بسم الله الرحمن الرحيم

٩٩٠١٤

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی مهندسی- بخش مکانیک
گروه طراحی کاربردی

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

بررسی تحلیلی، عددی و تجربی فرایند شکل دهی لوله های دو جداره به روش هیدروفرمینگ

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

نگارش:
رسول فرامرزی اصفهانی

۱۳۸۷ /۵/ ۲۵

استاد راهنما: دکتر غلامحسین لیاقت

اسفند ماه ۱۳۸۶

۹۹۰۱۴

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان

آقای رسول فرامرزی اصفهانی پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان بررسی تحلیلی،عددی و تجربی فرایند شکل دهی لوله های دوجداره به روش هیدرو فرمینگ** در تاریخ ۱۳۸٦/۱۲/۱۹ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر غلامحسین لیاقت	استاد	
استاد ناظر	دکتر حسن مسلمی نائینی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد جواد ناطق	استادیار	
استاد ناظر	دکتر محمود موسوی مشهدی	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر حسن مسلمی نائینی	دانشیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی- پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم / جناب آقای دکتر مشاور سرکار خانم / جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم / جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تادیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگا می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالعه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهند به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل و جه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروشو تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب دانشجوی رشته مقطع

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی

تاریخ و امضاء:

۸۲/۱۲/۲۹

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشند.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.

تقدیم به

مادرم و همسر مهربانم

سپاس و قدردانی

اکنون که به یاری بزرگ آفریننده جهان در انجام این پایان‌نامه پیروزی یافتم، بر خود لازم می‌دانم از همه بزرگوارانی که درانجام این تحقیق به من کمک رساندند قدردانی کنم.

از راهنمایی‌ها و کمک‌های فراوان استاد راهنمای خود، آقای دکترغلامحسین لیاقت که در انجام این پایان‌نامه، کمال لطف و محبت را داشتند.

از آقایان مهندس سید محمد حسین سید کاشی، مهندس سیدمجیدناظمی، مهندس علی صافی و محمدی که کمک‌های بسیاری داشتند.

چکیده

فرآیند هیدروفرمینگ لوله جزء روشهای جدید شکل‌دهی فلزات است که در آن از فشار بسیار بالای سیال بمنظور شکل دادن فلز استفاده می شود و انواع مختلفی از تولیدات صنعتی پیچیده را می توان به کمک هیدروفرمینگ تولید نمود.

در تحقیق حاضر ضمن بررسی انواع فرایند هیدروفرمینگ لوله، تحلیل تئوری فرآیند هیدروفرمینگ لوله های دو جداره، جهت تخمین پارامترهای حاکم بر فرآیند و بعنوان مقادیر اولیه ورودی برای تحلیل اجزا محدود، انجام شده است. فرآیند هیدروفرمینگ لوله یک فرآیند نسبتاً پیچیده است که کارآیی آن به عوامل مختلفی وابسته بوده و نیازمند ترکیب مناسبی از طراحی قطعه، انتخاب ماده و مسیر بارگذاری است. شبیه سازی فرایند هیدروفرمینگ به روش اجزا محدود قادر است اطلاعاتی را پیرامون تاثیر پارامترهای مختلف بر جریان ماده، توزیع تنش و کرنش، درصد کاهش ضخامت، چروکیدگی احتمالی و یا ترکیدگی لوله بدست دهد. در این راستا شبیه سازی فرایند بمنظور بهینه کردن مسیر بارگذاری (فشار) و پیش بینی عیوب احتمالی برای دو مدل متفاوت و تحت شرایط اصطکاکی مختلف بکمک نرم افزار " eta/Dynaform v.۵,۲" انجام شده است.

در مرحله بعد برای تولید اتصال دو جداره مورد نظر، دستگاه هیدروفرمینگ لوله شامل سیستم هیدرولیک، قالب، سنبه های هیدرولیکی و تجهیزات جانبی، طراحی، شبیه سازی و ساخته شده است.

در انتها با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل های تئوری و عددی، تحت فشارهای بدست آمده و شرایط روانکاری مناسب به تولید عملی قطعه پرداخته شد و مشاهده گردید نتایج حاصله از روابط تئوری و شبیه سازی با واقعیت موجود تولید قطعه، همخوانی و مطابقت خوبی دارد.

فهرست علائم اختصاری

d_i	قطر خارجی لحظه‌ای لوله داخلی
d_o	قطر خارجی لحظه‌ای لوله خارجی
D_i.	قطر خارجی اولیه لوله داخلی
D_o.	قطر خارجی اولیه لوله خارجی
E	مدول الاستیسیته
F_a	نیروی محوری
F_i	نیروی محوری اعمالی به لوله داخلی
F_o	نیروی محوری اعمالی به لوله خارجی
k	ضریب استحکام
K_i	ضریب استحکام لوله داخلی
K_o	ضریب استحکام لوله خارجی
L	طول نهایی لوله
l_o	طول تماس اولیه لوله خارجی
l_i	طول تماس اولیه لوله داخلی
m	ضریب حساسیت به نرخ کرنش
n	توان کارسختی
n_i	توان کارسختی لوله داخلی
n_o	توان کارسختی لوله خارجی
P_a	فشار داخلی استوانه جدار ضخیم
P_b	فشار خارجی استوانه جدار ضخیم
$P_{contact}$	فشار شکل دهی لوله خارجی
$P_{for\min g}$	فشار شکل دهی لوله داخلی و خارجی
P_i	فشار لحظه‌ای
P_{imin}	حداقل فشار اولیه
P_{iy}	فشار تسلیم
P_{ib}	فشار ترکیدگی
P_{imax}	فشار کالیبراسیون
R	ضریب ناهمسانی
r_a	شعاع داخلی استوانه جدار ضخیم
r_b	شعاع خارجی استوانه جدار ضخیم
r_{i0}	شعاع داخلی اولیه لوله داخلی
r_i	شعاع داخلی نهایی لوله داخلی
r_{o0}	شعاع داخلی اولیه لوله خارجی
r_o	شعاع داخلی نهایی لوله خارجی
R_o	شعاع خارجی نهایی لوله خارجی

R_i شعاع خارجی نهایی لوله داخلی

t_{i0} ضخامت اولیه لوله داخلی

t_i ضخامت لحظه‌ای لوله داخلی

t_{o0} ضخامت اولیه لوله خارجی

t_o ضخامت لحظه‌ای لوله خارجی

α نسبت تنش

β نسبت کرنش

ε کرنش

μ ضریب اصطکاک

υ ضریب پواسون

ρ چگالی

σ_θ تنش مماسی

σ_r تنش شعاعی

σ_y تنش تسلیم

σ_{iy} تنش تسلیم لوله داخلی

σ_{oy} تنش تسلیم لوله خارجی

σ_{uts} حداکثر تنش کششی

فصل اول

بررسی فرایند هیدروفرمینگ لوله

۱-۱ مقدمه و تاریخچه

امروزه یکی از روشهای هوشمندانه، ساده و با دقت در شکل دهی فلزات، شکل دهی به روش هیدروفرمینگ است. هیدروفرمینگ یکی از روشهای تولید است که در آن به کمک اعمال فشار سیال، قطعه ورودی به شکل از پیش طراحی شده حفره قالب، در می‌آید.

قطعه ورودی به دو صورت ورق و یا لوله مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا براساس نوع قطعه اولیه، چنانچه از ورقهای فلزی استفاده شود، فرآیند مذکور، هیدرفرمینگ ورق و در صورت استفاده از قطعات لوله مانند، فرآیند، هیدرفرمینگ لوله، نامیده می‌شود. در هر دو روش فوق الذکر، به یک ابزار هیدروفرمینگ (قالب)، یک پرس هیدرولیک و یک سیستم تقویت کننده فشار سیال، نیاز است.

یک سیکل کاری فرآیند شامل قرار دادن قطعه خام در قسمت پایین قالب، بسته شدن قالب و اعمال فشار سیال به قطعه با مقطع لوله ای و یا ورق فلزی است. فشار سیال به حدی است که باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک در قطعه گردیده و آن را به شکل حفره قالب، در می آورد. ایجاد سوراخها و یا شکافهای از پیش طراحی شده نیز در حین فرآیند که قطعه تحت فشار بالای سیال است، امکان پذیر است[۱].

امروزه این روش به عنوان جایگزینی برای فرآیندهای سنبه ماتریسکاری و جوشکاری سنتی، در ساخت اجزاء اتومبیل به خودروسازان پیشنهاد می شود. این روش می تواند وزن قطعه را کاهش داده، دورریز مواد را به حداقل رسانده و منجر به ساخت قطعات مستحکم تر و مقاوم‌تر که نیاز به جوشکاری کمتر نیز داشته باشند، شود. همچنین می تواند دقت ابعادی را در کاربردهای خاص بسیار بهبود بخشد[۲].

اجزاء لوله ای هیدروفرم شده دارای نسبت استحکام به وزن بالاتر و قیمت پایین‌تری در مقایسه با روشهای معمول تولید قطعات مشابه هستند. روش هیدروفرمینگ لوله با موفقیت در تولید انبوه مورد استفاده قرار گرفته است. قیمت پایین به شرط تولید انبوه برای اشکال پیچیده، وزن کمتر و کیفیت بهتر، مؤلفه های اصلی پیشرفت سریع این روش می باشد . در روش هیدروفرمینگ ورق، امکان بدست آوردن عمق کشش بالاتر، قیمت پایین‌تر ابزار قالب و یکنواختی بیشتر در کشیده شدن مواد در مقابل سطوح اعمال کشش، وجود دارد. با این حال به خاطر نیاز به سیکل تولید طولانی‌تر و پرسهای عظیم، این روش در حد تولید غیرانبوه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کاربردهای اصلی هیدروفرمینگ لوله را می توان در صنایع خودروسازی، هواپیماسازی و همچنین لوازم بهداشتی یافت. در صنعت خودروسازی می توان از قطعات اگزوز، میل بادامکها، قاب رادیاتور، اکسلهای جلو و عقب، کلافهای موتور، میل لنگها، قاب صندلی ها، اجزاء بدنه و چارچوب کلی خودرو نام برد.نیاز به سیکل تولید طولانی‌تر و پرسهای عظیم، این روش در حد تولید غیرانبوه مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱] .

هیدروفرمینگ یکی از انواع فناوری شکل دهی با ابزار نرم می باشد. فناوری شکل دهی با ابزار نرم خود شامل دو دسته زیر می باشد:

- فناوری شکل دهی با پد لاستیکی
- فناوری شکل دهی با سیال

شکل دهی با سیال نیز شامل دو گونه زیر می باشد:

- شکل دهی با گاز، بعنوان مثال بالجینگ سوپر پلاستیک ورقهای فلزی
- هیدروفرمینگ

در هیدروفرمینگ، می توان از روغن، آب و یا دیگر سیالات بعنوان سنبه یا ماتریس استفاده کرد. از هیدروفرمینگ با اسامی گوناگونی یاد شده است: هیدروفرمینگ، شکل دهی هیدرولیکی، کشش عمیق هیدروفرمینگ، شکل دهی انعطاف‌پذیر، هیدروبالجینگ، شکل دهی فشار بالا ، شکل دهی فشار پایین و کشش عمیق هیدرومکانیکال، که از میان آنها، هیدروفرمینگ را می توان برای هر وضعیتی که در آن فشار

سیال بعنوان ابزار شکل دهی استفاده می شود، بکار برد، درحالیکه بقیه به یک نوع خاص از فرآیند شکل دهی هیدرولیکی و فرآیندی که به کمک سیال انجام می‌شود، اشاره دارند[۲].

امروزه افزایش کاربرد فناوری هیدروفرمینگ برای تولید اجزاء سبک وزن خودرو، عمدتاً به خاطر مزایای فراوان قابل دستیابی با این فرآیند در بهبود خواص قطعه و همچنین توسعه فناوری ساخت تجهیزات شکل دهی می باشد. فناوری هیدروفرمینگ می تواند به کاهش وزن تا ۳۰٪ در مقایسه با قطعات تولید شده به روشهای سنتی دست یابد. علاوه بر این کاهش چشمگیر تعداد قطعات در یک مجموعه مونتاژی را می توان به همراه بهبود خواص قطعه مانند صلبیت مشاهده نمود. بهره وری اقتصادی هیدروفرمینگ نیز بهمراه کاهش تجهیزات شکل دهی و زمان تولید، ممکن شده است.

در بسیاری از موارد، معمولاً قطعه کار اولیه یک محصول نیمه تمام می باشد، عمدتاً یک لوله که بصورت سرد یا گرم شکل دهی شده و بصورت طولی جوشکاری گردیده است. امروزه این لوله ها برای استفاده در هیدروفرمینگ لوله، عمدتاً از فولاد یا آلومینیوم ساخته می شوند. افزودن مواد آلیاژی و انجام عملیات حرارتی نیز در کاربردهای خاص صورت می پذیرد. برای تضمین قابلیت اطمینان فرآیند در حد رضایت بخش، علاوه بر قابلیت شکل‌پذیری کافی ماده اولیه، خواص محصول نیمه تمام نیز باید با کیفیت قابل اطمینان باشد. لوله های آلومینیومی در حال حاضر غالباً از مقاطع اکسترود شده تولید می شوند. ولی بعضی از انواع آنها، بصورت لوله های درزدار با خط جوش طولی استفاده می شوند. سازندگان لوله اهمیت این بازار را درک کرده اند و در حال سرمایه گذاری برای تولید لوله های اولیه بهینه سازی شده و مناسب برای هیدروفرمینگ می‌باشند.

به طور کلی موارد زیر را می توان به عنوان مزایای اصلی قطعات تولیدی به روش هیدروفرمینگ لوله نام برد:

- تولید قطعات با اشکال پیچیده
- کاهش وزن قطعه
- کاهش تعداد اجزاء تشکیل دهنده یک قطعه و میل به سمت یکپارچه شدن قطعه
- کاهش هزینه مونتاژ در اثر کاهش تعداد قطعات
- نیاز به عملیات ثانویه کمتر
- کاهش هزینه ابزار به واسطه اجزاء کمتر
- افزایش استحکام و صلبیت قطعه
- پایداری و دقت ابعادی بیشتر (کاهش برگشت فنری)

توسعه صنعتی هیدروفرمینگ از سال ۱۹۸۰ میلادی آغاز شده‌است. اما این فرآیند دارای پیشینه‌ای طولانی است. استفاده از فشار سیال برای شکل دهی به اوایل قرن بیستم میلادی باز می گردد.

Park با مقاله ای در سال ۱۹۰۳، ابزار و اسباب لازم جهت شکل دهی یک قطعه مارپیچ توخالی را که در ساختمان یک بویلر مورد استفاده قرار می‌گیرد، شرح می دهد. قطعه مارپیچی شکل از یک قطعه لوله ای ساخته شده بود. در ابتدا یک لوله مستقیم پیش‌گرم شده در داخل قالب قرار داده شده و سپس بـه وسـیله سرب مذاب پر گردیده است. در نهایت فلز مذاب تحت فشار قرار گرفته تا اینکه، لوله به شـکل حفـره قالـب تغییر شکل دهد. اصول اولیه استفاده از سیال تحت فشار در شکل دهی، در این مقاله دیده می‌شوند.

در سال ۱۹۱۷،توسط Foster یک فرایند جهت بهبود نحوه خم‌کاری لوله‌های برنجی که در ابزارآلات موسیقی مورد استفاده قرار می گرفتند، به عنوان یک مقاله منتشر گردید. باتوجه به شـرح مقالـه، المانهـای اساسی در فرایند هیدروفرمینگ لوله دیده مـی شـوند. مزایـای ایـن روش در مقالـه تحـت عنـوان کـاهش کاردستی و بهبود یکنواختی در شکـل و ابعـاد نهـایی معـرفی می گردنـد. امـروزه از تکنیکهـای مشـابهی برای تولید شیرآلات بهداشتی استفاده می گردد.

مقاله ای در سال ۱۹۴۰، توسط Gray بـه بررسـی سـاخت یـک قطعـه T شـکل پرداختـه اسـت. از مشخصه های این روش تغذیه محوری لوله در فشار پایین سیال و سپس افزایش فشار سیال، تا حد حداکثر برای شکل دهی نهایی می‌باشد. روش تغذیه مواد از دو انتهای لوله به سمت وسط، امکان تولید قطعات چند انشعابه را فراهم می نماید.

باتوجـه به بررسـی سـوابـق موجـود، رشد شگفت انگیز روش هیدروفرمینگ لولـه در صـنعت، بـه دو دهه اخیر باز می گردد.

در سـال ۱۹۸۶، شـرکت " Standard Tube Canada of Woodstock " ، تولیـد کننـده لولـه و قطعات لوله مانند، نخستیـن مقـاله را در آمریکای شمالی جهت کاربرد تکنیک هیدروفرمینگ برای قطعـات و قابهای بزرگ منتشر نمود[۱].

در سال ۱۹۹۸، Bruggemann و Chi – Mou از شرکت جنرال موتورز ایده استفاده از لوله های بـا ضخامتها و قطرهای مختلف و به صورت چند قسمتی را در تولید یک قاب کامل به روش هیـدروفرمینگ در یک قالب، معرفی نمودند. در این روش، ابتدا تعدادی از قطعات لوله ای شکل ساده به همـدیگر جـوش داده می شوند تا شکل مونتاژ مورد نظر را به صورت اولیه، ایجاد نماید. قطعات مونتاژ شده در نهایت در یک قالب با حفره مناسب، هیدروفرم می‌گردند [۳].

در سال ۱۹۹۹، K. Manabe با استفاده از روشهای اجزا محدود به بررسی کاهش موضعی ضخامت و پارگی در هیدروفرمینگ قطعات لوله مانند پرداخته است. در این مقاله تأثیر پارامترهای فرایند و ماده، نـوع المانهای مورد استفاده و شکل مقطع نهایی بر کاهش موضعی ضخامت با استفاده از شبیه سازی مورد بحـث قرار گرفته است [۴].

در سال ۱۹۹۹، T. Altan بـه اتفـاق همکـاران خـود، بـه بررسـی آثـار ویژگیهـای مـواد در فرآینـد هیدروفرمینگ لوله پرداختـه اسـت. ایـن مقـاله روشی کـاربـردی جهت تعیین جریان تنش مواد لوله مورد استفاده در فرآیند را شـرح می دهد[۵].

در سال ۱۹۹۹، M. Prier به همراه همکاران خود، به بررسی پیشرفتهای حاصله و آینده شکل دهی مقاطع توخالی به کمک فشار سیال پرداخته است [۶].

O.Ghouati به اتفاق همکاران خود در سال ۱۹۹۹ به شبیه سازی و کنترل فرآیند هیدروفرمینگ لوله به صورت سه بعدی پرداخته است. کد اجزا محدود مورد استفاده در این فعالیت بر پایه المان پوسته ای ایزوپارامتریک با ۳ یا ۴ گره استوار بوده است [۷].

در سال ۲۰۰۰، Muammerkoc به اتفاق همکاران خود، به فعالیت در مورد استفاده از روش اجزاء محدود و طراحی یک سری آزمایشهای تجربی برای تدوین راهکارهایی جهت طراحی و ساخت قطعات ساده هیدروفرم شده پرداخت. در این مقاله، کوشیده شده است، مدلهایی برای پیش بینی حداکثر ارتفاع برآمدگی در قطعات T شکل هیدروفرم شده، معرفی گردند [۸].

در سال ۲۰۰۰، Li – Ping Lei و همکاران به تحلیل و « طراحی فرآیند هیدروفرمینگ هوزینگ اکسل عقب اتومبیل با استفاده از روش اجزاء محدود پرداخته اند[۹] .

در سال ۲۰۰۲ و در جریان کنفرانس هفتم ICTP، P. Groch مقاله‌ای در زمینه عملکرد و تأثیر روانکارها در هیدروفرمینگ لوله ارائه نموده است [۱۰].

در سال۲۰۰۲، M. Plancak و F. Vollrtsen به بررسی امکان سنجی تعیین ضریب اصطکاک در فرآیند هیدروفرمینگ لوله پرداختند. در مقاله ارائه شده، با توجه به اهمیت وتأثیر زیاد ضریب اصطکاک در فرآیندهای شکل دهی و عدم کارآیی قطعی روشهای آزمایش موجود درتعیین ضریب اصطکاک به ویژه در ناحیه انبساط فرآیند هیدروفرمینگ که قطعه به صورت کاملاً پلاستیک تغییر شکل می دهد، یک روش جدید که بر پایه " Tube Upsetting "بنا شده است، معرفی می گردد. در این روش، مقایسه و الحاق نتایج آزمایشهای تجربی و شبیه سازی اجزا محدود، منجر به تعیین ضریب اصطکاک می گردد [۱۱] .

در سال۲۰۰۲، Taylan Altan و Muammerkoc، ضمن ارائه مقاله ای به بررسی کاربرد روش اجزاء محدود دو بعدی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله پرداختند. در این مقاله تعدادی از حالتهای مورد مطالعه جهت شرح کارآیی و استفاده از تحلیل اجزاء محدود دو بعدی، در هیدروفرمینگ لوله معرفی گردید [۱۲].

در سال ۲۰۰۴، G. Ngaile به اتفاق همکاران خود به بررسی روانکاری در هیدروفرمینگ لوله پرداخت. در مقاله ارائه شده از سوی این گروه، بر روی مکانیزمهای روانکاری که در قالب و در نواحی گذرا وانبساط اتفاق می افتد، بحث گردیده است و جزئیات مربوط به دو مدل آزمایش کاربردی برای بررسی رفتار و عملکرد روانکارهای مورد استفاده در هیدروفرمینگ لوله و نوع پوشش قالب، ارائه شده است. در فعالیت انجام گرفته توسط این گروه، اساس بهینه سازی ابعاد قالب مدل، بر پایه تحلیل اجزا محدود و آزمایشهای تجربی و الحاق نتایج با یکدیگر بوده است [۱۳].

درسال ۲۰۰۴، Matto Strano به اتفاق همکاران خود، مقاله ای را در زمینه توسعه و پیشرفت فرآیند هیدروفرمینگ لوله با استفاده از روشهای اجزا محدود ارائه نمود. در بخش نخست این مقاله، مؤلفین به بررسی اطلاعات و داده های مورد نیاز و حساس ورودی به برنامه اجزاء محدود می پردازند. در بخش دوم

این مقاله، برخی از روشها و استراتژیهای سودمند در زمینه روش اجزا محدود که هم اینک در مرکز ERC/NSM مورد استفاده قرار می گیرند، شرح داده می شوند [۱۴].

در سال ۲۰۰۴، Taylan Altan به همراه همکاران خود به بررسی روانکارها در فرآیند هیدروفرمینگ پرداخته و عملکرد روانکارها را به کمک آزمایش LDH (Limiting Dome Height) و آزمایش PET (Pear – Shaped tube expansion Test) در دو ناحیه اصلی گذرا و انبساط مورد ارزیابی قرار داده است. در این فعالیت، نهایتاً ضرایب اصطکاک روانکارهای مورد استفاده در آزمایشگاه از طریق مقایسه نتایج آزمایشهای تجربی و نتایج اجزاء محدود، بدست آمده اند [۱۵].

در سال ۲۰۰۴، Aydemir و همکاران خود بر روی روشهای نوین شبیه سازی و فرآیند هیدروفرمینگ لوله فعالیت نمودند. باتوجه به اینکه در فرآیند هیدروفرمینگ لوله کارآیی فرآیند، به طور وسیعی به کنترل پارامترهای فرآیند از جمله فشار داخلی و تغذیه محوری بستگی دارد، در این مقاله روشی نوین جهت کنترل بیشتر و بهینه تر فرآیند هیدروفرمینگ لوله ارائه گردیده است. این روش از ایجاد چروکیدگی و یا ترکیدگی قطعه جلوگیری می نماید. قطعه مورد مطالعه در این مقاله، یک قطعه T شکل است که به کمک روش مذکور و ترکیب با روش اجزاء محدود، طراحی گردیده است [۱۶].

در سال ۲۰۰۴، G.Ngaile به اتفاق همکاران خود، فعالیتی را در زمینه بهینه سازی فرآیند هیدروفرمینگ لوله با استفاده از شبیه سازی و بازبینی آزمایشگاهی انجام داد. با توجه به اینکه موفقیت هیدروفرمینگ لوله به طور عمده به نحوه بارگذاری (تغذیه محوری در مقابل فشار) وابسته است، لذا از FEM جهت شبیه سازی فرآیند و تعیین مسیرهای بارگذاری بهینه برای قطعات لوله مانند با مواد مختلف، با هدف کاهش روشهای سعی و خطای فعلی استفاده گردیده است. نتایج تجربیات آزمایشگاهی حاکی از این است که، صحت نتایج حاصله از FEM در این زمینه به شدت وابسته به صحت اطلاعات مربوط به خواص مواد قطعه اولیه، ضریب اصطکاک و ویژگیهای جوش استفاده شده در قطعه می باشد [۱۷].

در سال ۲۰۰۶ ، A.Kocanda و همکارش یک راهکار برای محدودیت های موجود در فرایند هیدروفرمینگ اتصالات X شکل براساس برآورد قابلیت شکل گیری در نظر گرفتند. دراین مقاله، تجربی اتصالات X شکل هیدروفرمینگ شده با نتایج شبیه سازی FEA مورد مقایسه قرار گرفتند. اثر مدت زمان بارگذاری و مشخصات ماده لوله ایی تغییر شکل یافته بر امکان انجام فرایند، نشان داده شده است. روش تخمین منحنی حد شکل دهی FLC برای تعیین نقطه شروع تمرکز کرنش و شکست ناشی از ترکیدگی بکار برده می شود. تخمین شکست بر اساس FLC که عموماً برای شکل دهی ورق مورد استفاده قرار می گیرد، محدودیت هیدروفرمینگ برای اتصالات X شکل را بطور قابل ملاحظه ای کاهش داده است . بنابراین پیشنهاد می شود که FLC_m تغییر یافته در طرح ریزی فرایند هیدروفرمینگ، بتواند مورد استفاده قرار گیرد[۱۸].

در سال۲۰۰۶ ،M.D.Islam و همکارانش امکان اجرای شکل دهی اجزاء لوله ای چند لایه را به وسیله هیدروفرمینگ و شبیه سازی اجزاء محدود مورد بررسی قرار دادند. هیدروفرمینگ یک نوع فرایند

شکل دهی غیر منظم (اشکال پیچیده)است که در آن از فشار مایع به شدت بالا، برای تغییر شکل دادن مواد، به شکل مطلوب استفاده می شود. انواع مختلف تولیدات صنعتی پیچیده و مونتاژ شده را می توان بوسیله فرایند هیدروفرمینگ بدست آورد.

شبیه سازی بوسیله کاربرد هر دو فشار داخلی و بار فشاری سطحی که بعنوان بار اصلی شکل دهی است، اجرا می شود. قطعه خام در یک قالب از پیش شکل داده شده، قرار داده می شود و بخاطر اثر بار شبیه سازی شده شکل مطلوب، مثل شاخه هایT یا X شکل شکل داده می شود. این فرایند برای تولیدات بدون درز، سبک وزن و شبیه به قطعات صنعتی مناسب است . نتایج شبیه سازی بوسیله آزمایش و بر اساس حالت تغییر شکل اجزاء تغییر شکل داده شده، مورد تائید قرار می گیرد[۱۹].

در سال ۲۰۰۶، Shijian Yuan و همکارانش تأثیر رفتار چروکیدگی روی شکل پذیری و توزیع ضخامت ، در هیدروفرمینگ لوله را مورد بررسی قرار دادند. یک تجربه و شبیه سازی باعث بررسی تأثیر رفتار چروکیدگی روی شکل پذیری و توزیع ضخامت در هیدروفرمینگ لوله گردید .

چروکیدگی ها می توانند به سه دسته به شرح زیر طبقه بندی شوند :

- چروکیدگی مفید
- چروکیدگی مرده
- چروکیدگی های انفجاری

چروکیدگی های مرده و انفجاری در هیدروفرمینگ عیب می باشند . با استفاده از چروکیدگی مفید، بهبود در شکل پذیری داشته و نیز قطعه مورد نظر، با نسبت انبساط بیشتر بدست می آید که در عین حال دارای این مزیت است که نیازی به فرایند پیش شکل دهی اضافی نیست.

زمانیکه ضخامت قطعه در طول جهت محوری در سطح شکل دهی یکسان نیست، ناحیه بالای امواج چروکیدگی کمترین ضخامت را دارد در حالیکه بیشترین ضخامت در زیر ناحیه بالای چروکیدگی قرار دارد. چروکیدگی مفید می بایست در طول کالیبراسیون، هم با حالت تنش و هم با حالت هندسی منطبق باشد. اگربا حالت تنش منطبق نباشد، چروکیدگی انفجاری رخ می دهد و اگر حالت هندسی رضایت بخش نباشد چروکیدگی مرده ایجاد می شود[۲۰] .

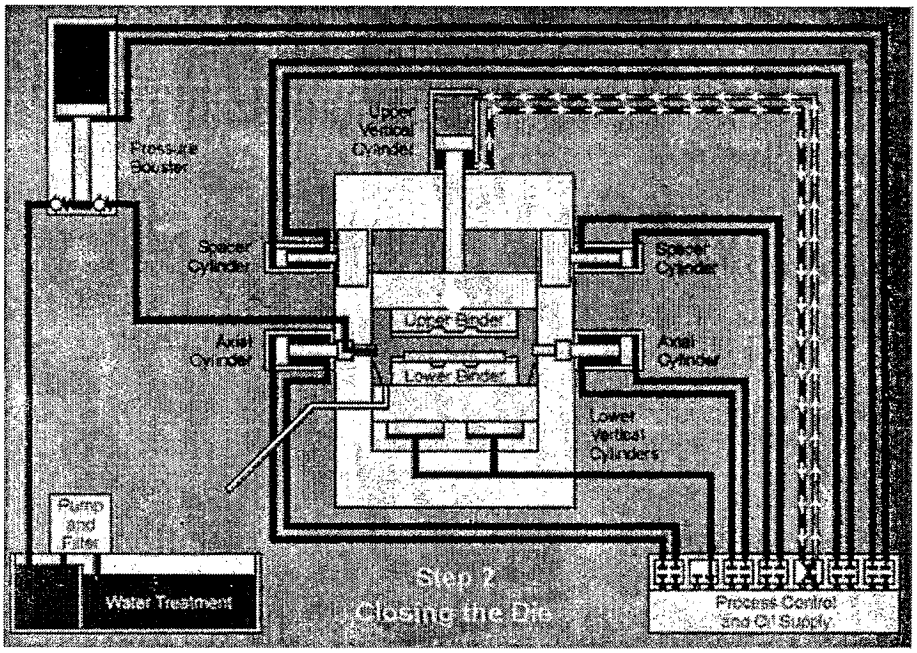
۲-۱ *فرایند هیدروفرمینگ لوله*

هیدروفرمینگ، یکی از فرآیندهای شکل دهی فلزات است که از سال ۱۹۸۰ میلادی توسعه صنعتی آن آغاز شد. در این روش به کمک سیال پر فشار، قطعه خام اولیه به شکل حفره درون قالب در می‌آید. قطعه خام اولیه را می‌توان به صورت ورق و یا لوله به کار برد. اگر در این فرآیند از ورق استفاده گردد، فرآیند "هیدروفرمینگ ورق"[۱] و اگر از مقاطع لوله ای استفاده شود، فرآیند "هیدروفرمینگ لوله"[۲] نامیده

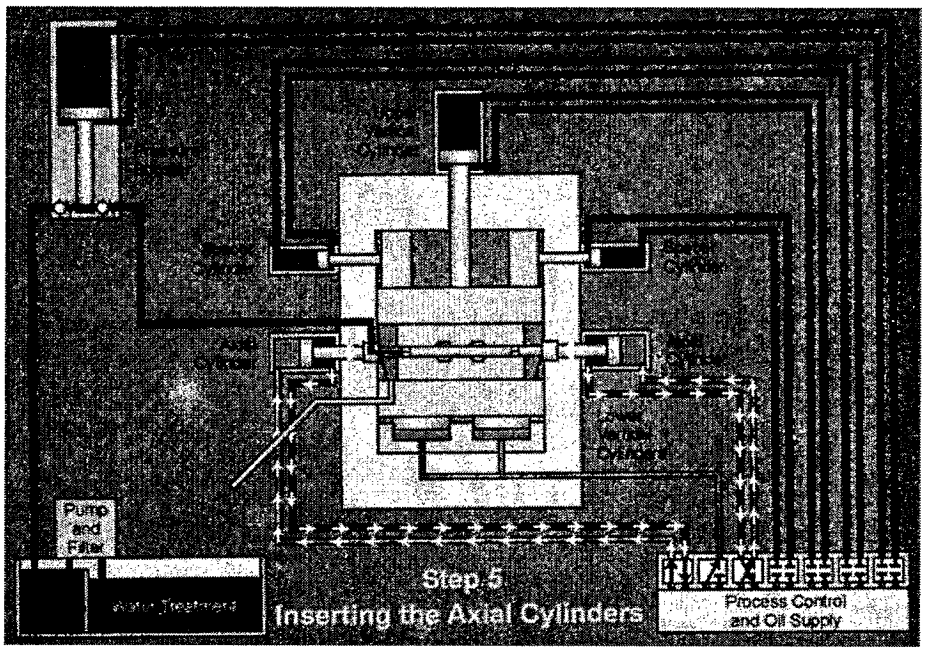
[۱] Sheet Hydroforming
[۲] Tube hydroforming

می‌شود. در هر کدام از این فرآیندها، همواره به یک پرس هیدرولیک، قالب هیدروفرمینگ و یک سیستم تقویت کننده فشار نیازاست.

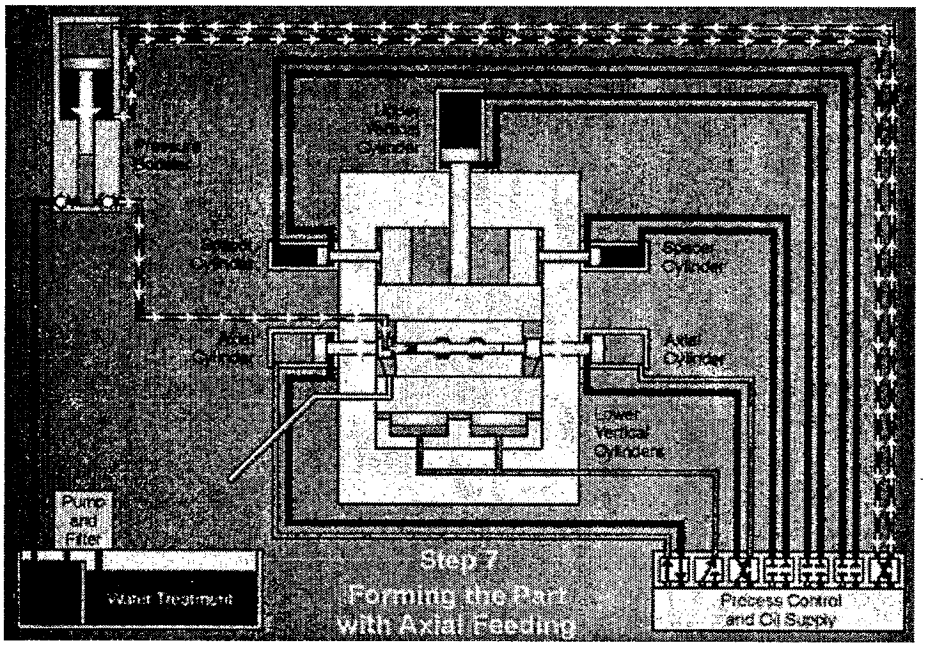
به طور عمومی، یک سیکل فرآیند شامل جایگذاری قطعه خام اولیه در قسمت پایین قالب، بسته شدن قالب و اعمال سیال پر فشاربوسیله سنبه های آب‌بندی به درون لوله و یا یک طرف ورق می‌باشد. فشار سیال باید به میزانی باشد که باعث تغییر شکل پلاستیک قطعه خام شده و باعث گردد که قطعه شکل حفره قالب را بگیرد. در شکل‌های زیر فرآیند هیدروفرمینگ لوله به صورت شماتیک و برای سیستم خاصی ازپرس هیدرولیک نشان داده شده است (شکل۱-۱ تا شکل۱-۴).



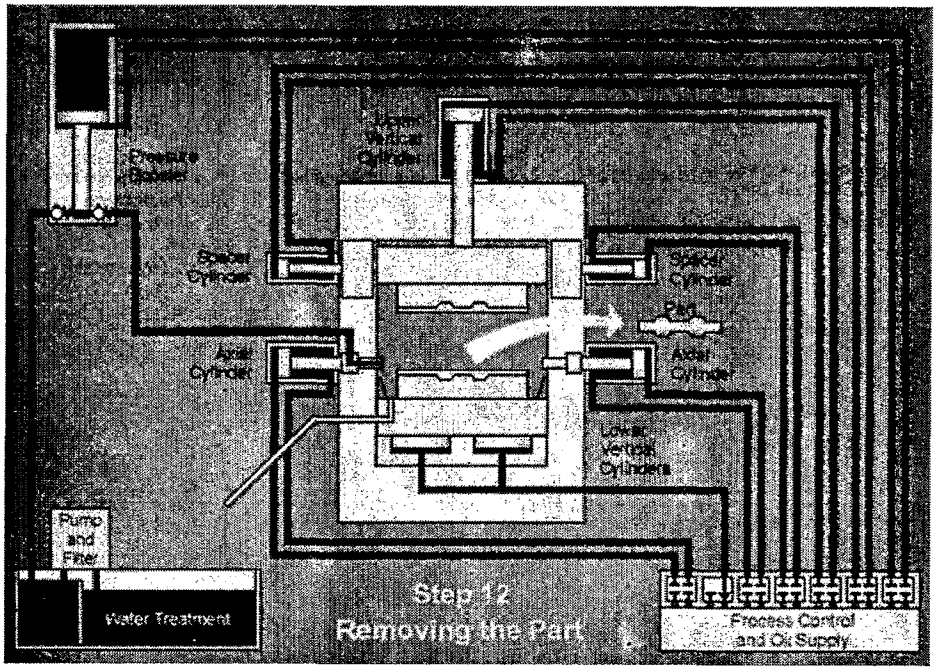
شکل۱-۱: بسته شدن قالب[۲۲]



شکل۱-۲: پیشروی سیلندرهای انتهایی[۲۲]



شکل۱-۳: شکل‌گیری قطعه همراه با تغذیه محوری[۲۲]



شکل۱-۴: خارج شدن قطعه از قالب[۲۲]

امروزه فرآیند هیدرفرمینگ لوله درصنایع مختلف مانند خودروسازی، هوا فضا، لوازم خانگی و شیرآلات بهداشتی و صنایع نظامی و هسته‌ای به خوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. درشکل ۱-۵ مثالهایی از کاربرد این فرآیند می‌آید.

سیکل های هیدروفرمینگ لوله را می توان دربرگیرندهٔ سوراخزنی هیدرولیکی، برای ایجاد سوراخها و شیارها در قطعه نمود. ابزار سوراخکاری در داخل قالب بکار گرفته می‌شود و در خلال سیکل شکل دهی، با استفاده از سیلندرهای هیدرولیکی فعال می گردد. عمل سوراخکاری معمولاً در خلاف جهت سیال به سمت داخل می باشد.

سوراخکاری را می توان با استفاده از یک میلهٔ توپی یا یک سنبهٔ پشت‌بند بصورت معکوس یعنی با کشیده شدن به سمت داخل نیز، انجام داد. در این حالت فشار سیال در داخل لوله باعث می شود که ماده سطحی پاره شود و سوراخی در بخش تقویت نشده دیواره لوله ایجاد گردد.