقداری انرژی در زمان کوتاهی آزاد می‌شود و قطعه کار در برابر فشار گذرای زیاد قرار می‌گیرد. در این روش، ماده به سرعت و شتاب بالایی می‌رسد و فرآیند در کسر بسیار کوچکی از ثانیه پایان می‌پذیرد. سرعت شکل‌گیری قطعه در این شیوه بیش از 50 m/s می‌باشد. ابزارهای مورد نیاز در این دانش بر پایه روش آزاد سازی

انرژی دسته بندی می شوند این روشها عبارتند از:

۱- الکتریکی مانند دستگاه الکترومغناطیس،

۲- مکانیکی مانند دستگاه پنیوماتیکی،

۳- شیمیایی مانند انفجار ماده منفجره.

دلایل متعددی برای ایجاد و استفاده از این روشها وجود دارد که علت اصلی آن، عمدتاً مزایای این روشها نسبت به روشهای سنتی شکل دهی می باشد. برخی از این دلایل به قرار زیر هستند:

۱- افزایش قابلیت شکل پذیری آلیاژهای ویژه نظیر تیتانیوم که با استفاده از روشهای سنتی مشکل است؛

۲- حذف نیمی از مجموعه قالب (سنبه یا ماتریس) و کاهش هزینه های مرتبط با طراحی و ساخت قالب؛

۳- کاهش مقدار بازگشت فنی و در نتیجه امکان ساخت قطعات دقیق تر؛

۴- بهبود نسبی خواص مکانیکی، ریز ساختاری و متالورژی قطعه کار پس از فرآیند شکل دهی؛

۵- تولید قطعات آزمایشی با پروفیل پیچیده و تolerانس های نازل و دقیق؛

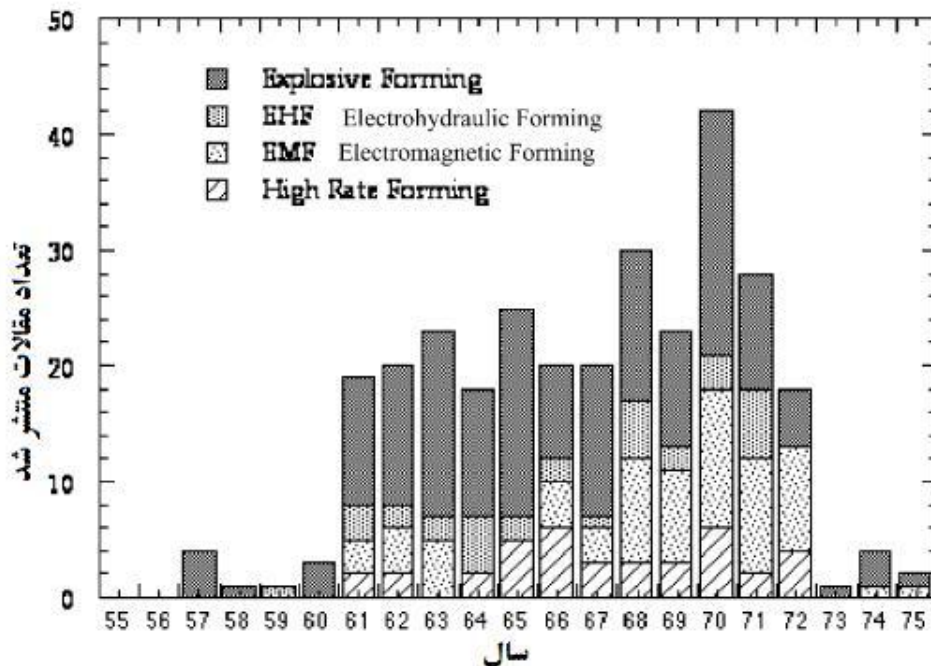
۶- توزیع یکنواخت تر کرنشها در یک عملیات واحد و حذف عملیات ماشین کاری سنگین و گران قیمت در روشهای سنتی؛

از ویژگی های اصلی این روشها که می بایست در تحلیل فرآیند به آنها توجه شود می توان به عواملی نظیر اینرسی، ضربه و تغییرات خواص ساختاری مکانیکی مواد اشاره کرد. روشهای متعدد شکل دهی سریع عمدتاً براساس نحوه انتقال انرژی به قطعه کار دسته بندی می شوند که در این پایان نامه شکل دهی انفجاری و الکترومغناطیس مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۳ نگاهی بر پژوهش های پیشین

ابداع روش های شکل دهی سرعت بالا را می توان به اواخر قرن هجدهم و نخستین کاربردهای آن را در ۱۹۳۰ برای شکل دهی ورق های ضخیم مربوط دانست [۱]. در بین سال های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ حمایت های گسترده ای برای انجام تحقیقات در این زمینه آغاز و منجر به انتشار مقالات فراوانی در این حوزه گردید. همانطور که در شکل ۱-۱ دیده می شود، اگرچه تعداد این مقالات از سال ۱۹۶۱ تا ۱۹۷۰ به طور چشمگیری رو به افزایش بود، در این سال به یکباره کاهش یافت [۲]. در توجیه علت کاهش مقالات و گزارشات به خصوص در زمینه شکل دهی انفجاری دلایل مختلفی ارائه شده است. ابداع تکنیک پوشش دهی انفجاری و سرمایه گذاری و گرایش اکثر کمپانی ها به آن از یک سو و همچنین آغاز به کار کمپانی های تجاری بزرگ برای شکل دهی انفجاری و

تجاری شدن این روش ها از سوی دیگر، از جمله دلایلی است که مرجع [۲] برای این کاهش ذکر کرده است. با این حال، در ادامه بعضی از پژوهش های منتشر شده در زمینه شکل دهی حلقه ها و تیوب های استوانه ای به اجمال مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۱-۱: تعداد مقالات منتشر شده در زمینه شکل دهی سرعت بالا در هر سال [۲]

در سال ۱۹۹۶، دالریمل (*Dalrimple*) و جانسون (*Johnson*) [۳] آزمایش های متعددی برای شکل دهی انفجاری تیوب های برنجی و فولادی با قطرهای مختلف توسط خرج های خطی انجام داده و انبساط هایی تا ۲۵٪ قطر اولیه را بدست آوردند. آنها با توجه به هندسه ی خرج و استفاده از روابط تجربی، عباراتی را نیز برای محاسبه ی فشار وارد بر قطعه کار و فلاکس انرژی انفجاری استخراج کردند.

پوینتون (*Poynton*) و همکارانش [۴] با انجام آزمایش های تجربی و انبساط شعاعی تیوب های برنجی توسط انفجار مخلوط گاز در ۱۹۶۷ گزارش داده اند که برای انبساط تیوب های فلزی، روش شکل دهی انفجاری با خرج خطی، روش مناسب تری است.

یکی از قدیمی ترین پژوهش های منتشر شده در زمینه شکل دهی سرعت بالای حلقه ها را می توان مقاله ی ارائه شده توسط چینگ (*Ching*) و ویس (*Weese*) در سال ۱۹۶۹ دانست [۵] که علاوه بر نتایج تجربی انبساط حلقه های جدار نازک به کمک خرج های خطی، شامل مدل های تحلیلی یک بعدی با استفاده از معادله حرکت شعاعی حلقه و نیز استفاده از روش انرژی است. معادلات فشار نیز به کمک مفهوم فاصله مقیاس شده^۱ و روابط تجربی ارائه شده توسط *Cole* [۶] برای خرج کروی استخراج شده اند. اگرچه مفروضات ساده کننده ی بسیاری در این تحلیل صورت گرفته اما چینگ و ویس مطالعات گسترده ای را به کمک آن انجام داده و

^۱ Scaled distance

نتایج قابل قبولی را استخراج کرده اند.

در سال های ۱۹۶۷ تا ۱۹۷۴ الحسنی (*Al-Hassani*) و همکارانش [۷ و ۸] پژوهش هایی را بر روی شکل دهی سرعت بالای تیوب های استوانه ای توسط روش الکترومغناطیس، به انجام رساندند. در کنار انجام مطالعات تجربی، آنها با توسعه روش استفاده از مدار معادل و با در نظر گرفتن معادله ی حرکت شعاعی تیوب، مدل هایی یک بعدی برای تحلیل تغییر شکل استوانه ها ارائه کردند. آنها همچنین با استفاده از روش پین ها تماسی^۱ توانستند منحنی هایی تجربی برای تاریخچه ی زمانی تغییر شکل و سرعت استوانه نیز بدست آورند.

در همین سال ها (۱۹۷۲)، دافی (*Duffey*) مدل یک بعدی ای را با در نظر گرفتن رفتار الاستیک پلاستیک کامل و وابسته به نرخ کرنش، برای تحلیل رفتار حلقه ها در بارگذاری های ایمپالسو ارائه داد [۹]. او با انجام مثال های عددی با و بدون در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش، تفاوت های قابل توجهی را در نتایج بدست آمده گزارش می دهد.

همانطور که گفته شد، یکی از کاربردهای مطالعه رفتار حلقه ها، بررسی رفتار و تعیین مشخصات ساختاری مکانیکی فلزات است. در سال ۱۹۸۷، گوردین (*Gourdin*) و همکارانش [۱۰] با بررسی انبساط حلقه های فلزی توسط روش الکترومغناطیس، به بررسی رفتار ساختاری فلزات و مطالعه ی تنش جریان در نرخ های کرنش بالا پرداختند. آنها نیز از اثرات طولی صرف نظر کرده و از مدل یک بعدی برای تحلیل مکانیکی تغییر شکل حلقه استفاده کردند.

عکس برداری سرعت بالا که یکی از روش های بررسی روند تغییر شکل در فرآیندهای دینامیکی است، در سال ۱۹۹۲ توسط بولا (*Bola*) و همکارانش [۱۱] در انجام آزمایشاتی در بارگذاری انفجاری استوانه های آلومینیومی و مسی بکار گرفته شده و نمودارهایی برای بیان تاریخچه زمانی تغییر شکل توسط آنها ارائه گردید.

فورستال (*Forrestal*) و همکارانش [۱۲] نیز در سال ۱۹۹۴ مدلی یک بعدی برای تحلیل پاسخ حلقه های آلومینیومی تحت بار ایمپالسو را ارائه کردند و با استفاده از مدل ساختاری الاستیک خطی و سخت شوندگی سینماتیکی برای ماده، فرآیند بارگذاری الاستوپلاستیک، باربرداری و بارگذاری معکوس را برای حلقه ها شبیه سازی کردند.

در سال ۱۹۹۳، مشکسار و برجی [۱۳] با مطالعه ی تجربی شکل دهی تیوب های جدار نازک با طول های مختلف توسط خرج های خطی و مدلسازی ریاضی فشار انفجار مشابه روش ارائه شده توسط مرجع [۳] گزارش می دهند که استفاده از خرج های خطی مناسب ترین انتخاب برای قطعات توخالی است.

نمود دیگری از تحلیل حلقه ها در طی بارگذاری های ضربه ای و سرعت بالا، بررسی پدیده گلویی شدن است. سورنسن

¹ Pin contact method

(Sorensen) و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۰۰، مرسیر (Mercier) و مولیناری (Molinari) در [۱۵] ۲۰۰۴، همچین ژو (Zhou) و همکارانش در [۱۶] ۲۰۰۶ با شبیه سازی عددی و ارائه مدل های یک بعدی با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش، به بررسی پدیده گلوبی شدن و شکست در حلقه ها در نرخ کرنش های بالا پرداخته اند.

اخیراً داهن (Daehn) و همکارانش [۱۷] متد جدید اندازه گیری پرسرعتی به نام *Photon Doppler Velocimetry* را برای مطالعه ی تجربی رفتار دینامیکی سازه ها معرفی و از آن در بدست آوردن تاریخچه زمانی رفتار حلقه ها تحت بار الکترومغناطیس استفاده کرده اند. آنها همچین با ارائه مدلی یک بعدی، این روش را روندی مناسب برای مطالعه ی خواص مکانیکی فلزات در نرخ کرنش بالا عنوان می کنند.

در یکی از پژوهش های اخیر در زمینه ی فرآیند شکل دهی الکترو مغناطیس که در سال ۲۰۰۹ منتشر شده [۱۸]، توماس (Thomas) و تریانتافیلدیس (Triantafyllidis) با استفاده از اصل حساب تغییرات و حل همزمان معادلات ماکسول و معادلات مکانیکی تغییرشکل، الگوریتمی برای تحلیل فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس ارائه داده و تغییرشکل استوانه هایی با طول های مختلف را مورد بررسی قرار داده اند. یکی از نمونه های مطرح شده در این تحلیل، استوانه ای کوتاه است که نسبت طول به شعاع کمی داشته و به همین دلیل به عنوان یکی از مراجع ارزیابی پایان نامه حاضر، استفاده شده است.

در دانشگاه گیلان، سالهاست که پژوهش هایی در مورد فرآیندهای شکل دهی سرعت بالا به روش الکترومغناطیس و انفجاری توسط دکتر ابوالفضل درویشه و دکتر منصور درویشه انجام شده و علاوه بر پایان نامه ها، منجر به انتشار مقالات متعددی نیز در این زمینه شده است [۱۹ و ۲۰ و ۲۱]. در این میان، در سال ۱۹۹۸ (۱۳۷۷) مجموعه ای از آزمایشات تجربی بر روی شکل دهی انفجاری حلقه های فلزی توسط مهران زرکش [۲۲] صورت گرفته که از نتایج حاصل از آن نیز برای ارزیابی مدل های ارائه شده در پایان نامه حاضر استفاده گردیده است.

۴-۱ روند انجام پژوهش

هدف از این پژوهش ارائه مدلهایی برای بررسی فرآیندهای شکل دهی دینامیکی با در نظر گرفتن اثرات اینرسی و اثرات نرخ کرنش به منظور تحلیل رفتار غیر خطی پلاستیک حلقه های فلزی تحت بارگذاری های نرخ بالا و متوسط با تاکید بر روش شکل-دهی انفجاری و الکترومغناطیس می باشد.

در فصل اول این پایان نامه مقدمه و مروری بر پژوهش های انجام شده در فرآیند شکل دهی دینامیکی حلقه ها ارائه می شود.

در فصل دوم روشهای شکل دهی سرعت بالا به ویژه روش انفجاری معرفی می شود.

در فصل سوم با در نظر گرفتن هندسه‌ی قطعه کار، عباراتی برای تعیین فشار انفجاری و الکترومغناطیس در فرآیند شکل دهی حلقه ها بدست می آید.

در فصل چهارم با استفاده از معادله‌ی حرکت شعاعی پوسته، مدل‌های یک بعدی ای برای بررسی تغییر شکل‌های محدود حلقه ارائه می شود.

در فصل پنجم نیز مدلی دو بعدی متقارن محوری برای تحلیل فرآیند شکل دهی دینامیکی حلقه ها به کمک حل معادله پایداری نرخ تغییرات انرژی ارائه می شود.

در نهایت در فصل ششم نتایج حاصل از مدل‌های ارائه شده برای شکل دهی انفجاری و الکترومغناطیس ارزیابی و بررسی می شوند.

روش شکل دهی انفجاری

۲-۱ مقدمه

فرآیندهای شکل دهی سرعت بالا به تکنیک‌هایی اطلاق می‌شود که در آنها ابتدا نیروی محرک صرف شتاب دادن قطعه کار به سرعتی بالا در زمانی کوتاه شده و سپس این سرعت بالا و انرژی جنبشی بدست آمده باعث تغییر شکل قطعه کار می‌گردد. این تکنیک‌ها عمدتاً بر اساس نحوه انتقال انرژی به قطعه کار دسته بندی می‌شوند. مهمترین این روشها عبارتند از:

۱- شکل دهی الکترو مغناطیس

۲- شکل دهی الکترو هیدرولیک

۳- شکل دهی انفجاری

۴- شکل دهی با چکش آبی

۵- شکل دهی با انفجار گاز

۶- شکل دهی پنیوماتیکی

فرآیندهای شکل دهی الکترو مغناطیس، الکترو هیدرولیک و روش انفجاری، که به ترتیب از تخلیه ی دفعی خازن ها درون سیم پیچ شکل دهی، تخلیه انرژی ذخیره شده در خازن به درون آب و فشار حاصل از انفجار مواد منفجره برای شکل دهی استفاده می‌کنند، امروزه کاربردهای تحقیقاتی و تجاری بیشتری داشته و در بعضی موارد با یکدیگر در رقابت هستند. در این میان شکل دهی انفجاری بارزترین فرآیند شکل دهی سرعت بالا بوده [۲] و لذا در این فصل به ارائه تاریخچه، کاربردها و معرفی آن خواهیم پرداخت اما پیش از آن، خلاصه ای بر روش های الکترو مغناطیس و الکترو هیدرولیک ارائه می‌شود.

۲-۲ شکل دهی الکترو مغناطیس

برای انجام فرآیند EMF (شکل دهی الکترو مغناطیس)، انرژی ذخیره شده در مجموعه‌ای از خازن ها درون سیم پیچی که در مجاورت قطعه کار قرار دارد تخلیه می‌شود (شکل ۱-۲). جریان عبوری از سیم پیچ، میدان مغناطیسی ای را ایجاد می‌کند که شدت آن وابسته به جریان عبوری است. میدان مغناطیسی ایجاد شده در اطراف سیم پیچ به نوبه ی خود جریان الکتریکی را در جهت خلاف جریان سیم پیچ در قطعه کار ایجاد می‌کند. جریان ایجاد شده نیز میدان مغناطیسی ای دیگری را در اطراف قطعه کار به وجود می‌آورد. دافعه‌ی بین میدان های مغناطیسی بوجود آمده نیروی لازم برای تغییر شکل قطعه کار را فراهم می‌آورد.