

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته
مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید

عنوان

بررسی تجربی و عددی حد شکل دهی در فرایند هیدروفورمینگ لوله های فلزی

نگارش

مهدی فلاحتی نقیبی

اساتید راهنما

دکتر مهدی گردویی

دکتر محمد بخشی جویباری

استاد مشاور

دکتر عبدالحمید گرجی

بهمن ۱۳۹۲

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که نه تنها در تمامی مراحل تحصیل که در یکایک گام‌های زندگی‌م همراهیم نمودند....

تشکر و قدردانی

با تحمید ذات مقدس حضرت حق (جل جلاله) که توان انجام این پژوهش را عطایم نمود و سلام و صلوات بر وجود پاک نبی اکرم (ص) و اهل بیت مطهرش (س) و یگانه منجی عالم بشریت، قائم آل محمد (عج) و درود و سلام بر رهپویان ولایت و تمامی کسانی که در راه حق گام برمی دارند. بر خود واجب می دانم تا از اساتید گرانقدرم جناب آقای دکتر مهدی گردویی و جناب آقای دکتر محمد بخشی که در راستای انجام این پژوهش راهنمایم بودند، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورم. همچنین از جناب آقای دکتر عبدالحمید گرجی که به عنوان استاد مشاور از حضورشان بهره جستم سپاسگزارم. لازم است تا از تمامی اساتید دانشکده مهندسی مکانیک و سایر اعضای هیئت علمی و مسئولین دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل که در دوران تحصیل در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد از حضورشان بهره علمی و معنوی بردم تشکر نمایم.

در پایان بر خود لازم می دانم تا از جناب آقای دکتر اصغر شمسی سربندی که در طی انجام این پژوهش صمیمانه همراهیم نمودند و به جد از هیچ کوششی دریغ نفرمودند کمال سپاسگزاری را داشته باشم.

چکیده

تولید محصولات پیچیده صنعتی از لوله‌های فلزی با هدف افزایش نسبت استحکام به وزن سازه‌ها و خصوصاً کاهش مصرف سوخت وسایل نقلیه در سال‌های اخیر مورد توجه صنعتگران قرار گرفته است. در این راستا یکی از فرایندهای جدید مورد استفاده، روش‌های شکل‌دهی با سیال (هیدروفرمینگ) می‌باشد. پارگی در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌ها و لوله‌ها به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل محدود کننده، با استفاده از منحنی‌های حد شکل‌دهی (FLD) مورد ارزشیابی قرار می‌گیرد. استفاده از منحنی حد شکل‌دهی برآمده از روش‌های شکل‌دهی سنتی در فرایند هیدروفرمینگ معتبر نیست. بکارگیری منحنی حد شکل‌دهی برآمده از روش‌های شکل‌دهی ورق نیز در فرایندهای هیدروفرمینگ لوله خطاساز است.

در این پژوهش با هدف پیش‌بینی تجربی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴، نخست در فرایند هیدروبالجینگ متقارن محوری به بررسی عددی اثر نحوه بارگذاری و هندسه قالب بر مسیر کرنش‌گذاری و ناپایداری پلاستیک ایجاد شده در لوله پرداخته شد. به منظور بررسی اثر نحوه بارگذاری، سه نوع بارگذاری آزاد، بارگذاری با تغذیه محوری لوله و بارگذاری با انتهای ثابت لوله مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعه اثر هندسه قالب با تغییر در شعاع گوشه (R) و طول ناحیه تغییر شکل (W) انجام شد. در این پژوهش، اثر مقدار تغذیه محوری لوله در حالت بارگذاری با تغذیه محوری بر روی نسبت کرنش (β) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عددی نشان داد که مسیر کرنش‌گذاری لوله در دو حالت بارگذاری آزاد و بارگذاری با انتهای ثابت لوله، به صورت تقریباً مشابه در سمت راست منحنی حد شکل‌دهی قرار دارد. در این شرایط، با افزایش طول ناحیه تغییر شکل (W)، نسبت کرنش (β) به سمت صفر میل می‌کند که این نتیجه مستقل از شرایط مرزی است. با افزایش شعاع گوشه قالب (R) در حالت بارگذاری آزاد، با کاهش نسبت کرنش (β) مسیر کرنش‌گذاری به سمت حالت کرنش‌صفحه‌ای نزدیک می‌شود؛ درحالی‌که در بارگذاری با تغذیه محوری لوله، افزایش شعاع قالب تاثیر قابل توجه‌ای بر مسیر کرنش‌گذاری قطعه و نسبت کرنش ندارد. در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، با افزایش مقدار تغذیه لوله، نسبت کرنش (β) کاهش چشم‌گیری می‌یابد. در بخش تجربی از این تحقیق، از بین آزمون‌های مختلف شبیه‌سازی شده تعداد ۱۰ آزمون با پراکندگی مناسب مسیر بارگذاری بر

روی صفحه کرنش انتخاب گردید. پس از طراحی و ساخت قالب، لوله‌های مدرج شده تا رسیدن به پارگی تحت شرایط کنترل شده تحت بارگذاری قرار گرفت و با اندازه‌گیری کرنش در نواحی مجاور پارگی منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی ترسیم گردید. منحنی FLD بدست آمده برای لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ با منحنی FLD همین جنس از ورق از مطالعات دیگر محققین مورد مقایسه قرار گرفت.

در مرحله نهائی به‌منظور بررسی کارائی و دقت معیار شکل‌پذیری استخراج شده، از آن برای پیش‌بینی پارگی در فرایند ساخت بادامک از لوله مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحلیل عددی و تجربی در این بخش نشان داد که منحنی FLD بدست آمده با دقت قابل قبولی توان پیش‌بینی شکل‌پذیری را در فرایند هیدروفرمینگ بادامک داراست. علاوه بر این، بررسی شکل‌پذیری قطعه صنعتی تایید کرد که منحنی حد شکل‌دهی بدست آمده در این پژوهش برای پیش‌بینی شکل‌پذیری قطعه‌های صنعتی قابل استفاده است.

کلید واژه‌ها: تحلیل تجربی کرنش، شبیه‌سازی اجزای محدود، نمودار حد شکل‌دهی، هیدروفرمینگ لوله

فهرست مطالب

ا	تقدیم به
ب	تشکر و قدردانی
ت	چکیده
ج	فهرست مطالب
د	فهرست شکل ها
ر	فهرست جدول ها

فصل اول: کلیات

۱

۱-۱	مقدمه
۲-۱	معرفی فرایندهای شکل دهی فلزات
۳-۱	معرفی فرایند هیدروفرمینگ
۳-۱-۱	تاریخچه فرایند هیدروفرمینگ
۳-۱-۲	انواع فرایندهای هیدروفرمینگ
۳-۱-۳-۱	هیدروفرمینگ ورق
۳-۱-۳-۲	هیدروفرمینگ لوله
۴-۱	نمودار حد شکل دهی
۴-۱-۱	کاربردهای نمودار حد شکل دهی
۴-۱-۱-۱	کاربرد نمودار حد شکل دهی در طراحی قطعه و تحلیل اجزاء محدود
۴-۱-۲	کاربرد نمودار حد شکل دهی در بهینه‌سازی طراحی قالب
۴-۱-۲-۱	برآورد منحنی حد شکل دهی
۴-۱-۳	شبکه‌بندی نمونه‌ها
۴-۱-۳-۱	انتخاب دایره‌ها
۴-۱-۳-۲	روش‌های اندازه‌گیری
۵-۱	مروری بر پژوهش‌های مرتبط با بررسی شکل‌پذیری لوله در فرایند هیدروفرمینگ
۶-۱	اهداف پایان‌نامه

فصل دوم: شرح آزمون‌های تجربی

۲۲

- ۱-۲-۱- مقدمه ۲۳
- ۲-۲- معرفی تجهیزات آزمایشگاهی ۲۳
- ۱-۲-۲- دستگاه پرس ۲۳
- ۲-۲-۲- مجموعه قالب ۲۴
- ۳-۲-۲- سیستم تامین فشار ۲۵
- ۴-۲-۲- سیال هیدرولیکی ۲۷
- ۵-۲-۲- وسایل اندازه‌گیری ۲۷
- ۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش ۲۸
- ۴-۲- نحوه عملکرد قالب ۲۸
- ۵-۲- تعیین خواص مکانیکی لوله ۳۰

فصل سوم: شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ لوله

۳۲

- ۱-۳- مقدمه ۳۳
- ۲-۳- معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی ۳۳
- ۳-۳- مراحل شبیه‌سازی ۳۵
- ۱-۳-۳- ایجاد مدل هندسی ۳۵
- ۲-۳-۳- تعیین خصوصیات لوله ۳۶
- ۳-۳-۳- مونتاژ لوله و اجزای قالب ۳۷
- ۴-۳-۳- تعیین تعداد مراحل و نوع حل مسئله ۳۸
- ۵-۳-۳- تعیین نوع تماس سطوح اجزا با هم ۳۹
- ۶-۳-۳- شرایط مرزی و بارگذاری ۳۹
- ۷-۳-۳- شبکه‌بندی ۴۱
- ۸-۳-۳- تحلیل فرایند ۴۲

فصل چهارم: نتایج و بحث

۴۳

- ۴۴-۱-۱-۴ - مقدمه ۴۴
- ۴۴-۲-۴ - صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی ۴۴
- ۴۵-۳-۴ - بررسی اثر نحوه بارگذاری و پارامترهای هندسی قالب بر مسیر کرنش ۴۵
- ۴۶-۱-۳-۴ - بارگذاری آزاد ۴۶
- ۴۶-۱-۱-۳-۴ - بررسی اثر شعاع گوشه قالب (R) ۴۶
- ۴۷-۲-۱-۳-۴ - بررسی اثر طول ناحیه تغییر شکل (W) ۴۷
- ۴۸-۲-۳-۴ - بارگذاری با تغذیه محوری ۴۸
- ۴۸-۱-۲-۳-۴ - بررسی اثر شعاع گوشه قالب (R) ۴۸
- ۵۱-۲-۲-۳-۴ - بررسی اثر طول ناحیه تغییر شکل (W) ۵۱
- ۵۳-۳-۲-۳-۴ - بررسی اثر مقدار تغذیه محوری لوله (L) ۵۳
- ۵۳-۴-۴ - ترسیم منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ ۵۳
- ۵۴-۵-۴ - پیش‌بینی پارگی لوله در فرایند هیدروفرمینگ بادامک با استفاده از منحنی حد شکل‌دهی بدست آمده از این پژوهش ۵۴
- ۵۷..... ۵۷

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶۰

- ۶۱-۲-۵ - نتیجه‌گیری ۶۱
- ۶۲-۳-۵ - پیشنهادها ۶۲

۶۳

فهرست مراجع

۶۷

پیوست

- ۶۸..... نقشه اجزای تشکیل‌دهنده قالب هیدروفرمینگ لوله ۶۸
- ۶۸-۱ - نقشه مونتاژی قالب ۶۸
- ۶۸-۲ - نقشه اجزای قالب ۶۸

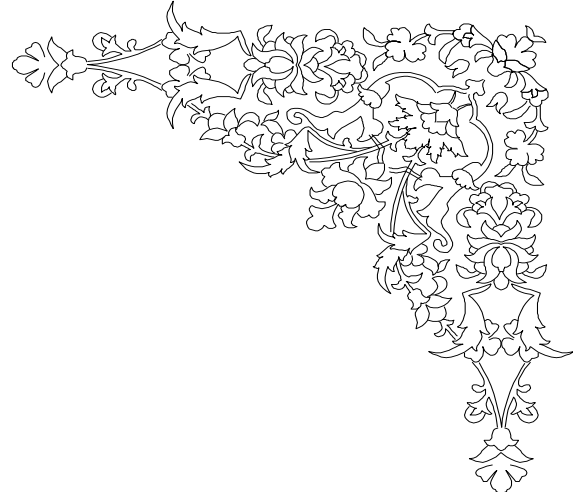
فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) شماتیک فرایند هیدروفرمینگ ورق، (الف) روش سنبه-سیال (ب) روش ماتریس-سیال [۶]..... ۵.
- شکل (۲-۱) شماتیک فرایند هیدروفرمینگ لوله (۱) قرارگیری قطعه اولیه در قالب (۲) بسته شدن قالب (۳) پر شدن داخل لوله با سیال (۴) آب‌بندی دو طرف لوله توسط سنبه‌ها (۵) شکل‌دهی قطعه‌کار با اعمال همزمان فشار و نیروی محوری (۶) باز شدن قالب و خروج قطعه‌کار نهایی [۷]..... ۶.
- شکل (۳-۱) شکل‌های هندسی قابل تولید با فرایند هیدروفرمینگ لوله (الف) بشکه‌ای شکل (ب) برجستگی Y شکل (یا T شکل) (ج) انبساط موضعی [۱۰]..... ۷.
- شکل (۴-۱) نمونه‌هایی از قطعات تولید شده با استفاده از فرایند هیدروفرمینگ لوله (الف) قطعات آگزوز (ب) ریل آلومینیومی پایینی ماشین ولوو (ج) قاب نگهدارنده موتور [۵]..... ۸.
- شکل (۵-۱) نواحی تقسیم‌بندی شده منحنی حد شکل‌دهی بر اساس عیوب [۱۲]..... ۹.
- شکل (۶-۱) مناطق مختلف نمودار حد شکل‌دهی [۱۵]..... ۱۲.
- شکل (۷-۱) مناطق مختلف نمودار حد شکل‌دهی [۱۵]..... ۱۳.
- شکل (۸-۱) نوار مایلر برای اندازه‌گیری کرنش‌های حدی [۱۶]..... ۱۷.
- شکل (۹-۱) سیستم تحلیل‌گر شبکه دایره‌ای به کمک روش پردازش دیجیتال [۱۶]..... ۱۷.
- شکل (۱-۲) دستگاه آزمایش اونیورسال (DMG)..... ۲۴.
- شکل (۲-۲) شماتیک قالب استفاده شده در این پژوهش..... ۲۴.
- شکل (۳-۲) اجزای مختلف قالب هیدروفرمینگ لوله استفاده شده در این پژوهش..... ۲۵.
- شکل (۴-۲) واحد هیدرولیکی تامین فشار اولیه..... ۲۶.
- شکل (۵-۲) مدار هیدرولیکی استفاده شده در انجام آزمایش‌ها..... ۲۶.
- شکل (۶-۲) تجهیزات سیستم هیدرولیکی کنترل فشار..... ۲۷.
- شکل (۷-۲) تجهیزات اندازه‌گیری (الف) ضخامت‌سنج مکانیکی (ب) کولیس دیجیتالی..... ۲۸.
- شکل (۸-۲) لوله شبکه‌بندی شده مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی..... ۲۸.
- شکل (۹-۲) مشخصات ابعادی نمونه آزمون کشش لوله مطابق استاندارد ASTM-A۳۷۰، ابعاد به میلی‌متر..... ۳۰.
- شکل (۱۰-۲) منحنی تنش-کرنش حقیقی بدست آمده از تست کشش لوله فولادی..... ۳۱.
- شکل (۱-۳) هندسه اجزای قالب و لوله در نرم‌افزار شبیه‌سازی، سمت راست: قطعه بادامک، سمت چپ: انبساط‌دهی آزاد..... ۳۶.
- شکل (۲-۳) منحنی حد شکل‌دهی ورق فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ [۲۹]..... ۳۷.
- شکل (۳-۳) مونتاژ اجزای قالب و لوله در شبیه‌سازی، سمت راست: قطعه بادامک، سمت چپ: انبساط‌دهی آزاد..... ۳۸.
- شکل (۴-۳) منحنی جابجایی-زمان سنبه در حالت بارگذاری با تغذیه محوری لوله ($R=10\text{ mm}$, $W=40\text{ mm}$, $L=40\text{ mm}$)..... ۴۰.
- شکل (۵-۳) شرایط مرزی اعمال شده به ورق و قالب در شبیه‌سازی، سمت راست: قطعه بادامک، سمت چپ: انبساط‌دهی آزاد..... ۴۰.
- شکل (۶-۳) منحنی فشار-زمان در حالت بارگذاری با تغذیه محوری لوله ($R=10\text{ mm}$, $W=40\text{ mm}$, $L=40\text{ mm}$)..... ۴۱.
- شکل (۱-۴) مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی، در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، ($R=10\text{ mm}$, $W=40\text{ mm}$, $L=40\text{ mm}$)..... ۴۵.

- شکل (۲-۴) مسیره‌های کرنش مربوط به شعاع‌های گوشه مختلف قالب در حالت بارگذاری آزاد ($W=40\text{ mm}$)، بدست آمده از شبیه‌سازی ۴۷
- شکل (۳-۴) مسیره‌های کرنش مربوط به طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل در حالت بارگذاری آزاد ($R=10\text{ mm}$)، بدست آمده از شبیه‌سازی ۴۸
- شکل (۴-۴) مسیره‌های کرنش مربوط به شعاع‌های گوشه مختلف قالب در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، ($L=40\text{ mm}$)، بدست آمده از شبیه‌سازی ۴۹
- شکل (۵-۴) توزیع مولفه‌های کرنش پلاستیک در حالت بارگذاری با تغذیه محوری برای شعاع‌های گوشه مختلف قالب، ($W=40\text{ mm}$ ، $L=40\text{ mm}$)، (الف) $R=5\text{ mm}$ ، (ب) $R=10\text{ mm}$ ، (ج) $R=15\text{ mm}$ ۵۰
- شکل (۶-۴) مسیره‌های کرنش مربوط به طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل در حالت بارگذاری با تغذیه محوری لوله، ($R=10\text{ mm}$ ، $L=40\text{ mm}$)، بدست آمده از شبیه‌سازی ۵۱
- شکل (۷-۴) توزیع مولفه‌های کرنش پلاستیک در حالت بارگذاری با تغذیه محوری برای طول‌های مختلف ناحیه تغییرشکل، ($R=10\text{ mm}$ ، $L=40\text{ mm}$)، (الف) $W=20\text{ mm}$ ، (ب) $W=40\text{ mm}$ ، (ج) $W=60\text{ mm}$ ۵۲
- شکل (۸-۴) مسیره‌های کرنش مربوط به مقادیر مختلف تغذیه لوله، بدست آمده از شبیه‌سازی ($R=10\text{ mm}$ ، $W=40\text{ mm}$) ۵۳
- شکل (۹-۴) مسیره‌های کرنش آزمایش‌های طراحی شده بر روی منحنی FLD ورق فولادی زنگ‌زن ۳۰۴، بدست آمده از شبیه‌سازی ۵۵
- شکل (۱۰-۴) تعدادی از لوله‌های شکل داده شده در آزمایشگاه ۵۵
- شکل (۱۱-۴) منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌زن ۳۰۴، حاصل از آزمایش‌های تجربی (اعداد روی نمودار بیان‌کننده نسبت کرنش β می‌باشد) ۵۶
- شکل (۱۲-۴) منحنی‌های حد شکل‌دهی لوله و ورق فولادی زنگ‌زن ۳۰۴ ۵۶
- شکل (۱۳-۴) (الف) قطعه صنعتی مورد بررسی، (ب) ابعاد مقطع بادامک (بر حسب میلی‌متر) ۵۸
- شکل (۱۴-۴) مسیر کرنش نقطه A از قطعه، (الف) بارگذاری آزاد، (ب) بارگذاری با تغذیه محوری لوله به اندازه ۳۰ mm، (ج) بارگذاری با تغذیه محوری لوله به اندازه ۴۰ mm، حاصل از شبیه‌سازی ۵۸
- شکل (۱۵-۴) لوله‌های بادامک شکل داده شده در آزمایشگاه، (الف) بارگذاری آزاد، (ب) تولید قطعه سالم با تغذیه محوری ۴۰ mm ۵۹
- شکل (۱۶-۴) منحنی توزیع کرنش و ضخامت لوله بادامک در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، ($W=40\text{ mm}$ ، $L=40\text{ mm}$)، (الف) در جهت محیطی، (ب) در جهت طولی ۵۹

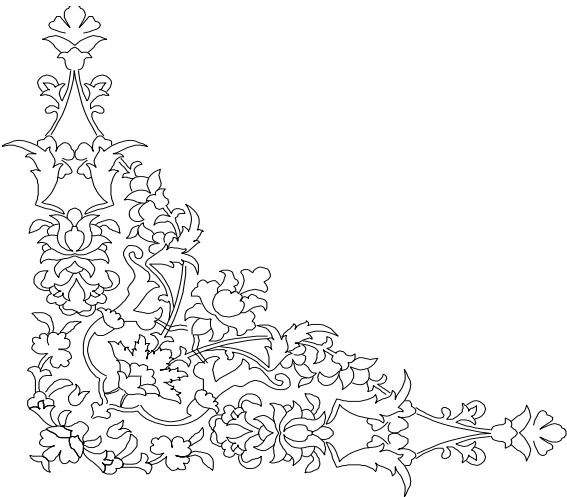
فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۲) شرایط آزمایش‌های تجربی انجام شده ۲۹
- جدول (۲-۲) خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله فولادی مورد استفاده در آزمایش‌ها ۳۱
- جدول (۳-۲) ترکیب شیمیایی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ ۳۱
- جدول (۱-۴) مشخصات حالت‌های انتخاب شده جهت انجام آزمایش‌های تجربی و نسبت کرنش گلویی پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی (β^*) و بدست آمده از آزمایش تجربی (β) ۵۴



فصل اول

کلیات



۱-۱- مقدمه

با پیشرفت روزافزون فن‌آوری و رقابت بازار تجارت، اکثر صنایع مانند صنایع نظامی، فضایی، خودروسازی، پتروشیمی و تاسیساتی به سمت کاهش هزینه و زمان تولید، عرضه محصولات سبک‌تر و با کیفیت بالاتر و همچنین سیستم تولید انعطاف‌پذیر روی آورده‌اند. به همین دلیل استفاده از مواد جدید و توسعه فرایندهای پیشرفته تولید، امری لازم و ضروری است. از این رو، محققان و صنعتگران به سمت فرایندهای تولید پیشرفته با انعطاف‌پذیری بالا روی آورده‌اند. یکی از این فرایندها که امروزه توجه تولیدکنندگان را به خود جلب کرده است، هیدروفرمینگ^۱ می‌باشد. هیدروفرمینگ فرایندی است که به دلیل نیاز به تکنولوژی نسبتاً بالا، کاربرد آن تا مدت‌ها محدود به موارد خاص بوده است. با پیشرفت تکنولوژی، ماشین‌آلات تولیدی، سیستم‌های آب‌بندی و فرایندهای کنترل کامپیوتری در دههٔ اخیر، شکل‌دهی با فشار سیال، به عنوان یک روش قابل استفاده در صنعت معرفی شده است [۱].

در این فصل، ابتدا فرایندهای شکل‌دهی فلزات معرفی و دسته‌بندی شده و به جایگاه هیدروفرمینگ در بین آنها اشاره می‌شود. پس از معرفی فرایند هیدروفرمینگ و انواع آن، توضیح مختصری پیرامون منحنی‌های حد شکل‌دهی، کاربردهای آن و روش بدست آوردن آن ارائه خواهد شد. سپس مروری بر پژوهش‌های انجام شده توسط محققان دیگر، در ارتباط با این پایان‌نامه ارائه می‌گردد. در نهایت اهداف و ویژگی‌های پایان‌نامه حاضر شرح داده می‌شود.

۱-۲- معرفی فرایندهای شکل‌دهی فلزات

به طور کلی فرایندهای شکل‌دهی فلزات را می‌توان به دو گروه عمده دسته‌بندی کرد [۱]:

الف - شکل‌دهی حجمی^۲

^۱ Hydroforming

^۲ Bulk forming

ب- شکل‌دهی ورق^۳

شکل‌دهی حجمی دارای دو مشخصه متمایز زیر است [۱]:

۱- شکل یا سطح مقطع قطعه‌کار، تغییر شکل مومسان دائمی و زیاد پیدا می‌کند.

۲- مقدار تغییر شکل مومسان^۴ در این فرایند نسبت به تغییر شکل کشسان^۵ معمولاً به قدری زیاد است که از برگشت فنری^۶ قطعه بعد از تغییر شکل صرف‌نظر می‌شود.

فرایندهای حدیده‌کاری^۷، آهنگری^۸، نوردکاری^۹ و کشش^{۱۰} مثال‌هایی از فرایندهای شکل‌دهی حجمی فلزات می‌باشند.

مشخصه‌های فرایندهای شکل‌دهی ورق چنین است [۱]:

۱- شکل اولیه قطعه‌کار به صورت ورق است.

۲- این فرایند شکل‌دهی معمولاً تغییر قابل توجهی در هندسه قطعه به وجود می‌آورد، اما مساحت سطح مقطع جسم، چندان تغییر نمی‌کند.

۳- گاهی تغییر شکل‌های مومسان و کشسان از یک مرتبه‌اند. بنابراین نمی‌توان از برگشت فنری چشم‌پوشی کرد.

فرایندهای کشش عمیق^{۱۱}، خمکاری^{۱۲} و شکل‌دهی چرخشی^{۱۳} نمونه‌هایی از فرایندهای شکل‌دهی ورق هستند.

^۳ Sheet forming

^۴ Plastic deformation

^۵ Elastic deformation

^۶ Spring back

^۷ Extrusion

^۸ Forging

^۹ Rolling

^{۱۰} Drawing

^{۱۱} Deep drawing

^{۱۲} Bending

^{۱۳} Spinning

۱-۳- معرفی فرایند هیدروفرمینگ

هیدروفرمینگ یکی از فرایندهای شکل‌دهی فلزات است که در آن از یک سیال تحت فشار به منظور ایجاد تغییر شکل پلاستیک در قطعه اولیه که به شکل ورق یا لوله است، استفاده می‌شود. در هر یک از فرایندهای هیدروفرمینگ، همواره به یک پرس، قالب و یک سیستم تقویت‌کننده فشار نیاز است [۲، ۳]. به طور کلی، در فرایند هیدروفرمینگ، به علت توزیع فشار یکنواخت سیال بر سطح قطعه، محصولی با خواص مکانیکی مطلوب به دست می‌آید. از دیگر مزایای هیدروفرمینگ می‌توان به قابلیت تولید قطعات پیچیده، دقت ابعادی بهتر و بهبود شکل‌دهی موادی که قابلیت شکل‌دهی کمی دارند، اشاره کرد. از طرف دیگر، این فرایند دارای معایبی است که از آن جمله می‌توان به چرخه آرام تولید و تجهیزات گران قیمت اشاره کرد [۲]. هیدروفرمینگ علاوه بر کاربردهای متعددی که در صنایع هوافضا دارد، از دهه ۱۹۹۰ به طور گسترده در صنایع خودروسازی مورد استفاده قرار گرفته است. از کاربردهای عمده این فرایند در صنعت خودروسازی می‌توان به ساخت قطعات سیستم اگزوز خودرو، قطعات شاسی، اجزای موتور و قطعات بدنه خودرو اشاره کرد.

۱-۳-۱- تاریخچه فرایند هیدروفرمینگ

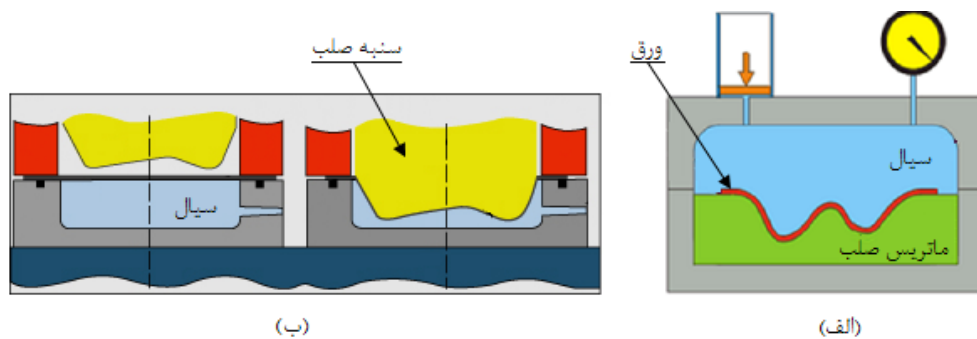
تاریخچه استفاده از سیال به منظور شکل‌دهی فلزات به بیش از ۱۰۰ سال قبل باز می‌گردد. کاربردهای اولیه این فرایند در ساخت دیگ‌های بخار و ادوات موسیقی بوده است. با این وجود مبانی هیدروفرمینگ در دهه ۱۹۴۰ بنیان‌گذاری شده است. اولین کاربرد ثبت شده فرایند هیدروفرمینگ توسط میلتن گاروین از شرکت شایبل آمریکا در دهه ۱۹۵۰ میلادی بوده است که در ساخت ظروف آشپزخانه از این فرایند بهره جسته است. ساخت اتصالات T- شکل مسی در صنعت لوله‌کشی تا دهه ۱۹۹۰ میلادی رایج‌ترین کاربرد این فرایند بوده است. از دهه ۱۹۹۰، با توجه به پیشرفت‌های صنعتی در کنترل کامپیوتری، سیستم‌های هیدرولیکی و راهبردهای نوین فرایندهای طراحی و ساخت، این فرایند کاربرد ویژه‌ای در صنعت پیدا کرده و جایگزین بسیاری از فرایندهای آهنگری و مهرزنی به ویژه در قطعات وسایل نقلیه شده است [۴].

۱-۳-۲- انواع فرایندهای هیدروفرمینگ

فرایند هیدروفرمینگ را در حالت کلی می‌توان به دو دسته عمده هیدروفرمینگ ورق^{۱۴} و هیدروفرمینگ لوله^{۱۵} تقسیم کرد. در برخی منابع، از دسته سومی تحت عنوان هیدروفرمینگ پوسته^{۱۶} نیز یاد شده است [۵]. در ادامه به معرفی هر یک از این فرایندها پرداخته می‌شود.

۱-۳-۲-۱- هیدروفرمینگ ورق

در روش هیدروفرمینگ ورق، ماده خام یک ورق است که در درون قالب قرار داده می‌شود و به کمک فشار داخلی، شکل مورد نظر را به خود می‌گیرد. به کمک این فرایند می‌توان قطعات پیچیده را با کیفیت بالاتر و با هزینه کمتر نسبت به روش‌های سنتی در یک مرحله شکل داد. شماتیک این فرایند در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل (۱-۱) شماتیک فرایند هیدروفرمینگ ورق، (الف) روش سنبه- سیال (ب) روش ماتریس- سیال [۶]

۱-۳-۲-۲- هیدروفرمینگ لوله

فرایند هیدروفرمینگ لوله نخستین بار در سال ۱۹۴۰ میلادی توسط گری^{۱۷} و همکاران به منظور شکل-دهی لوله T شکلی از جنس مس ابداع شد. در ابتدا کاربرد آن محدود به بدنه دوچرخه بود، اما امروزه به گونه‌ای در بین صنعتگران گسترش یافته است که مطابق آمار، ۵۰٪ شاسی خودرو تولید شده در سال ۲۰۰۴

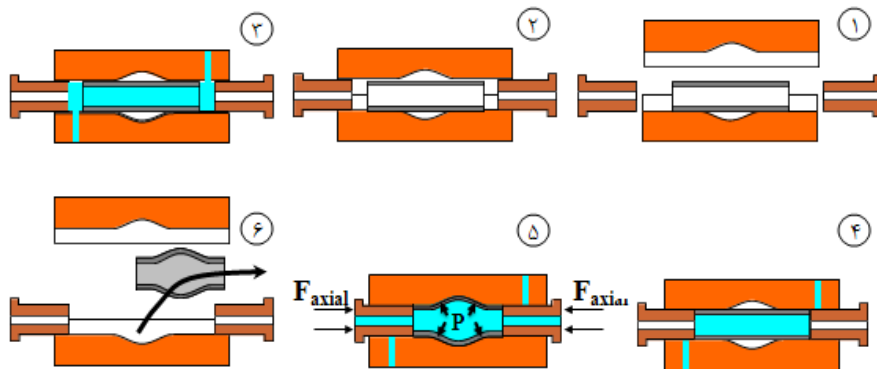
^{۱۴} Sheet Hydroforming

^{۱۵} Tube Hydroforming

^{۱۶} Shell Hydroforming

^{۱۷} Grey

میلادی در آمریکای شمالی با فرایند هیدروفورمینگ لوله بوده است [۵]. شماتیک این فرایند در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، در این فرایند ابتدا قطعه اولیه که معمولاً یک لوله استوانه‌ای است، داخل قالب قرار می‌گیرد. بعد از بسته شدن قالب، دو سنبه در دو انتهای لوله به گونه‌ای قرار می‌گیرند که قالب به طور کامل آب‌بندی نشود. در مرحله بعد درون لوله با سیال پر شده و در همین حین هوای داخل قالب از طریق سوراخ سنبه‌ها خارج می‌شود. پس از آن دو انتهای لوله توسط سنبه‌ها به طور کامل آب‌بندی می‌شود. در مرحله پنجم، با اعمال همزمان فشار داخلی سیال و پیشروی محوری سنبه‌ها، قطعه اولیه شکل قالب را به خود می‌گیرد. در این مرحله وقتی قطعه کار شکل گرفت، فشار داخلی افزایش یافته و مرحله کالیبراسیون انجام می‌شود. این افزایش فشار به منظور پر کردن شعاع‌های کوچک می‌باشد. در پایان، با تخلیه کردن سیال داخل لوله، قطعه کار نهایی از قالب خارج می‌شود.



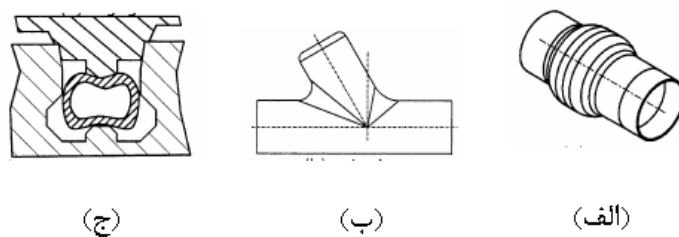
شکل (۱-۲) شماتیک فرایند هیدروفورمینگ لوله (۱) قرارگیری قطعه اولیه در قالب (۲) بسته شدن قالب (۳) پر شدن داخل لوله با سیال (۴) آب‌بندی دو طرف لوله توسط سنبه‌ها (۵) شکل‌دهی قطعه کار با اعمال همزمان فشار و نیروی محوری (۶) باز شدن قالب و خروج قطعه کار نهایی [۷]

موادی که در این فرایند مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای دامنه وسیعی می‌باشند که از آن نمونه می‌توان به انواع فولادها، آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای منیزیم، کامپوزیت‌ها و بطور کلی همه موادی که در شکل‌دهی سرد مورد استفاده قرار می‌گیرند اشاره کرد [۵]. از جمله مزایای هیدروفورمینگ لوله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۵، ۸ و ۹]:

- ۱- کاهش وزن قطعه
- ۲- بهبود خواص مکانیکی و یکنواختی آن در کل قطعه، به علت تغییر یکنواخت ضخامت در سراسر قطعه
- ۳- افزایش دقت ابعادی
- ۴- کاهش تعداد مراحل تولید، به علت نیاز به عملیات ثانویه کمتر
- ۵- قابلیت تولید قطعات توخالی با هندسه پیچیده
- ۶- قیمت کم ابزار نسبت به روش‌های سنتی

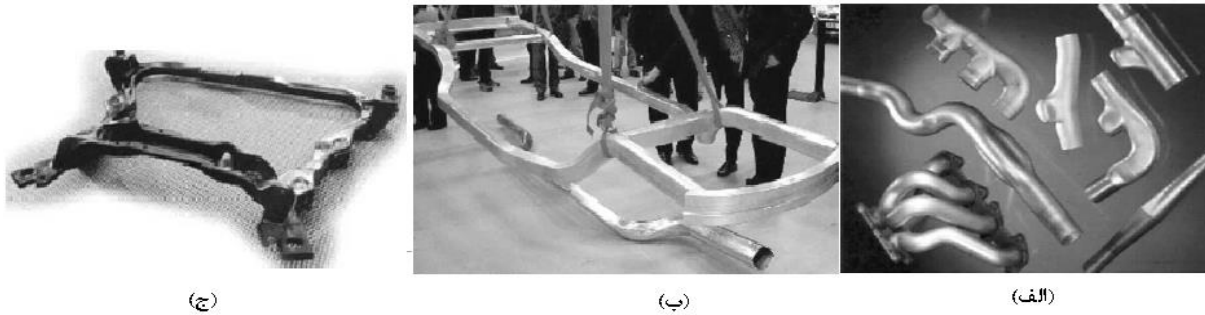
از جمله محدودیت‌های فرایند هیدروفرمینگ لوله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۹]:

- ۱- زمان سیکل تولید بالا
 - ۲- هزینه تجهیزات پرس بالا
 - ۳- اطلاعات کم در زمینه تکنولوژی فرایند
- بطور کلی، شکل هندسی محصولاتی که با فرایند هیدروفرمینگ لوله قابل تولیدند شامل سه گروه کلی برجستگی بشکله‌ای شکل، برجستگی Y شکل (یا T شکل) و انبساط موضعی می‌باشد. تصویر این قطعات در شکل (۳-۱) نشان داده شده است [۱۰].



شکل (۳-۱) شکل‌های هندسی قابل تولید با فرایند هیدروفرمینگ لوله (الف) بشکله‌ای شکل (ب) برجستگی Y شکل (با T شکل) (ج) انبساط موضعی [۱۰]

امروزه فرایند هیدروفرمینگ لوله در صنایع مختلفی مانند خودروسازی، هوافضا، هواپیمایی، نظامی و تاسیسات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل (۴-۱) تعدادی از محصولات تولید شده با این روش نشان داده شده است.



شکل (۴-۱) نمونه‌هایی از قطعات تولید شده با استفاده از فرایند هیدروفرمینگ لوله (الف) قطعات اگزوز (ب) ریل آلومینیومی پایینی ماشین ولوو (ج) قاب نگهدارنده موتور [۵]

فرایند هیدروفرمینگ لوله را می‌توان از نظر سیستم اعمال فشار در سه دسته طبقه‌بندی کرد [۱۱]:

۱- هیدروفرمینگ فشار پایین ($P < ۸۳ \text{ MPa}$)

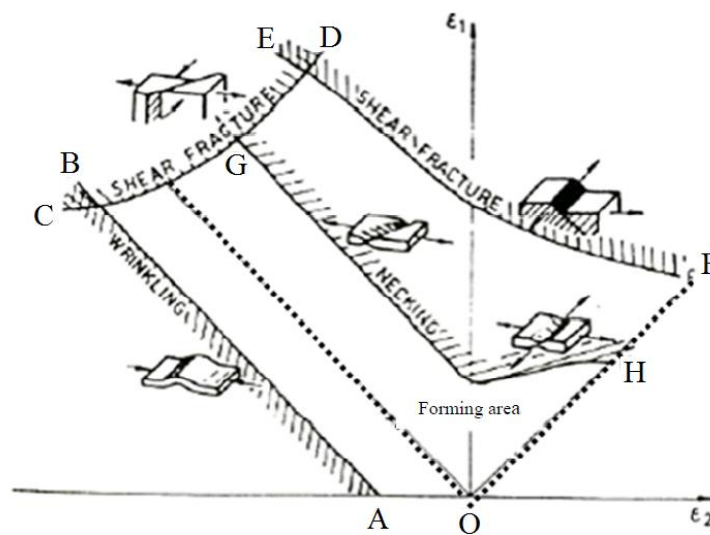
۲- هیدروفرمینگ فشار متوسط ($۸۳ \text{ MPa} \leq P \leq ۴۱۴ \text{ MPa}$)

۳- هیدروفرمینگ فشار بالا ($P > ۴۱۴ \text{ MPa}$)

تاکنون بیشتر تحقیقات به‌منظور بهبود شکل‌پذیری و کیفیت قطعات، بر روی هیدروفرمینگ فشار بالا متمرکز بوده است. با توجه به اینکه کاربرد فن‌آوری هیدروفرمینگ لوله در تولید انبوه، در مقایسه با دیگر فرایندهای شکل‌دهی فلزات نظیر مهرزنی و آهن‌گری نسبتاً نوین است، پایه علمی، قوانین طراحی و اطلاعات آزمایشگاهی پیرامون آن نیز محدود است. این امر سبب افزایش هزینه تولید شده که نتیجه آن کاهش توان رقابتی فرایند هیدروفرمینگ لوله در برابر سایر فرایندهای تولید است. بنابراین کاربرد این فن‌آوری برای ساخت قطعات جدید، مستلزم پیشرفت گسترده‌ی این فرایند و انجام کوشش‌های فراوان است. علیرغم مزایای زیاد فرایند هیدروفرمینگ، همچنان موضوعاتی برای تحقیق و بررسی پیرامون این فرایند، به‌منظور بهبود آن، وجود دارد.

۱-۴- نمودار حد شکل دهی^{۱۸}

شکل پذیری یک ورق یا لوله فلزی، توانایی آن به تغییر شکل پلاستیک، بدون بروز هرگونه عیبی می‌باشد. گلویی شدن، پارگی و چروکیدگی را می‌توان به عنوان معیارهایی به منظور توصیف شکل‌پذیری ماده بیان کرد. بر همین اساس، مارسینیاک به منظور بیان شکل‌پذیری ماده، دیاگرام حد شکل‌دهی بر اساس کرنش-های اصلی بزرگتر و کوچکتر را با نواحی مشخصی از کرنش‌ها بر پایه نوع عیوب تقسیم‌بندی کرده است که در شکل (۵-۱) قابل مشاهده می‌باشد [۱۲]. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود نمودار به نواحی عاری از گلویی (ناحیه‌ی داخل نمودار ACGHO)، عاری از پارگی (ناحیه‌ی داخل نمودار ACDFO) و عاری از چروکیدگی (ناحیه‌ی بالای نمودار AB) تقسیم‌بندی شده است.



شکل (۵-۱) نواحی تقسیم‌بندی شده منحنی حد شکل‌دهی بر اساس عیوب [۱۲]

منحنی‌های حد شکل‌دهی در حقیقت محدوده کرنش‌هایی است که یک ورق یا لوله می‌تواند تحمل کند و نشان‌دهنده ارتباط بین کرنش‌های اصلی بزرگتر ϵ_1 و کوچکتر ϵ_2 می‌باشد. نمودارهای حد شکل‌دهی در تشخیص مسائل بالفعل و بالقوه شکل‌دهی بسیار سودمند واقع شده‌اند. ورق‌ها و لوله‌هایی را که با شبکه‌های دایره‌ای نشانه‌گذاری شده‌اند، می‌توان با استفاده از قالب‌های آزمایشی، یا قالب‌های اصلی که در تولید به کار

^{۱۸} Forming Limit Diagram (FLD)

می‌روند، شکل داد. کرنش‌های موضعی نزدیک به نقطه پارگی، یا نقاط مشکوک را می‌توان سنجید و با نمودار حد شکل‌دهی مقایسه کرد. بدین ترتیب دستیابی به دو هدف ممکن می‌شود: نخست آنکه می‌توان نقاط دردرساز را شناسایی کرده و شدت مسئله را، حتی در هنگامی که پارگی رخ نمی‌دهد سنجید. اگر کرنش‌های اندازه‌گیری شده نزدیک به منحنی پارگی باشند، احتمالاً پارگی بعضی از محصولات از سایش قالب، تغییرات روز به روز دما، نحوه روانکاری، تنظیم قالب‌ها، ضخامت و خواص قطعه ناشی می‌شود. هدف دوم مقایسه کرنش‌های اندازه‌گیری شده با نمودار حد شکل‌دهی، شناسایی ماهیت مسئله است. در نمودار حد شکل‌دهی، کمترین مقدار نمودار در راستای عمودی در حالت کرنش صفحه‌ای دیده می‌شود، بنابراین اگر تغییر شکل در ناحیه بحرانی نزدیک به حالت کرنش صفحه‌ای باشد، تغییرات روانکاری یا قالب‌ها، که سبب کشیده شدن بیشتر می‌شود، سودمند خواهد بود [۱۳]. در هنگام بررسی شکل‌پذیری ورق یا لوله، اگر ترکیب کرنش‌های تمام نقاط در زیر منحنی حد شکل‌دهی واقع شود قطعه بدون پارگی شکل خواهد گرفت ولی اگر ترکیب کرنش‌ها در نقاط بحرانی قطعه، بالای این منحنی قرار گیرد، محصول قطعاً پاره خواهد شد و در حقیقت برای موفقیت‌آمیز بودن عملیات، باید ترکیب کرنش‌های تمام نقاط، زیر منحنی حد شکل‌دهی واقع شود و قرار گرفتن ترکیب کرنش‌های حتی یک نقطه از قطعه در بالای منحنی، به معنای پارگی آن قطعه از همان نقطه خواهد بود [۱۴].

۱-۴-۱- کاربردهای نمودار حد شکل‌دهی

۱-۴-۱-۱- کاربرد نمودار حد شکل‌دهی در طراحی قطعه و تحلیل اجزاء محدود

معیارهای زیادی در طراحی قطعه‌ی فلزی تأثیرگذار هستند که یکی از آنها، حداکثر میزان شکل‌دهی است که فراتر از آن در فلز پارگی و یا چروکیدگی رخ می‌دهد. اگر قبل از ساخت قالب و تولید قطعه، این مسئله برای طراح قالب روشن باشد، باعث کمتر شدن هزینه و ضایعات می‌گردد. برای نیل به این مقصود، ابتدا از یک ابزار المان محدود که کار تجزیه و تحلیل قطعات را به عهده دارد استفاده می‌گردد. از نتیجه این تجزیه و تحلیل‌ها، می‌توان کرنش‌های اصلی را در نمونه‌ها بدست آورد. نتیجه بدست آمده برای هر المان خاص موجود در قطعه را می‌توان توسط نمودار حد شکل‌دهی تجزیه و تحلیل نمود و حالت آن المان خاص

را بعد از عملیات شکل‌دهی بدست آورد. به طور مثال اگر المان دارای کرنش‌هایی باشد که در نمودار حد شکل‌دهی در ناحیه پارگی نشان داده شده است، آن قسمت از قطعه در حین تولید دارای نقص می‌گردد. لذا یا می‌توان با تغییر در معیارهای مؤثر بر شکل‌دهی، تغییراتی در شکل و سطح نمودار حد شکل‌دهی ایجاد کرد، یا اینکه روش شکل‌دهی را تغییر داده و قطعه را در چند مرحله مورد عملیات قرار داد تا شکل نهایی را به خود بگیرد. نمودار حد شکل‌دهی، در پیش‌بینی ایجاد نقص در قطعه کار قبل از تولید کاربرد فراوانی دارد و نه تنها باعث کاهش هزینه تولید می‌گردد، بلکه سبب بالا رفتن کیفیت ساخت قطعه و قالب مربوطه نیز می‌گردد [۱۳]. بنابراین یکی از روش‌های واقع‌بینانه و مؤثر به منظور بررسی امکان‌پذیر بودن تولید یک قطعه و طراحی موفق در فرایندهای شکل‌دهی، استفاده از نمودارهای حد شکل‌دهی (FLD) می‌باشد. این ابزار ما را قادر به پیش‌بینی رفتار ماده در حین فرایند شکل‌دهی می‌سازد. به عنوان مثال می‌توان:

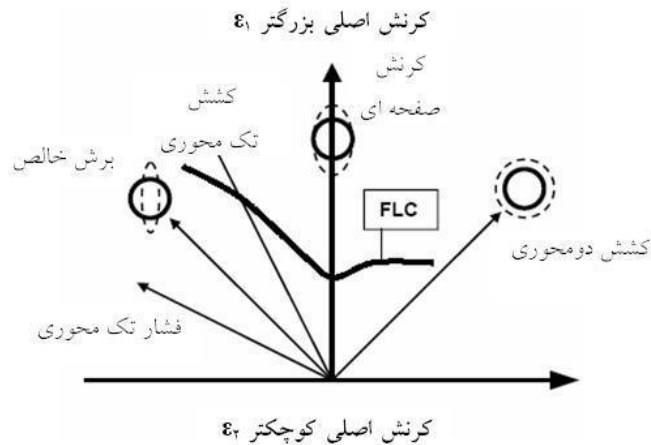
۱- مقادیر کرنش‌های ممکن و مناسب برای یک فرایند،

۲- نواحی بحرانی و حساس در قطعه که مستعد گلوپی و پارگی هستند؛

۳- مقادیر کرنش ممکن در مسیرهای مختلف بارگذاری،

۴- شرایط مناسب برای فرایند، همانند روانکاری،

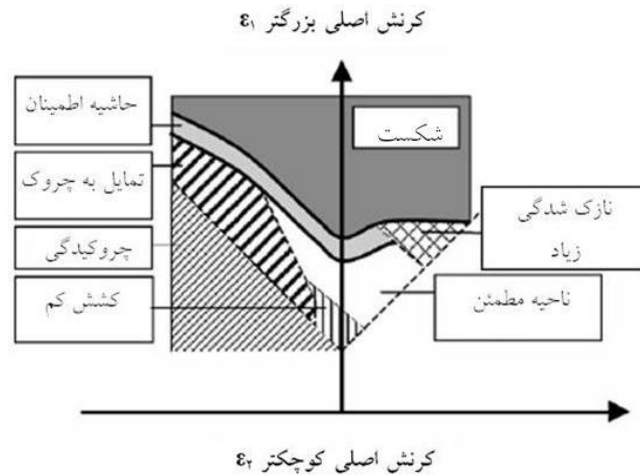
را پیش‌بینی نمود [۱۲]. در عمل این روش به این صورت به کار برده می‌شود: در حین طراحی قالب، طراح با توجه به محدوده کرنش موردنظر و شکل قطعه (که در واقع بر مسیر بارگذاری مؤثر خواهد بود)، جنس مناسب را مشخص می‌نماید. مسیرهای مختلف بارگذاری و تغییر شکل حاصل از این مسیرها در شکل (۱-۶) نشان داده شده است.



شکل (۶-۱) مناطق مختلف نمودار حد شکل دهی [۱۵]

۱-۴-۲- کاربرد نمودار حد شکل دهی در بهینه سازی طراحی قالب

طراح باید موارد غیر از پارگی را نیز در نظر بگیرد که شامل نازک شدگی بیش از حد، تمایل به چروکیدگی، چروکیدگی و کشش غیر کافی است که با مطالعه سطوح کرنش بدست می آید. در این حالت با پیش بینی کرنش های لازم در مورد قطعات طراحی شده و درک وضعیت کرنش در آن حالت خاص، می توان از نمودار حد شکل دهی استفاده کرد. به طور نمونه، فضای یک نمودار حد شکل دهی در شکل (۷-۱) نشان داده شده است و خاصیت هر منطقه نیز ذکر شده است. با در دست داشتن نمودار حد شکل دهی و با علم به اینکه هر قسمت از نمودار مذکور دارای خواص ویژه ای است، برای رسیدن به یک حالت خاص می توان کرنش های مربوط به آن حالت را که در شکل مشخص است، در قطعه پدید آورد [۱۵].



شکل (۷-۱) مناطق مختلف نمودار حد شکل‌دهی [۱۵]

۱-۴-۲- برآورد منحنی حد شکل‌دهی

نمودارهای حد شکل‌دهی، محدوده کرنشی را که ورق‌ها و لوله‌های فلزی می‌توانند تحمل کنند به صورت نسبت کرنش بزرگ‌تر به کرنش کوچک‌تر نشان می‌دهند. برای رسم یک منحنی حد شکل‌دهی نیاز به نقاط مختلفی می‌باشد که هر کدام از آن‌ها از یک مسیر بارگذاری خاص بدست می‌آیند. در یک منحنی حد شکل‌دهی سه ناحیه وجود دارد که عبارتند از:

۱- سمت چپ منحنی که در آن کرنش اصلی بزرگ‌تر مثبت و کرنش اصلی کوچک‌تر منفی می‌باشد.
 ۲- مرکز منحنی که در آن کرنش اصلی بزرگ‌تر مثبت و کرنش اصلی کوچک‌تر تقریباً صفر می‌باشد که به این حالت کرنش صفحه‌ای گفته می‌شود و معمولاً در نمودارهای حد شکل‌دهی آن را با FLD_0 نشان می‌دهند.

۳- سمت راست نمودار که در آن کرنش اصلی بزرگ‌تر و کرنش اصلی کوچک‌تر هر دو مثبت می‌باشد. بنابراین برای رسم یک نمودار حد شکل‌دهی باید شرایط مختلف بارگذاری که با استفاده از آن نقاط مختلفی از منحنی بدست می‌آید، ایجاد شود. روش‌های مختلفی برای ایجاد مسیرهای بارگذاری مختلف وجود دارد. مثلاً مسیرهای کرنش لازم را می‌توان با کمک روانکارهای متفاوت که شرایط اصطکاکی را تغییر می‌دهد و یا با استفاده از نمونه‌هایی با هندسه متفاوت ایجاد کرد. نکته‌ی دیگری که باید به آن توجه شود این است که باید به تعداد کافی آزمایش انجام بگیرد تا نمودار حد شکل‌دهی دقیقی رسم شود. مدل‌های تئوری مختلفی

برای محاسبه منحنی حد شکل‌دهی موجود است. برخی از مهم‌ترین مدل‌های تئوری ارائه شده در زیر آورده شده است:

- مدل باریک‌شوندگی (گلوبی) پخشی سوئیفت در سال ۱۹۵۲

- مدل باریک‌شوندگی موضعی هیل در سال ۱۹۵۲

- مدل نقص در قطعه اولیه مارسینیاک و کوزینسکی در سال ۱۹۶۷

- تئوری گوشه استورن و رایس در سال ۱۹۷۵

- تحلیل آشفته‌گی دوزینسکی و مولیناری در سال ۱۹۸۱

در تعیین نمودار حد شکل‌دهی، عمدتاً از روش کشش خارج از صفحه استفاده می‌شود که شامل کشیدن ورق یا لوله روی سنبه و یا کشیدن ورق و انبساط لوله به کمک فشار سیال هیدرولیک است. در این حالت یک تغییر شکل خارج از صفحه ایجاد می‌شود و اثر اصطکاک نیز تاثیرگذار است. بعد از انجام تست و ایجاد تغییر شکل، کرنش‌ها در محل گلوبی و اطراف آن اندازه‌گیری می‌شوند. منحنی حد کرنش در بالای کرنش‌های خارج از منطقه گلوبی و زیر کرنش‌های مربوط به منطقه گلوبی و پارگی، رسم می‌شود. در سمت چپ منحنی، کرنش‌های اصلی بزرگ، مثبت و کرنش‌های اصلی کوچک، منفی هستند. بنابراین مسیرهای کرنش زیادی را از حالت کشش تک محوری تا کرنش صفحه‌ای ایجاد می‌کند و سمت راست نیز مسیر کرنش‌های مختلف، از حالت کرنش صفحه‌ای تا کشش دو محوری را پوشش می‌دهد. در بعضی موارد منحنی دیگری به اندازه ۱۰٪ پائین‌تر از منحنی اصلی رسم می‌شود که به آن منحنی حد شکل‌دهی امن^{۱۹} گفته می‌شود. این امر به این دلیل است که گلوبی شدن به عوامل مختلفی بستگی دارد که از جمله می‌توان به دقت تجهیزات و توانایی اپراتور اشاره کرد.

۱-۴-۳ - شبکه‌بندی نمونه‌ها

تحلیل شبکه‌های دایره‌ای روش مناسبی برای اطمینان از مطلوب بودن قالب تولید شده و تشخیص پارگی و یا گلوبی شدن می‌باشد. مجموعه‌ای از دایره‌های کوچک بر روی مناطق بحرانی ورق یا لوله به کمک روش -

^{۱۹} Safe FLD

های چاپ یا اچ کردن ایجاد می‌شود. پس از تغییر شکل قطعه در نقاط بحرانی، قطر بزرگ و کوچک دایره‌ها اندازه‌گیری می‌شود. مناطق بحرانی قطعه از روی پارگی و یا گلوبی شدن شناسایی می‌شوند. کرنش‌های موضعی از روی اندازه‌های بدست آمده محاسبه شده و در نمودار رسم می‌شوند. اگر بیشترین کرنش محاسبه شده، نزدیک و یا بالای نمودار حد شکل‌دهی باشد، در این صورت مشکلی در قالب‌بندی، روغن‌کاری، اندازه قطعه و یا پارامترهای پرس وجود دارد، حتی اگر گلوبی و یا پارگی نیز ایجاد نشده باشد [۱].

به‌منظور اندازه‌گیری کرنش‌ها پس از شکل‌دهی، لازم است که نمونه‌ها قبل از شکل‌دهی شبکه‌بندی شوند. حالت‌های مختلفی از شبکه‌بندی را می‌توان بکار برد. در حالت شبکه‌بندی مربعی و حالتی که تعدادی دایره به هم چسبیده و یا با هم تداخل دارند دقت خوبی ایجاد می‌شود ولی اندازه‌گیری شبکه‌ها مشکل است. بنابراین عموماً در شبکه‌ها از دایره‌هایی که با فاصله کمی از هم قرار دارند، استفاده می‌شود که با این طرح می‌توان به دقت خوبی رسید و ایجاد طرح و اندازه‌گیری آن نیز ساده‌تر می‌باشد. برای این طرح می‌توان از دایره‌هایی با قطر ۲/۵ میلی‌متر (۰/۱ in) استفاده کرد [۴].

۱-۳-۴-۱- انتخاب دایره‌ها

نمودارهای حد شکل‌دهی که در آزمایشگاه‌های مختلف بدست آمده‌اند، تا حدودی با یکدیگر تفاوت دارند. یکی از مهمترین دلایل این تفاوت آن است که تعیین نخستین باریک‌شدگی محسوس تا حدودی جنبه ذهنی دارد. در انتخاب دایره‌ها برای رسم نمودار حد شکل‌دهی، دایره‌هایی باید انتخاب شوند که دچار پارگی نشده و قبل از وقوع گلوبی موضعی باشد. فنونی که بدین منظور بکار می‌روند شامل انواع سیستم‌های بازرسی چشمی و لمسی با دست هستند. توصیه شده است که اندازه‌گیری‌ها در فاصله‌ای حداقل ۱/۵ برابر قطر دایره، از مرکز باریک‌شدگی انجام گردد [۱۳].

۱-۳-۴-۲- روش‌های اندازه‌گیری

در صورتی که قطر دایره چاپ شده روی قطعه اولیه، قبل از تغییر شکل D_0 باشد و پس از تغییر شکل به یک بیضی با قطرهای D_1 و D_2 تبدیل شود و با فرض اینکه تغییر شکل متناسب باشد، جهات اصلی کرنش

منطبق بر قطرهای بیضی بوده و در نتیجه کرنش‌های اصلی متناسب با قطرهای این بیضی می‌باشند. در این صورت کرنش‌های مهندسی برابر خواهند بود با:

$$e_1 = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \quad (1-1)$$

$$e_2 = \frac{D_2 - D_0}{D_0} \quad (2-1)$$

کرنش‌های حقیقی نیز از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\varepsilon_1 = Ln \frac{D_1}{D_0} \quad (3-1)$$

$$\varepsilon_2 = Ln \frac{D_2}{D_0} \quad (4-1)$$

به‌منظور اندازه‌گیری قطرهای دایره‌های تغییر شکل یافته، روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند که در زیر به آنها اشاره می‌شود:

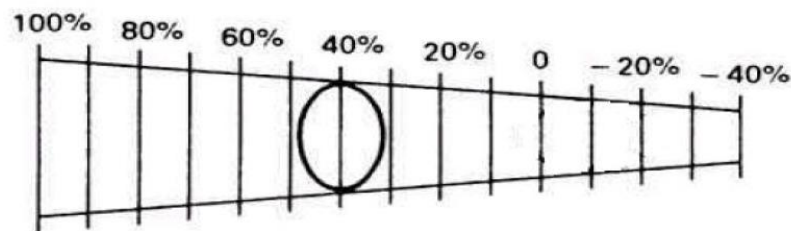
– کولیس دیجیتالی

اولین و ساده‌ترین وسیله‌ای که می‌توان با آن قطر دایره‌های تغییر شکل یافته را اندازه‌گیری نمود کولیس دیجیتالی است. مزیت آن سرعت بالا و عیب بزرگ آن دقت پایین است که دقت نمودار حد شکل‌دهی را کاهش می‌دهد.

– نوارمایلر

این وسیله یک نوار شفاف درجه‌بندی شده است که برای اندازه‌گیری مستقیم کرنش‌ها به صورت درصد کرنش، مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری، نوار مایلر را بر روی بیضی قرار داده طوری که خطوط مشبک آن در راستای قطر موردنظر باشد. سپس نوار مایلر را بر روی بیضی آنقدر جابجا کرده که یکی از خطوط با قطر موردنظر برابر شود. در این هنگام اندازه موجود بر روی خط، برابر درصد کرنش قطر بیضی

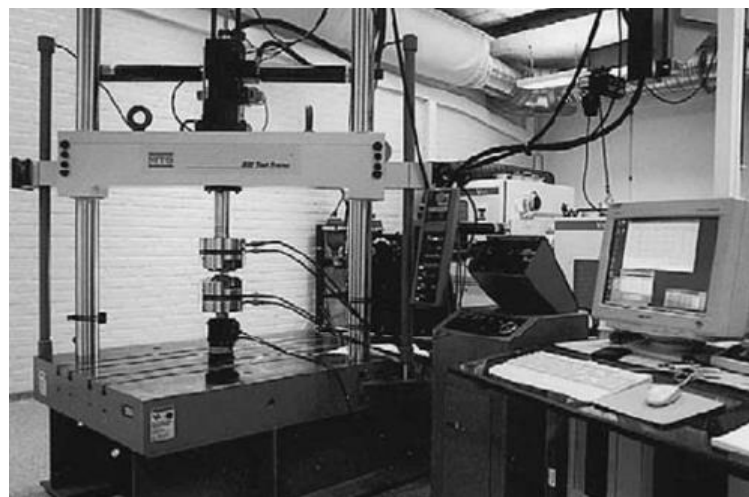
می‌باشد. نکته‌ای که باید به آن توجه شود این است که کرنش‌هایی که از طریق نوار مایلر اندازه‌گیری می‌شوند، کرنش مهندسی هستند. در شکل (۸-۱) نمونه‌ای از نوار مایلر نشان داده شده است [۱۶].



شکل (۸-۱) نوار مایلر برای اندازه‌گیری کرنش‌های حدی [۱۶]

– سیستم‌های اندازه‌گیری با روش پردازش تصاویر دیجیتال

سیستم‌های خودکار به نام تحلیل‌گرهای شبکه دایره‌ای به کمک روش پردازش تصاویر دیجیتال (DIC)، برای اندازه‌گیری ابعاد دایره‌ها و نمایش کرنش نیز به کار می‌روند که دارای دقت خوبی هستند. این سیستم در شکل (۹-۱) نشان داده شده است [۱۶].



شکل (۹-۱) سیستم تحلیل‌گر شبکه دایره‌ای به کمک روش پردازش دیجیتال [۱۶]

۱-۵- مروری بر پژوهش‌های مرتبط با بررسی شکل‌پذیری لوله در فرایند

هیدروفرمینگ

در سال‌های اخیر فعالیت‌های پژوهشی قابل‌توجهی در راستای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرایند هیدروفرمینگ، با هدف دستیابی به یک قطعه بدون نقص صورت گرفته است. اسنافی [۱۷، ۱۸] در سال ۱۹۹۹ در راستای پیش‌بینی پارگی، مدل هیدروفرمینگ لوله را تحلیل نموده و تغییر شکل پلاستیک آن را بررسی نمود. وی معیار گلوبی‌شدن موضعی را برای پیش‌بینی پارگی بکار برد. این محقق از مدل تحلیلی خود برای نشان دادن حد شکل‌دهی حین بارگذاری آزاد استفاده نموده و اثر پارامترهای ماده و فرایند را بر مسیر بارگذاری و شکل‌دهی قطعه مورد بررسی قرار داد. نفوزی و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۰۲ معیار سوئیفت را برای پیش‌بینی گلوبی‌پخشی در شکل‌دهی ورق و هیدروفرمینگ لوله مورد استفاده قرار دادند. این محققان کمانش و گلوبی‌شدن را به طور همزمان بررسی کردند. آنها به صورت تحلیلی و عددی نشان دادند که حد کرنش برای بروز کمانش، کمتر از حد کرنش برای بروز گلوبی‌شدن است. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که معیار سوئیفت به تنهایی برای پیش‌بینی ناپایداری در فرایند هیدروفرمینگ لوله مناسب نمی‌باشد. کیم و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۰۴ تحلیل المان محدود را برای پیش‌بینی پارگی در فرایند هیدروفرمینگ لوله انجام دادند و ناپایداری پلاستیک پخشی را برای پیش‌بینی عددی حد شکل‌دهی بکار بردند. برای لوله‌های ناهمسانگرد، بر مبنای معیار هیل درجه دو، حل نمودی پتانسیل پلاستیک را در نظر گرفتند. آنها از طریق این تئوری، اثرات ناهمسانگردی را بر روی حد کرنش و فشار پارگی بررسی نمودند. بومایزا و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۰۶، ناپایداری پلاستیک لوله‌های الاستوپلاستیک را نسبت به فشار داخلی مورد مطالعه قرار دادند و معیار گلوبی‌شدن پخشی جدیدی را که در بردارنده اثرات هندسی بود پیشنهاد کردند. سورنین و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۰۹ شبیه‌سازی فرایند هیدروفرمینگ را برای دو لوله T و Y شکل انجام دادند و ناپایداری پلاستیک را با استفاده از مدل معیوب بررسی نمودند. در همان سال بوچر و همکاران [۲۳] یک لوله فولادی کربن بالا را با استفاده از مدل نقص، در فرایند هیدروفرمینگ بررسی

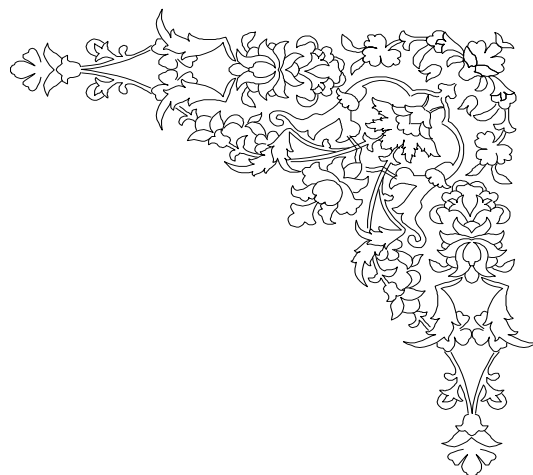
کردند و نتایج حاصل را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. کراپز و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۰ تحلیل المان محدود را با استفاده از متغیر حالت وابسته به تاریخچه زمانی حل، برای فرایند هیدروفرمینگ لوله مسی T شکل انجام دادند و معیاری برای تغییر پارامترهای مختلف فرایند (مسیرهای فشار و سرعت) نسبت به محصول نهایی ارائه نمودند. لی و همکاران [۲۵] توانستند قطعات متنوعی را با نسبت انبساط بالا و سطح مقطع متغیر در طول لوله و همچنین با جنس‌های متفاوت نظیر آلیاژ آلومینیوم و فولاد زنگ‌نزن، با استفاده از فرایند هیدروفرمینگ لوله، با اعمال فشار داخلی زیاد شکل بدهند. نکته کلیدی پژوهش مذکور، ایجاد چروک‌های اولیه مفید در لوله برای رسیدن به شکل نهایی مورد نظر می‌باشد. امیر عبدالهیان و گردویی [۲۶، ۲۷] ترکیدگی لوله را در فرایند هیدروفرمینگ، در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، به صورت تحلیلی و بر مبنای ناپایداری پلاستیک پیش‌بینی نمودند. بدین منظور، پیش‌بینی ترکیدگی بر مبنای سه معیار مختلف گلوبی شدن پخشی برای یک ورق و یک لوله و نیز معیار گلوبی شدن موضعی برای یک ورق مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از معیار ناهمسانگردی هیل درجه دو و بکارگیری تئوری نمودی پلاستیسیته، نمودار حد تنش شکل‌دهی و نمودار ترکیدگی نسبت به جابجایی محوری بدست آمد. بعلاوه، این محققان تاثیر خواص مواد مانند پارامتر ناهمسانگردی، توان کرنش سختی و ضریب استحکام را روی ناپایداری پلاستیک و فشار ترکیدگی بررسی کردند. نتایج نشان داد که برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی و فشار ترکیدگی در فرایند هیدروفرمینگ، معیار گلوبی شدن پخشی کاملاً مناسب می‌باشد. همچنین ناپایداری پلاستیک با افزایش توان کرنش سختی و افزایش پارامتر ناهمسانگردی کاهش می‌یابد. فشار ترکیدگی نیز با افزایش مقدار توان کرنش سختی و پارامتر ناهمسانگردی افزایش می‌یابد. دیگر تحقیق‌های انجام شده در داخل و خارج از کشور در خصوص فرایند هیدروفرمینگ لوله، معطوف به شبیه‌سازی شکل‌دهی قطعات صنعتی در فرایند هیدروفرمینگ بوده است و در خصوص پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی و پارگی لوله، خصوصاً با استفاده از روش تجربی، به‌ندرت تحقیقی صورت گرفته است.

۱-۶- اهداف پایان نامه

استفاده از منحنی‌های حد شکل‌دهی (FLD) بدست آمده از روش‌های شکل‌دهی سنتی که در شرایط فشار هیدروستاتیکی بسیار ناچیز حاصل شده است در فرایندهای هیدروفرمینگ معتبر نیست. از سوی دیگر بکارگیری منحنی حد شکل‌دهی (FLD) بدست آمده از روش‌های شکل‌دهی ورق نیز در فرایندهای هیدروفرمینگ لوله نامعتبر و خطاساز است. لذا در این پژوهش با هدف پیش‌بینی تجربی حد شکل‌دهی یک لوله از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، نخست به بررسی عددی اثر مسیر بارگذاری و هندسه قالب بر مسیر کرنش‌گذاری و ناپایداری پلاستیک ایجاد شده در لوله، در حین فرایند هیدروفرمینگ پرداخته شده است. این مطالعه شامل شبیه‌سازی عددی فرایند و تعقیب مسیر کرنش تا لحظه پارگی است و در نتیجه‌ی آن، تست‌های تجربی مناسب به منظور دستیابی به نقاط کرنش بحرانی با پراکندگی متوازن در صفحه کرنش‌های اصلی بزرگتر و کوچکتر طراحی گردید. پس از ساخت قالب‌ها، فرایند هیدروفرمینگ برای پیش‌بینی کرنش بحرانی به اجرا گذاشته شده و فرایند تا رسیدن به لحظه پارگی لوله ادامه یافت. سپس تحلیل تجربی کرنش با اندازه‌گیری مقادیر کرنش در نواحی هم‌جوار پارگی صورت گرفت. از هر تست تعدادی از نقاط مربوط به حد شکل‌دهی استخراج و نمودار حد شکل‌دهی (FLD) فلز مورد نظر ترسیم گردید. در مرحله پایانی به - منظور بررسی میزان کارایی و دقت معیار شکل‌پذیری استخراج شده، از آن برای پیش‌بینی پارگی یک قطعه پیچیده صنعتی (لوله بادامک) استفاده شد. از مهمترین نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به ارائه‌ی یک الگوی تجربی جهت استخراج حد شکل‌دهی لوله‌های فلزی در فرایند هیدروفرمینگ لوله اشاره کرد.

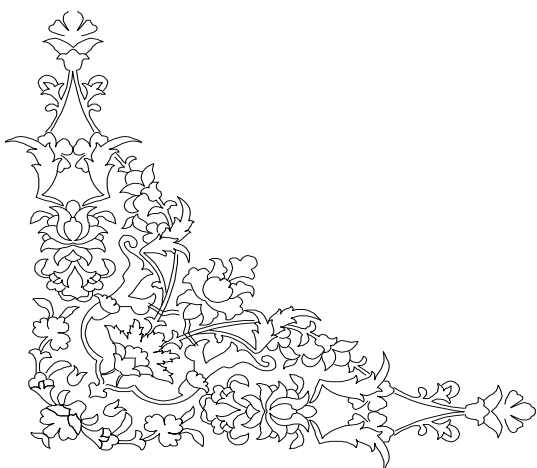
در انجام پایان‌نامه حاضر، در ابتدا مطالعه‌ی پیرامون فرایند هیدروفرمینگ و برآورد نمودارهای حد شکل‌دهی و همچنین مطالعه‌ی پیرامون پژوهش‌های انجام شده توسط سایر محققان صورت گرفت که در فصل اول بیان شد. تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده در انجام آزمایش‌ها، نحوه بدست آوردن خواص مکانیکی لوله و روند انجام آزمایش‌های تجربی در فصل دوم ارائه شده است. به‌منظور بررسی کامل‌تر تاثیر پارامترهای موثر قالب بر مسیر کرنش‌گذاری، از نتایج شبیه‌سازی استفاده شد. لذا در فصل سوم مراحل انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS و چگونگی تعریف محیط‌های مختلف آن معرفی می‌گردد. در فصل چهارم به بحث

پیرامون نتایج بدست آمده پرداخته می‌شود. در نهایت، در فصل پنجم نتیجه‌گیری‌های کلی از پایان‌نامه بیان شده و چند پیشنهاد به منظور بررسی کامل‌تر این تحقیق ارائه خواهد شد.



فصل دوم

شرح آزمون‌های تجربی



۲-۱- مقدمه

در این فصل، ابتدا به معرفی تجهیزات استفاده شده در آزمایش‌ها پرداخته می‌شود. در ادامه، نحوه عملکرد قالب و همچنین نحوه بدست آوردن خواص مکانیکی لوله شرح داده خواهد شد.

۲-۲- معرفی تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور مطالعه تجربی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ با فرایند هیدروفرمینگ از تجهیزات آزمایشگاهی زیر استفاده شد:

۲-۲-۱- دستگاه پرس

به منظور تامین تغذیه محوری و فشردن لوله به درون قالب، تمامی آزمایش‌ها با استفاده از یک دستگاه تست اونیورسال هیدرولیکی^۱ DMG با ظرفیت ۶۰۰ KN انجام شده است که تصویر آن در شکل (۲-۱) قابل مشاهده است. این دستگاه در طول انجام آزمایش‌ها متصل به یک واحد کامپیوتری بوده و کلیه حرکات آن توسط کامپیوتر قابل کنترل می‌باشد بطوری که امکان تنظیم دقیق نرخ پیشروی و مشاهده دقیق نیروی پرس در هر لحظه را میسر می‌سازد. سرعت این دستگاه متغیر است و با استفاده از کامپیوتر متصل به آن قابل تنظیم می‌باشد. حداکثر سرعت در ماشین اونیورسال ۲۰۰ mm/min است. برای ثبت خروجی‌های دستگاه، تسهیلات کاملاً خودکار کامپیوتری بر روی مجموعه ماشین تعبیه شده است که این خروجی‌ها را می‌توان به صورت منحنی چاپ شده یا فایل متنی با پسوند *.TXT دریافت کرد.

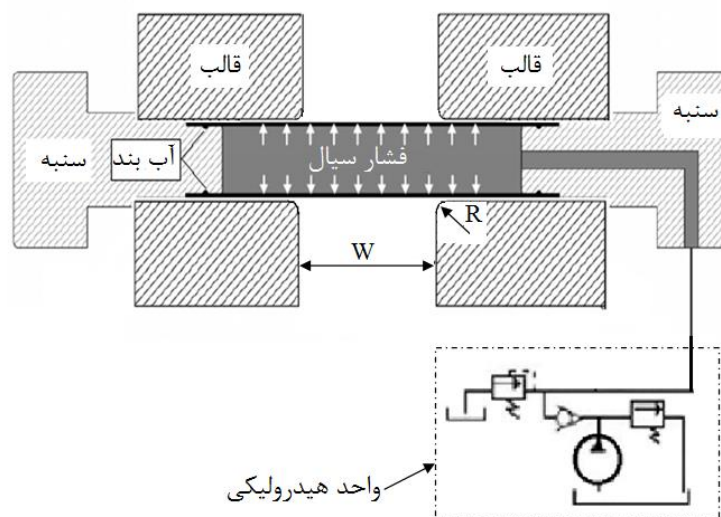
^۱ Denison & Mayes Group



شکل (۱-۲) دستگاه آزمایش اونیورسال (DMG)

۲-۲-۲- مجموعه قالب

همانگونه که پیشتر نیز بیان شد، در این پژوهش از روش بالج هیدرولیکی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی لوله استفاده گردید. این روش در بخش (۱-۳-۲-۲) توضیح داده شد. شماتیک قالب استفاده شده در این تحقیق و پارامترهای هندسی مورد بررسی (R و W) در شکل (۲-۲) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۲-۲) شماتیک قالب استفاده شده در این پژوهش

اجزای مختلف قالب استفاده شده در این پژوهش در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. قطعات قالب فوق از جنس فولاد St۳۷ می‌باشد که با عملیات تراشکاری ساخته و سطح آن پرداخت شده است. نقشه‌های ساخت اجزای قالب مذکور در پیوست ارائه شده است.



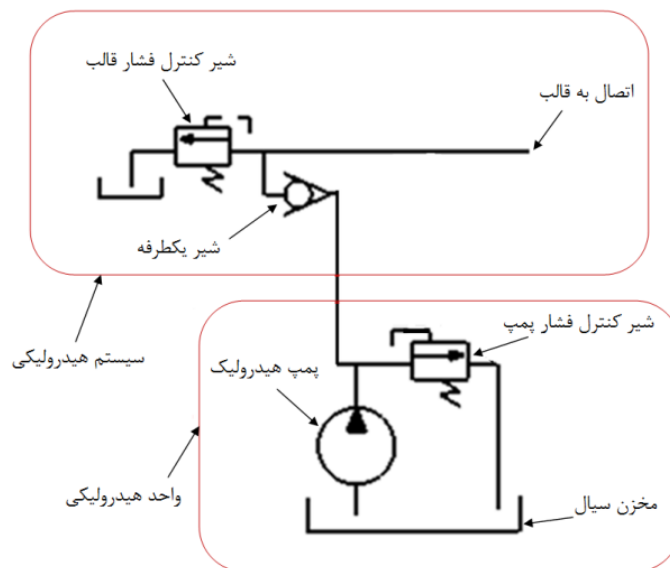
شکل (۳-۲) اجزای مختلف قالب هیدروفرمینگ لوله استفاده شده در این پژوهش

۳-۲-۲- سیستم تامین فشار

برای تامین فشار از یک واحد هیدرولیکی استفاده گردیده است که این واحد قابلیت اعمال فشار را تا حداکثر ۳۰ MPa دارد. شکل (۴-۲) این واحد را نشان می‌دهد که دبی آن توسط یک پیچ تنظیم، قابل تغییر می‌باشد. برای تنظیم فشار داخل مخزن، از یک مدار هیدرولیکی استفاده شده است. این مدار هیدرولیکی از یک شیر کنترل فشار جهت تنظیم فشار، یک فشارسنج جهت نشان دادن مقدار فشار داخل مخزن، یک شیر یک‌طرفه، سه‌راهی و اتصالات هیدرولیکی تشکیل می‌شود. شکل (۵-۲) مدار هیدرولیکی را نشان می‌دهد. تجهیزات سیستم هیدرولیکی مربوط به این مدار در شکل (۶-۲) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲) واحد هیدرولیکی تامین فشار اولیه



شکل (۵-۲) مدار هیدرولیکی استفاده شده در انجام آزمایش‌ها

نحوه عملکرد مدار هیدرولیکی به این صورت است که فشار با استفاده از پمپ هیدرولیکی ایجاد و با استفاده از شیر یک‌طرفه وارد قالب می‌شود. از شیر یک‌طرفه بدین منظور استفاده می‌شود که در صورت افزایش فشار داخل قالب، سیال وارد مدار هیدرولیکی پمپ نشود. برای کنترل فشار داخل قالب از یک شیر کنترل فشار استفاده شده است. در این شیر با تنظیم فشار روی مقدار خاص، حداکثر فشار داخل قالب تعیین می‌گردد، به گونه‌ای که پس از رسیدن فشار محفظه قالب به فشار تنظیم شده توسط شیر، شیر کنترل فشار باز شده و سیال از طریق آن خارج می‌شود. بدین ترتیب از افزایش فشار بیش از حد در محفظه قالب

جلوگیری به عمل می‌آید. در این سیستم هیدرولیکی از یک فشارسنج دیجیتالی نیز استفاده شده است که با استفاده از آن، مقدار فشار در هر لحظه توسط کامپیوتر ثبت می‌شود و نمودار فشار بر حسب زمان توسط یک نرم‌افزار قابل ترسیم می‌باشد.



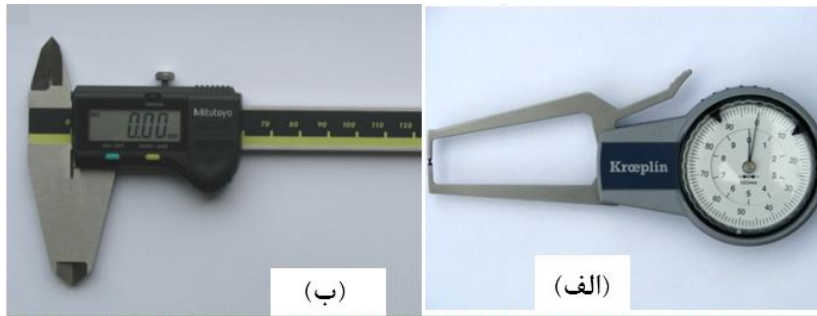
شکل (۶-۲) تجهیزات سیستم هیدرولیکی کنترل فشار

۴-۲-۲- سیال هیدرولیکی

سیال به کار رفته در آزمایش‌ها، روغن SAE 20W50 ساخت کارخانه نفت پارس می‌باشد. گرانروی این روغن در 40°C برابر 158cSt و چگالی آن برابر 0.891 g/cm^3 می‌باشد.

۵-۲-۲- وسایل اندازه‌گیری

در این پژوهش برای اندازه‌گیری ضخامت قطعات شکل داده شده از دستگاه ضخامت سنج **Kroepelin** ساخت کشور آلمان استفاده شد. فک‌های اندازه‌گیری این ضخامت‌سنج دارای نوک کرومی می‌باشد و بدین ترتیب قابلیت اندازه‌گیری ضخامت قسمت‌های مختلف قطعه کار را با دقت 0.01 mm فراهم می‌کند. برای اندازه‌گیری ضخامت قسمت‌هایی از قطعه که اندازه‌گیری آن با دستگاه ضخامت‌سنج امکان‌پذیر نبود از کولیس دیجیتالی با دقت 0.01 استفاده شد. شکل (۷-۲) وسایل اندازه‌گیری فوق را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری کرنش قطعات شکل داده شده نیز از یک نوار مایلر استفاده شد.



شکل (۲-۷) تجهیزات اندازه‌گیری (الف) ضخامت‌سنج مکانیکی (ب) کولیس دیجیتالی

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش

به منظور اندازه‌گیری کرنش‌ها پس از شکل‌دهی، لازم است که نمونه‌ها شبکه‌بندی شوند. بدین منظور الگوهای متفاوتی جهت شبکه‌بندی ارائه شده است که در بین آن‌ها الگوی دایره‌ای بیشترین کاربرد را دارا می‌باشد. در این پژوهش بر اساس استاندارد ASTM E-۲۲۱۸ از دایره‌هایی به قطر $2/5$ mm و فاصله مرکز تا مرکز 3 mm برای شبکه‌بندی استفاده شده است. پس از انجام آزمایش، برای اندازه‌گیری دایره‌های تغییر شکل یافته از نوار مایلر و کولیس دیجیتالی استفاده شده است. نمونه‌ای از لوله شبکه‌بندی شده مورد استفاده در انجام آزمایش‌های تجربی در شکل (۲-۸) نشان داده شده است.



شکل (۲-۸) لوله شبکه‌بندی شده مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی

۲-۴- نحوه عملکرد قالب

نحوه عملکرد مجموعه قالب هیدروفرمینگ لوله به این شرح است که ابتدا لوله درون قالب قرار می‌گیرد. سپس سنبه‌ها در دو طرف لوله‌ها قرار می‌گیرد و قالب توسط حلقه‌های آب‌بندی نصب شده در انتهای سنبه‌ها، از دو طرف آب‌بندی می‌شود. سپس روغن پرفشار از واحد هیدرولیک و از طریق سوراخ مرکزی

سنبله بالایی به داخل لوله اعمال می‌گردد. در حالت بارگذاری بدون تغذیه محوری، با ایجاد فشار داخلی، لوله در ناحیه شبکه‌بندی شده انبساط می‌یابد. این افزایش فشار تا حدی ادامه می‌یابد که در لوله پارگی ایجاد شود. در این حالت، سنبله‌ها هیچ‌گونه تغذیه محوری به لوله نمی‌دهند و تنها نقش آب‌بندی قالب را به عهده دارند. در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، پس از افزایش فشار و بشکته‌ای شدن لوله، سنبله‌ها لوله را به درون قالب تغذیه می‌کنند. سنبله بالایی توسط دستگاه پرس، با سرعت 20 mm/min به سنبله پایینی نزدیک می‌شود. در این حالت تغذیه محوری بصورت یک‌طرفه اعمال گردید. به‌منظور ایجاد مسیرهای کرنش‌گذاری مختلف، پارامترهای هندسی قالب (شعاع گوشه و طول ناحیه تغییر شکل)، مقدار تغذیه محوری لوله و نحوه بارگذاری، تغییر داده شد. شرایط مختلف آزمایش‌های تجربی انجام شده، در جدول (۱-۲) نشان داده شده است.

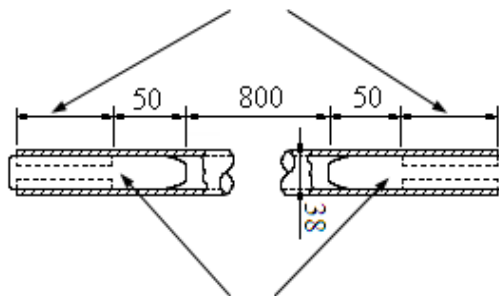
جدول (۱-۲) شرایط آزمایش‌های تجربی انجام شده

پارامترهای هندسی قالب		مقدار تغذیه محوری (L) (mm)	حالت بارگذاری	
شعاع گوشه (R) (mm)	طول ناحیه تغییر شکل (W) (mm)			
۱۰	۲۰	-	آزاد	
۵	۴۰			
۱۰				
۱۵				
۱۰	۶۰	۱۰	با تغذیه محوری لوله	
۱۰	۴۰			۲۰
				۳۰
		۴۰		۱۰
۵				
۱۰				
۱۵				
۱۰	۶۰			

۲-۵ - تعیین خواص مکانیکی لوله

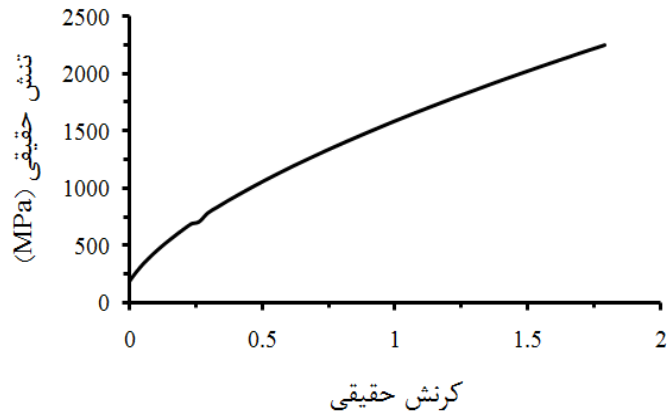
لوله مورد استفاده در آزمایش‌ها از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ می‌باشد. قطر خارجی لوله‌ها ۳۸ mm، طول آن ۲۰۰ mm و ضخامت آن ۰/۷۵ mm است. به‌منظور تعیین خواص مکانیکی آن، آزمون کشش لوله انجام شده است. بدین منظور، نمونه‌هایی مطابق استاندارد ASTM-A۳۷۰ تهیه شد که ابعاد آن در شکل (۲-۹) نشان داده شده است. این نمونه‌ها در دمای محیط تا حد پارگی کشیده شدند و منحنی نیرو-جابجایی آنها ثبت گردید و از این نتایج، منحنی تنش-کرنش حقیقی نمونه‌ها بدست آمد. منحنی تنش-کرنش حقیقی بدست آمده از تست کشش در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است. مشخصات فیزیکی لوله فولادی شامل مدول کشسان، ضریب پواسون و چگالی و درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده لوله به ترتیب در جدول (۲-۲) و (۲-۳) درج شده است. در تمامی بررسی‌ها از ناهمسانگردی لوله‌ها صرف‌نظر شده است.

فاصله قرارگیری لوله در فک‌های دستگاه آزمایش



سنجه جهت جلوگیری از لهیدگی لوله در حین آزمایش

شکل (۲-۹) مشخصات ابعادی نمونه آزمون کشش لوله مطابق استاندارد ASTM-A۳۷۰، ابعاد به میلی‌متر



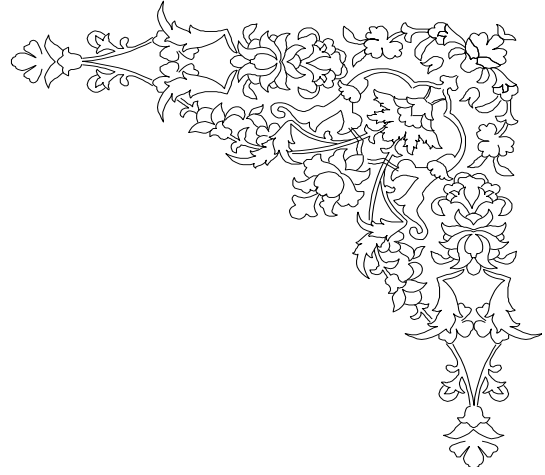
شکل (۱۰-۲) منحنی تنش-کرنش حقیقی بدست آمده از تست کشش لوله فولادی

جدول (۲-۲) خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله فولادی مورد استفاده در آزمایش‌ها

جنس ورق	چگالی ρ (kg/m^3)	مدول یانگ E (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون ν
فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴	۷۹۳۰	۲۰۰	۲۱۵	۰/۲۹

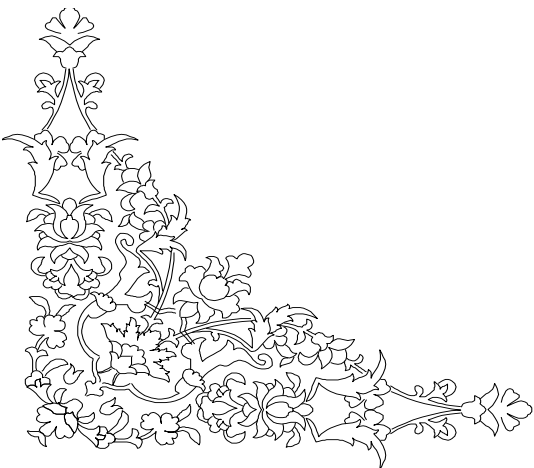
جدول (۳-۲) ترکیب شیمیایی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴

عنصر	کربن	کروم	نیکل	منگنز	فسفر	سیلیسیم	گوگرد	آهن
درصد وزنی	۰/۰۸	۱۸-۲۰	۸-۱۰/۵	۲	۰/۰۴۵	۱	۰/۰۳	۶۶-۷۴



فصل سوم

شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ لوله



۳-۱- مقدمه

در سال‌های اخیر روش اجزای محدود^۱ به یک ابزار بسیار قدرتمند برای شبیه‌سازی فرایندهای مختلف تولید تبدیل گردیده است. هنگام تدوین و توسعه یک فرایند جدید، شبیه‌سازی صحیح فرایند و آزمایش پارامترهای مختلف آن در ابتدای امر بسیار موثر بوده و بدین ترتیب طراحی ساختار صحیح و انتخاب پارامترهای صحیح فرایند قبل از آزمایش عملی ممکن خواهد بود. در نتیجه زمان صرف شده و تعداد آزمایش و خطا کاهش یافته و منجر به کاهش هزینه‌های تولید خواهد گردید. از جمله کدهای متداول صریح FE می‌توان به ABAQUS، ANSYS، LS-DYNA3D اشاره کرد. به علت قابلیت‌های بالای نرم‌افزار ABAQUS نسبت به سایر نرم‌افزارهای اجزای محدود، در این پژوهش از نرم‌افزار فوق برای انجام شبیه‌سازی استفاده گردیده است. از جمله خصوصیات بارز این نرم‌افزار که آن را نسبت به سایر نرم‌افزارهای مشابه متمایز کرده، راحتی استفاده، دقت و سرعت بالای محاسبات است. در ادامه، نخست نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود ABAQUS معرفی شده و سپس مراحل تحلیل فرایند هیدروفرمینگ لوله، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود ارائه می‌گردد.

۳-۲- معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی

نرم‌افزار ABAQUS یکی از نرم‌افزارهای تحلیل اجزای محدود است که در سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای در زمینه شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی فلزات پیدا کرده است، به طوری که شرکت‌های بزرگ اتومبیل‌سازی برای طراحی‌های پیشرفته خود به استفاده از نرم‌افزار ABAQUS روی آورده‌اند. امروزه ABAQUS به عنوان یک نرم‌افزار انعطاف‌پذیر در حل مسائل به روش اجزای محدود در پژوهشکده‌های مهندسی دنیا جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده و به عنوان نرم‌افزار قدرتمند مهندسی در مراکز تحقیقات اغلب صنایع استفاده می‌شود [۲۸].

^۱ Finite element

یک بسته نرم‌افزاری ABAQUS دارای سه محصول اصلی است که شامل موارد زیر است [۲۸]:

۱- **ABAQUS/Standard**: محصول اصلی شرکت ABAQUS است که با استفاده از آن می‌توان گستره وسیعی از مسائل خطی و غیرخطی شامل مسائل استاتیکی، دینامیکی، انتقال حرارت و الکترونیک را تحلیل کرد. این محصول دستگاه معادلات حاکم را در هر نمو^۲ به صورت ضمنی^۳ تحلیل می‌کند. در این روش، کاربر می‌تواند میزان نمو در هر مرحله را تعیین کند یا از روش نیوتن-رافسون اصلاح شده استفاده نماید.

۲- **ABAQUS/Explicit**: محصولی با اهداف ویژه است که برای مدل‌سازی مسائل دینامیکی گذرا مانند برخورد و ضربه‌ی انفجار، آزمایش ضربه، مچالگی و همچنین مسائل شبه استاتیکی یا مسائل غیرخطی که در آنها شرایط تماس تغییر می‌کند (مانند شکل‌دهی) مناسب است. این محصول، دستگاه معادلات حاکم را بر پایه قانون انتگرال‌گیری صریح^۴ به همراه استفاده از ماتریس جرم قطری المان تحلیل می‌کند. در این روش تعیین اندازه نمو در مسائل غیرخطی توسط کاربر ممکن نبوده و نرم‌افزار بر اساس شرایط پایداری، میزان نمو در هر مرحله را به صورت اتوماتیک محاسبه می‌کند.

۳- **ABAQUS/CAE**: به عنوان یک رابط گرافیکی کاربر در بسته نرم‌افزاری ABAQUS گنجانده شده است. این محصول به کاربر کمک می‌کند که یک مدل هندسی را سریعاً و به‌سادگی بسازد یا از یک نرم‌افزار مدل‌سازی دیگر وارد کند. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مدل هندسی قطعه را گسسته‌سازی و خواص مواد آن را تعیین و شرایط مرزی و بار اعمالی را مشخص کرد.

در این پژوهش از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit 6.11 جهت انجام شبیه‌سازی استفاده شده است.

^۲ Increment

^۳ Implicit

^۴ Explicit

۳-۳-۳- مراحل شبیه‌سازی

در این پژوهش، شبیه‌سازی شامل دو قسمت مجزا است که در هر یک از آن‌ها هدف مشخصی دنبال می‌شود. قسمت اول شبیه‌سازی‌ها شامل بالج آزاد^۵ لوله در قالب هیدروفرمینگ می‌باشد که به منظور مطالعه اثر پارامترهای مختلف فرایندی و هندسی بر مسیر کرنش‌گذاری و ناپایداری پلاستیک ایجاد شده در لوله انجام شده است. این قسمت از شبیه‌سازی، با هدف طراحی آزمایش‌های تجربی و دستیابی به مسیرهای کرنش-گذاری مختلف به منظور ترسیم منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ انجام شد. قسمت دوم شبیه‌سازی شامل مدل‌سازی قطعه صنعتی (لوله بادامک) می‌باشد که به منظور صحت‌سنجی منحنی حد شکل‌دهی بدست آمده برای لوله فولادی انجام شد. به طوری که با پیش‌بینی شکست در لوله بادامکی از جنس فولاد، منحنی حد شکل‌دهی بدست آمده در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور مدل‌سازی مجموعه قالب و لوله در هر یک از قسمت‌ها، مراحل مختلفی در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شده است که این مراحل در ادامه به ترتیب توضیح داده خواهد شد.

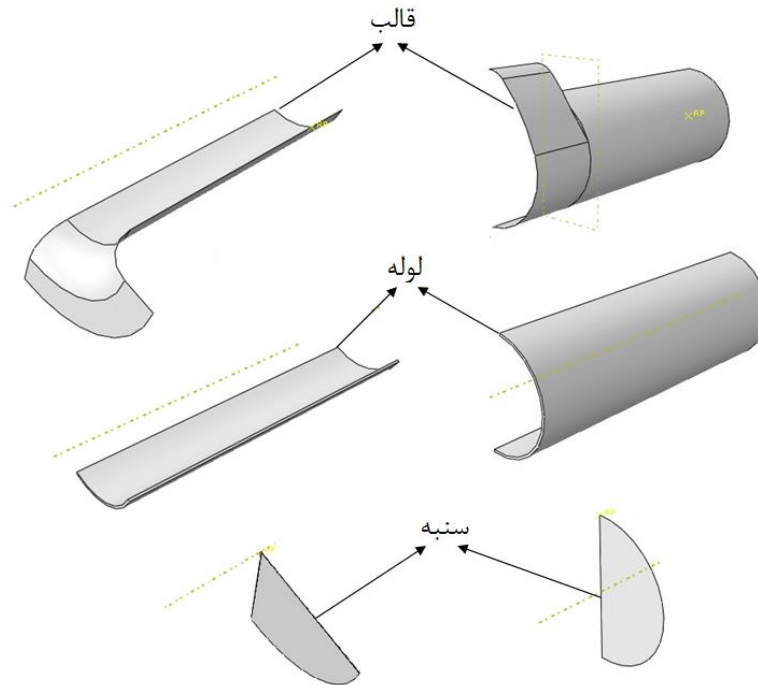
۳-۳-۱- ایجاد مدل هندسی

اولین مرحله در شبیه‌سازی یک فرایند، ایجاد مدل هندسی اجزای مختلف مسئله مورد نظر می‌باشد. برای ایجاد مدل هندسی در شبیه‌سازی اجزای محدود، همواره سعی بر آن است که قطعه‌ها در ساده‌ترین هندسه ممکن ترسیم شوند تا زمان لازم برای تحلیل توسط رایانه کاهش یابد. در این پژوهش از مدل سه‌بعدی برای تحلیل استفاده شده است. بدلیل تقارن محوری اجزای قالب و لوله و همچنین به منظور کاهش زمان تحلیل، برای مطالعه منحنی حد شکل‌دهی، یک‌هشتم مجموعه قالب و لوله و برای بررسی قطعه بادامک، یک‌چهارم مجموعه قالب و لوله مدل شد. در مدل‌سازی قطعات، فقط سطوحی از قالب که در تماس با لوله قرار می‌گیرند، مدل‌سازی شدند. مجموعه قالب به صورت پوسته‌ای مدل شد. مدل لوله از نوع شکل‌پذیر^۶ و مدل

^۵ Free bulging

^۶ Deformable

سایر قطعات قالب، از نوع صلب گسسته^۷ انتخاب شد. در ادامه به هر یک از اجزای قالب یک نقطه مرجع اختصاص داده شد تا به منظور تعریف شرایط مرزی از آن استفاده شود. در شبیه‌سازی‌ها ضخامت لوله برابر با اندازه واقعی آن یعنی 0.75 mm در نظر گرفته شد. در شکل (۱-۳) مدل ترسیم شده اجزای قالب و لوله اولیه نشان داده شده است.



شکل (۱-۳) هندسه اجزای قالب و لوله در نرم‌افزار شبیه‌سازی، سمت راست: قطعه بادامک، سمت چپ: انبساط‌دهی آزاد

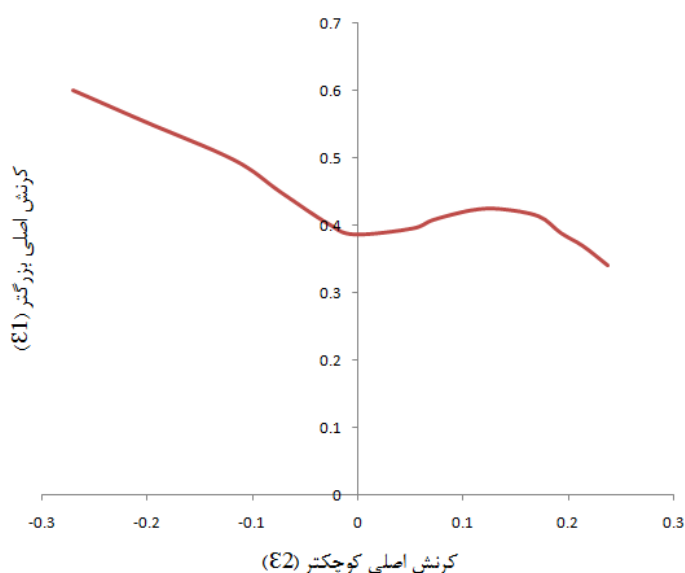
۳-۳-۲- تعیین خصوصیات لوله

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله در واحد خواص^۸ تعریف شده و به مدل هندسی لوله نسبت داده می‌شود. این خصوصیات شامل منحنی تنش-کرنش حقیقی، ضریب پواسون، مدول الاستیک و چگالی می‌باشد. مطابق جدول (۲-۲) و شکل (۲-۱۰) خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله به نرم‌افزار اعمال گردید. از آنجایی که اجزای قالب به صورت صلب مدل شده‌اند، خواص مکانیکی به آن‌ها نسبت داده نشد. لوله‌های فولادی استفاده شده در آزمایش‌ها همسانگرد فرض شده و با $R=1$ در نظر گرفته شدند.

^۷ Discrete rigid

^۸ Property

یکی از مهم‌ترین موارد در انجام شبیه‌سازی پیش‌بینی پارگی می‌باشد. در این پژوهش، به‌منظور پیش‌بینی پارگی لوله فولادی زنگ‌نزن در حالت بالج آزاد، منحنی حد شکل‌دهی ورق فولادی زنگ‌نزن که از مرجع [۲۹] استخراج شد به عنوان معیار پارگی مورد استفاده قرار گرفت. این منحنی در شکل (۲-۳) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای پیش‌بینی پارگی لوله بادامک در شبیه‌سازی، منحنی حد شکل‌دهی بدست آمده از پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفت و منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ که از آزمایش‌های تجربی بدست آمده بود، به عنوان معیار پارگی مورد استفاده قرار گرفت.

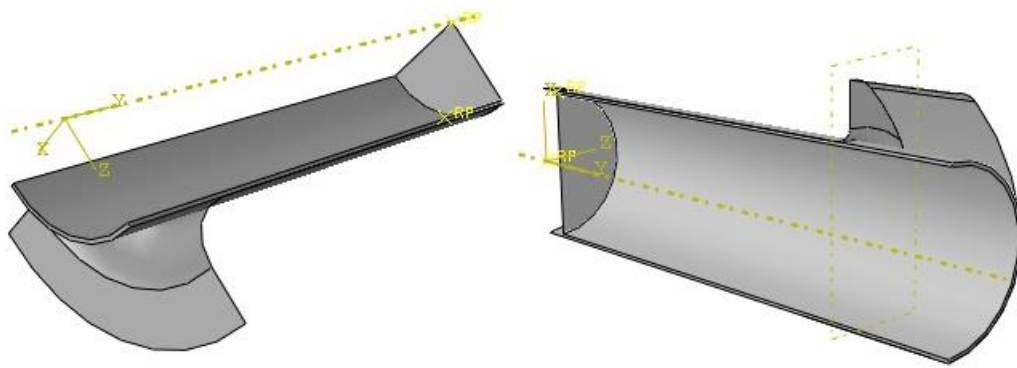


شکل (۲-۳) منحنی حد شکل‌دهی ورق فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ [۲۹]

۳-۳-۳- مونتاژ لوله و اجزای قالب

پس از مشخص کردن خصوصیات مکانیکی، در واحد مونتاژ^۹ قطعه‌های مربوطه فراخوانی شده و در محل مناسب نسبت به سایر قطعه‌ها مستقر می‌شوند. شکل (۳-۳) چگونگی استقرار اجزای مجموعه قالب را نشان می‌دهد.

^۹ Assembly



شکل (۳-۳) مونتاژ اجزای قالب و لوله در شبیه‌سازی، سمت راست: قطعه بادامک، سمت چپ: انبساط‌دهی آزاد

۳-۳-۴ - تعیین تعداد مراحل و نوع حل مسئله

نوع مسئله و مراحل شبیه‌سازی اجزای محدود را می‌توان در واحد گام^{۱۰} تعریف کرد. در این پژوهش انجام شبیه‌سازی فرایند در یک گام تنظیم گردید که در آن ابتدا سنبه ثابت بوده و لوله با افزایش فشار داخلی بشکهای می‌شود. سپس همزمان با افزایش فشار داخلی یا ثابت بودن آن، سنبه نیز حرکت کرده و موجب تغذیه محوری لوله می‌شود. حرکت سنبه بر اساس سرعت سنبه ثابت و جابجایی معین تنظیم شده است. با توجه به نوع فرایند که در حالت سرد انجام می‌شود و تغییر شکل زیاد ماده، از گزینه حل صریح دینامیکی^{۱۱} برای تحلیل استفاده شد. برای کاهش زمان محاسبات، در استفاده از حلگر صریح زمان تحلیل به میزان کسری از زمان واقعی فرایند، برابر ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته شد و همواره دقت شد تا مقدار انرژی جنبشی تغییر شکل از یک درصد مجموع انرژی داخلی شکل‌دهی تجاوز نکند تا آنکه طبیعت شبه استاتیکی مسئله حفظ شود. با توجه به حساسیت به نرخ کرنش بسیار پائین فولاد زنگ‌نزن در دمای محیط، این کاهش زمان تاثیری در مکانیک فرایند شکل‌دهی نخواهد داشت [۳۰].

^{۱۰} Step

^{۱۱} Dynamic Explicit

نرم‌افزار ABAQUS امکان تعیین نتایج را به دو صورت خروجی میدان^{۱۲} و خروجی پیشینه^{۱۳} فراهم می‌کند. تفاوت این دو به این صورت است که برای پارامترهایی که به صورت خروجی میدان تعریف می‌شوند، میزان پارامتر در کل قطعه در زمان موردنظر نشان داده می‌شود. اما در پارامترهای خروجی پیشینه، مقدار پارامتر در یک یا چند نقطه در کل زمان تحلیل نشان داده می‌شود. در این پژوهش، تنش، کرنش پلاستیک، جابجایی و ضخامت به صورت خروجی میدان به عنوان نتایج تحلیل تعیین شده است.

۳-۳-۵- تعیین نوع تماس سطوح اجزا با هم

شرایط تماسی بین سطوح مختلف مسئله را می‌توان در واحد برهم‌کنش^{۱۴} تعریف کرد که در این واحد ابتدا مشخصات فیزیکی تماس‌ها و سپس نوع تماس‌ها تعریف می‌شود. مشخصات تماس بکار رفته در این پژوهش تماس سطح به سطح^{۱۵} است. در قسمت تعیین مشخصات سطوح در تماس، از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شد. ضریب اصطکاک ۰/۰۶ برای تماس سطح لوله با سنبه و قالب تعریف شده است [۳۱].

۳-۳-۶- شرایط مرزی و بارگذاری

در واحد بار^{۱۶}، شرایط مرزی و بارگذاری هر یک از اجزای قالب تعریف می‌شود. شرایط مرزی استفاده شده در این پژوهش به سه دسته قیود تقسیم می‌شوند. نوع اول قید مربوط به تقارن است که به لبه‌های لوله اعمال می‌شود. نوع دوم قید جابجایی است که برای محدود کردن درجه‌های آزادی قالب اعمال می‌شود. قید سوم مربوط به سرعت است که به سنبه نسبت داده می‌شود. در این پژوهش، سرعت ۲۰ mm/min به سنبه نسبت داده شد. با در نظر گرفتن رابطه $x=vt$ که در آن x جابجایی سنبه، v سرعت سنبه و t زمان انجام فرایند است و با توجه به جابجایی ثابت سنبه و کاهش زمان تحلیل در نرم‌افزار شبیه‌سازی، سرعت سنبه با توجه به مقیاس در نظر گرفته شده برای کاهش زمان تحلیل، افزایش یافت. یک نمونه از منحنی جابجایی

^{۱۲} Field output

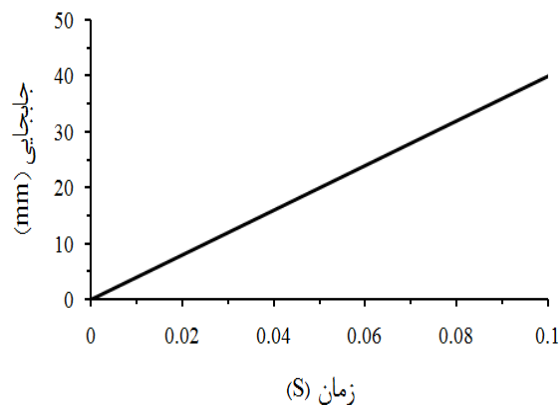
^{۱۳} History output

^{۱۴} Interaction

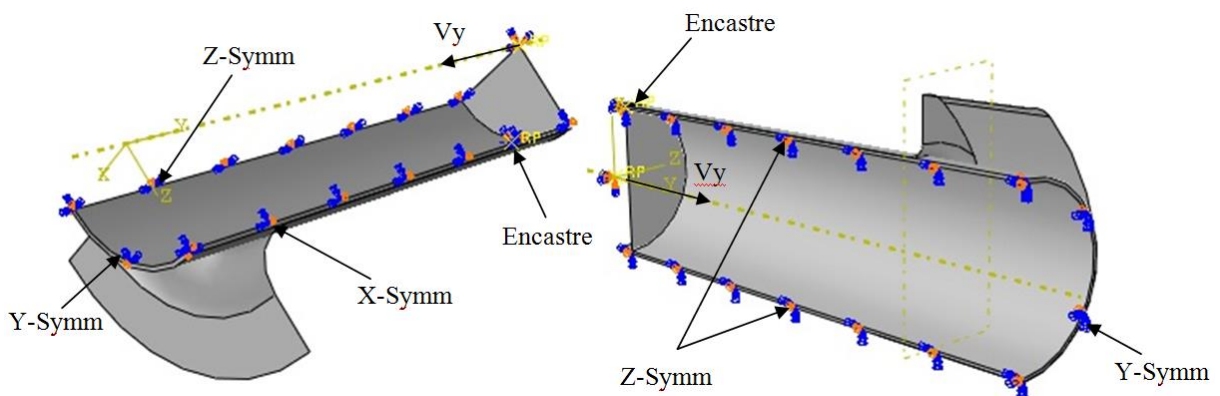
^{۱۵} Surface to surface

^{۱۶} Load

سنبه نسبت به زمان فرایند، در حالت بارگذاری با تغذیه محوری لوله، که در شبیه‌سازی اعمال شده است، در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. در شکل (۳-۵) شرایط مرزی اعمال شده بر اجزای قالب و لوله را نشان می‌دهد. بارگذاری شامل اعمال فشار به سطح داخلی لوله می‌باشد. مقدار فشار در قسمت دامنه^{۱۷} به صورت جدولی^{۱۸} که در آن مقدار فشار سیال در طول گام شکل‌دهی، با ضربی از فشار بیشینه سیال مشخص گردید، به نرم‌افزار وارد شد. منحنی فشار نسبت به زمان فرایند که در یکی از شبیه‌سازی‌های انجام شده در حالت بارگذاری با تغذیه محوری به داخل لوله اعمال شده است، در شکل (۳-۶) نشان داده شده است.



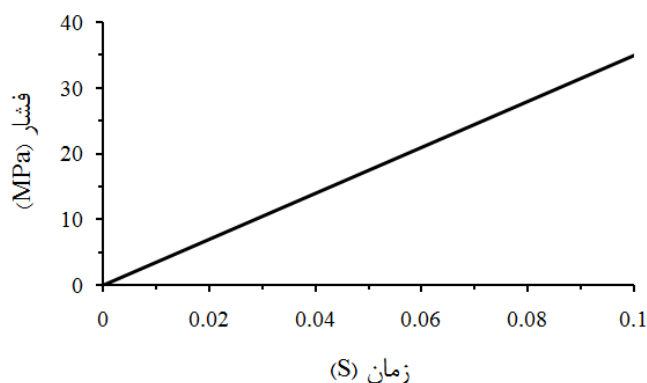
شکل (۳-۴) منحنی جابجایی - زمان سنبه در حالت بارگذاری با تغذیه محوری لوله ($R=10\text{ mm}$, $W=40\text{ mm}$, $L=40\text{ mm}$)



شکل (۳-۵) شرایط مرزی اعمال شده به ورق و قالب در شبیه‌سازی، سمت راست: قطعه بادامک، سمت چپ: انبساط‌دهی آزاد

^{۱۷} Amplitude

^{۱۸} Tabular



شکل (۶-۳) منحنی فشار- زمان در حالت بارگذاری با تغذیه محوری لوله (R=۱۰ mm, W=۴۰ mm, L=۴۰ mm)

۳-۳-۷- شبکه‌بندی

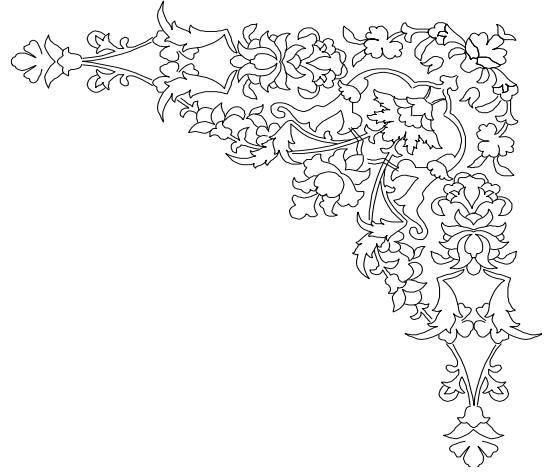
شبکه‌بندی لوله و قالب در واحد شبکه^{۱۹} انجام گرفته است. نوع المان به کار رفته باید متناسب با شرایط و نوع مسئله اجزای محدود انتخاب گردد. المان بکار رفته در مدل لوله از نوع C3D8R است که یک المان توپر هشت گره‌ای می‌باشد. برای شبکه‌بندی قالب و سنبه از المان نوع R3D4 و با شکل مستطیلی استفاده شد. یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در تحلیل المان محدود، اندازه المان‌ها می‌باشد. کاهش اندازه المان‌ها تا مقداری مشخص، دقت و زمان محاسبات را افزایش می‌دهد و استفاده از المان‌های بزرگ مانع همگرایی مسئله شده و دقت مناسب حاصل نمی‌گردد. در نرم‌افزار ABAQUS اندازه المان‌ها توسط پارامتر دانه‌بندی^{۲۰} مشخص می‌شود. هرچه مقدار دانه‌بندی کوچکتر باشد، ابعاد المان‌ها کوچکتر است. برای بدست آوردن ابعاد و تعداد بهینه المان‌ها، مدلهایی با عدد دانه‌بندی مختلف شبیه‌سازی شد و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. برای بدست آوردن اندازه بهینه دانه‌بندی، از آنالیز حساسیت مش بر اساس تابع هدف کرنش استفاده شد. همچنین اثر مقدار دانه‌بندی، بر زمان تحلیل فرایند در حالت‌های مختلف مقایسه و در نهایت با بررسی نتایج، مقدار ۱/۵ mm برای طول المان‌های لوله و تعداد ۳ المان در ضخامت لوله انتخاب شد.

^{۱۹} Mesh

^{۲۰} Seed

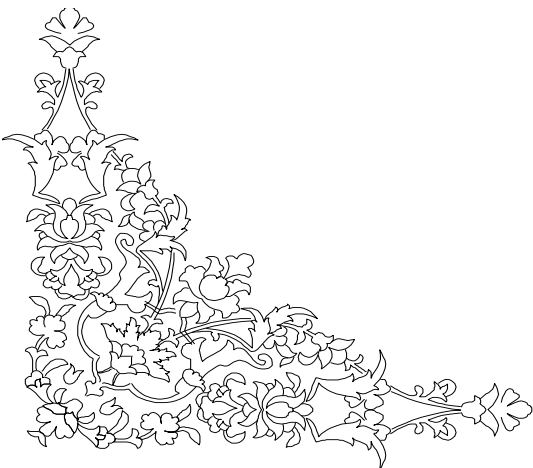
۳-۳-۸- تحلیل فرایند

در این واحد ابتدا مدل مورد نظر برای انجام تحلیل مشخص می‌شود و سپس در ادامه می‌توان مقدار حافظه مورد استفاده در رایانه و دیگر جزئیات مربوط به تحلیل را تعیین کرد. در این پژوهش، تحلیل‌ها با استفاده از یک رایانه با پردازنده دو هسته‌ای ۲/۸ گیگاهرتز انجام شده و زمان تقریبی حل برای هر شبیه‌سازی حدود ۳ ساعت بوده است.



فصل چہارم

نتایج و بحث



۴-۱- مقدمه

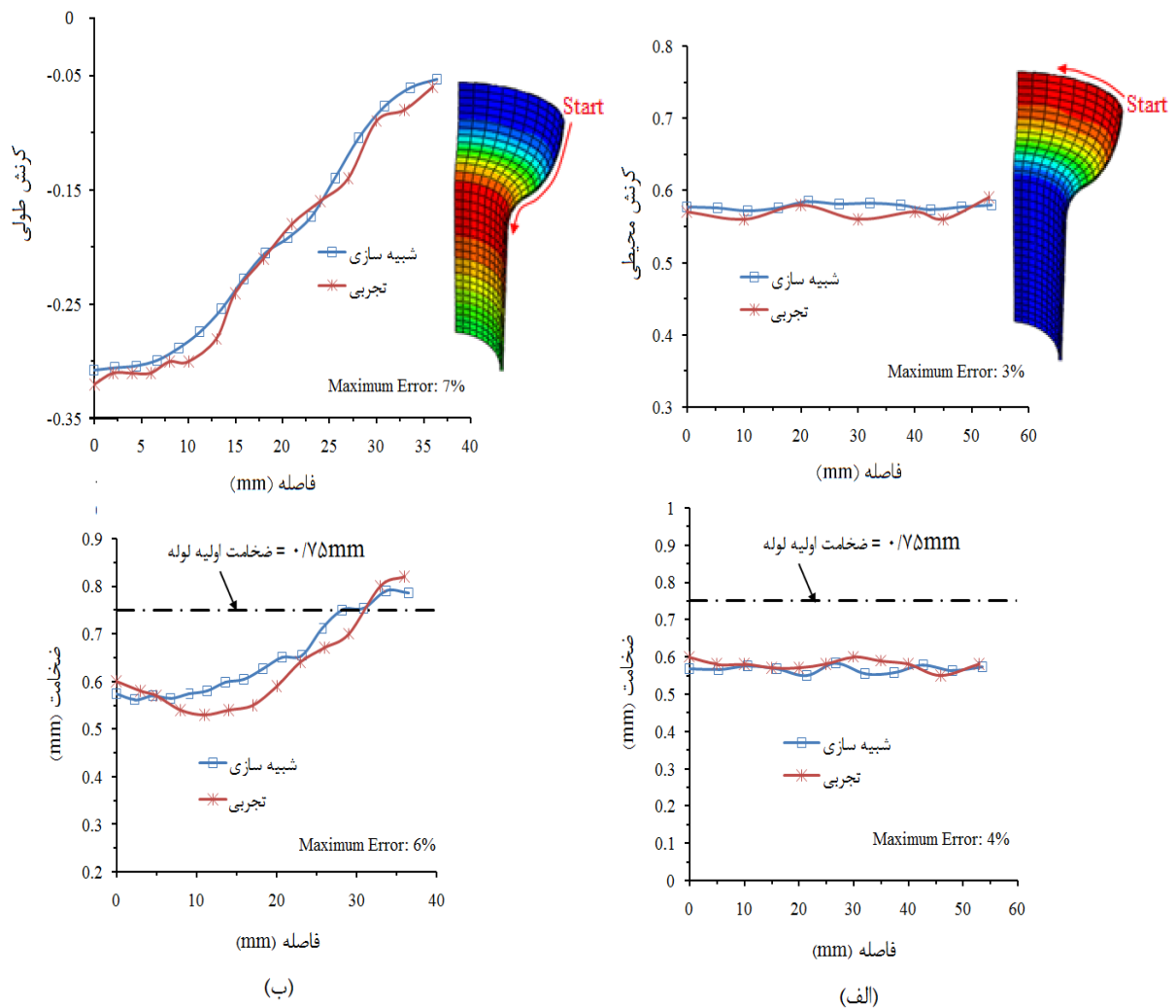
در این فصل، نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی بیان گردیده است. نخست، اثر نحوه بارگذاری (بارگذاری آزاد، بارگذاری با ثابت ماندن انتهای لوله و بارگذاری با تغذیه محوری لوله) و پارامترهای هندسی قالب (شعاع گوشه قالب و طول ناحیه تغییر شکل) و مقدار تغذیه محوری لوله در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، بر مسیر کرنش‌گذاری و ناپایداری پلاستیک ایجاد شده در لوله، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن که با انجام آزمایش‌های تجربی و اندازه‌گیری کرنش در نواحی هم‌جوار پارگی ترسیم شده است، ارائه می‌گردد. در انتها به‌منظور بررسی میزان کارآیی و دقت منحنی حد شکل‌دهی بدست آمده، از آن برای پیش‌بینی پارگی قطعه بادامک استفاده می‌گردد.

۴-۲- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی

اعتبارسنجی به نتایج شبیه‌سازی، گام مهمی در تحلیل با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود می‌باشد. در این پژوهش، به‌منظور صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، توزیع کرنش و ضخامت یک قطعه در جهت محیطی و طولی، حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی، با یکدیگر مقایسه شدند. در شکل (۴-۱) مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داده شده است. میزان خطای تحلیل عددی در مقایسه با تحلیل تجربی برای کرنش طولی ۰.۷٪، کرنش محیطی ۰.۳٪، ضخامت در طول ۰.۶٪ و ضخامت در محیط ۰.۴٪ می‌باشد. برای محاسبه درصد خطا از رابطه (۴-۱) استفاده شد. بدلیل هزینه‌بر بودن بررسی همه پارامترها از طریق آزمایش تجربی، از نتایج تحلیل اجزای محدود برای بررسی اثر پارامترهای موثر بر مسیر کرنش‌گذاری لوله استفاده شد.

$$\% Error = \left| \frac{\varphi_{FEM} - \varphi_{Exp}}{\varphi_{Exp}} \right| \times 100 \quad (4-1)$$

در این رابطه φ_{FEM} خروجی المان محدود و φ_{Exp} خروجی تحلیل تجربی است.



شکل (۴-۱) مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی، در حالت بارگذاری با تغذیه محوری،

(الف) در جهت محیطی، (ب) در جهت طولی، ($R=10\text{ mm}$, $W=40\text{ mm}$, $L=40\text{ mm}$)

۴-۳- بررسی اثر نحوه بارگذاری و پارامترهای هندسی قالب بر مسیر کرنش

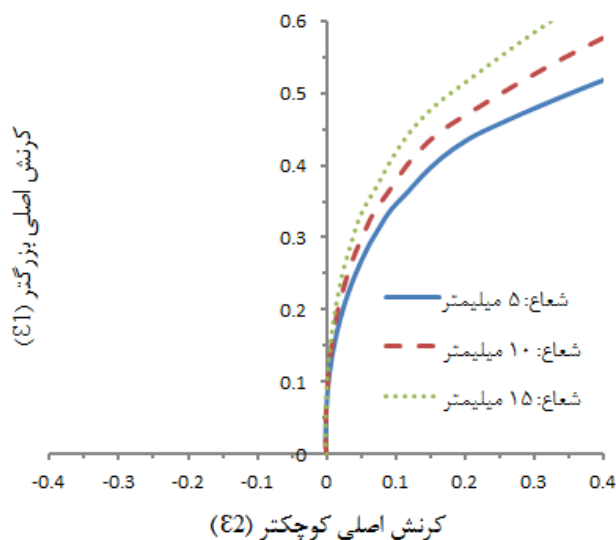
در این پژوهش، اثر سه نوع بارگذاری شامل بارگذاری آزاد، بارگذاری با ثابت ماندن انتهای لوله و بارگذاری با تغذیه محوری بر مسیر کرنش گذاری لوله، از طریق شبیه‌سازی، مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل تشابه زیاد نتایج مربوط به حالت بارگذاری آزاد و حالت بارگذاری با ثابت ماندن انتهای لوله، در این پایان‌نامه تنها نتایج مربوط به حالت بارگذاری آزاد و حالت بارگذاری با تغذیه محوری مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۴-۳-۱- بارگذاری آزاد

در این حالت از بارگذاری، پس از قرار دادن لوله در داخل قالب، سنبه‌ها از دو طرف قرار داده می‌شوند تا آب‌بندی قالب به طور کامل انجام شود. سپس با اعمال فشار داخلی، لوله در ناحیه شبکه‌بندی شده منبسط می‌شود. اعمال فشار سیال تا زمانی ادامه می‌یابد که در لوله پارگی ایجاد شود. در این حالت از بارگذاری، سنبه‌ها تغذیه محوری به لوله نمی‌دهند و تنها آب‌بندی قالب را تامین می‌کنند. به‌منظور محاسبه کرنش‌های اصلی بزرگ‌تر (ϵ_1) و کوچک‌تر (ϵ_2) و رسم مسیر کرنش‌گذاری، نقاط نزدیک به محل پارگی لوله مورد بررسی قرار گرفتند. در این پژوهش، با تغییر پارامترهای هندسی قالب در این حالت از بارگذاری، اثر آن‌ها بر مسیر کرنش‌گذاری قطعه بررسی شد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

۴-۳-۱-۱- بررسی اثر شعاع گوشه قالب (R)

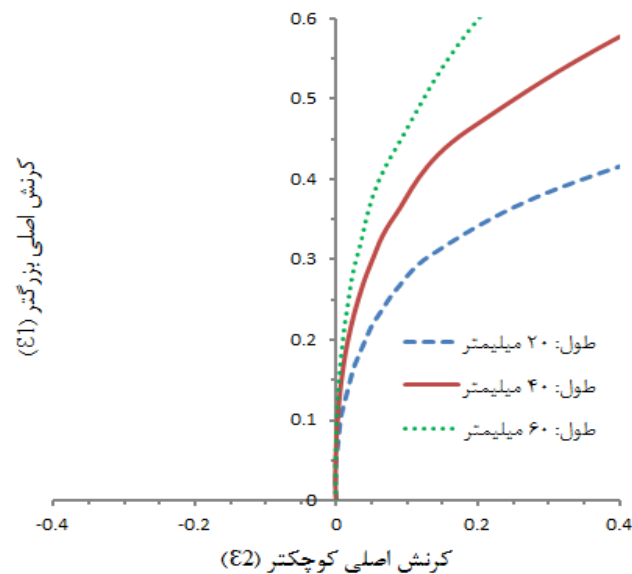
در این حالت، با ثابت نگه‌داشتن اندازه طول ناحیه تغییر شکل (W) برابر ۴۰ mm، اثر شعاع‌های گوشه مختلف قالب (۵ mm، ۱۰ mm و ۱۵ mm) بر مسیر کرنش‌گذاری لوله مورد مطالعه قرار گرفته است. مسیرهای کرنش مربوط به شعاع‌های مختلف گوشه قالب در شکل (۴-۲) نشان داده شده است. در حالت بارگذاری آزاد، با اعمال فشار داخلی به لوله و بشکه‌ای شدن آن در ناحیه تغییر شکل، کرنش‌های محیطی و طولی وارد بر المان‌های قطعه در این ناحیه کششی هستند. از این رو، در این حالت از بارگذاری، مسیرهای کرنش‌گذاری قطعه در سمت راست نمودار (کرنش‌های اصلی کوچک‌تر و بزرگ‌تر مثبت هستند) قرار می‌گیرند. کرنش طولی اعمالی به قطعه در ناحیه تغییر شکل، با جریان مواد به این ناحیه ارتباط دارد. با افزایش شعاع گوشه قالب، مواد با سهولت بیشتری به ناحیه تغییر شکل جریان می‌یابند و در نتیجه کرنش طولی وارد بر قطعه در این ناحیه کاهش می‌یابد. از طرفی، شعاع گوشه قالب تاثیر چندانی بر کرنش محیطی قطعه ندارد. لذا با افزایش شعاع گوشه قالب، مسیر کرنش‌گذاری قطعه به سمت چپ نمودار جابجا می‌شود و نسبت کرنش اصلی کوچک‌تر به بزرگ‌تر (β) کاهش می‌یابد.



شکل (۲-۴) مسیرهای کرنش مربوط به شعاع‌های گوشه مختلف قالب در حالت بارگذاری آزاد ($W=40$ mm)، بدست آمده از شبیه‌سازی

۴-۳-۱-۲- بررسی اثر طول ناحیه تغییر شکل (W)

در این حالت، با ثابت نگه داشتن اندازه شعاع گوشه قالب (R) برابر 10 mm، اثر طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل (20 mm، 40 mm و 60 mm) بر مسیر کرنش‌گذاری مورد بررسی قرار گرفته است که مسیرهای کرنش حاصل در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش طول ناحیه تغییر شکل، نسبت کرنش اصلی بزرگتر به کرنش اصلی کوچکتر (β) کاهش یافته است و مسیر کرنش قطعه به سمت چپ نمودار جابجا شده است. علت این امر آن است که با افزایش طول این ناحیه، به دلیل وجود مواد بیشتر در منطقه تغییر شکل، در یک فشار معین، تغییرات کرنش در طول نمونه کم‌تر است. از طرفی ارتفاع بشکه‌ای شدن لوله در ناحیه تغییر شکل، در یک فشار معین، کاهش یافته و کرنش محیطی وارد بر لوله نیز کاهش می‌یابد.



شکل (۳-۴) مسیرهای کرنش مربوط به طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل در حالت بارگذاری آزاد ($R=10 \text{ mm}$)، بدست آمده از شبیه‌سازی

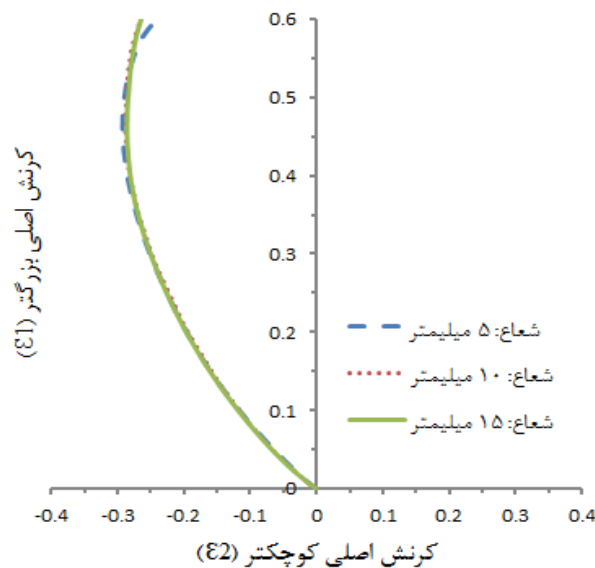
۴-۳-۲- بارگذاری با تغذیه محوری

در این حالت از بارگذاری، سنبه‌ها علاوه بر آب‌بندی قالب، نقش اعمال تغذیه محوری به لوله را نیز دارند، به‌گونه‌ای که پس از قرار گرفتن لوله در داخل قالب و انجام آب‌بندی توسط سنبه‌ها، با اعمال فشار داخلی سیال، لوله در ناحیه شبکه‌بندی شده منبسط می‌شود. سپس با اعمال تغذیه محوری، شکل‌دهی لوله تا لحظه پارگی ادامه می‌یابد. در ادامه اثر پارامترهای هندسی قالب و تغییر مقدار تغذیه محوری، بر مسیر کرنش-گذاری لوله مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۴-۳-۲-۱- بررسی اثر شعاع گوشه قالب (R)

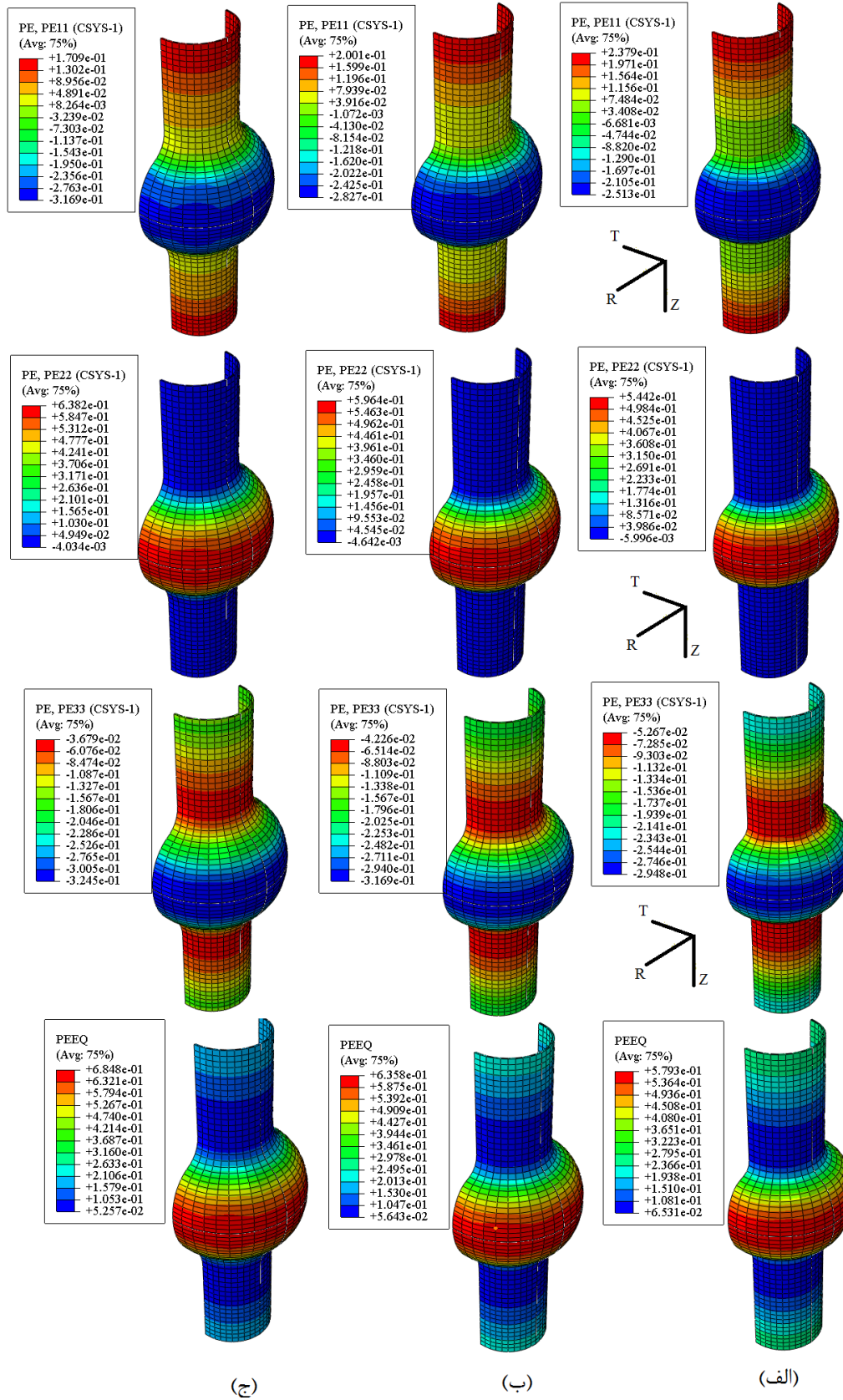
در این حالت از بارگذاری، با ثابت نگه داشتن اندازه طول ناحیه تغییر شکل (W) در 40 mm و تغذیه محوری لوله (L) برابر 40 mm ، اثر شعاع‌های گوشه مختلف قالب (5 mm ، 10 mm و 15 mm) مورد مطالعه قرار گرفته است. مسیرهای کرنش مربوط به شعاع‌های گوشه مختلف در این حالت از بارگذاری در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود، در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، به دلیل تغذیه مواد لوله به ناحیه تغییر شکل و اعمال نیروی فشاری طولی، لوله در جهت طول تحت کرنش فشاری قرار می‌گیرد. از طرفی انبساط لوله در این ناحیه منجر به ایجاد کرنش کششی در محیط لوله می‌-

شود. از این رو، مسیرهای کرنش گذاری قطعه، در سمت چپ منحنی قرار گرفته است. در شکل ملاحظه می شود که افزایش شعاع گوشه قالب در این حالت از بارگذاری، تاثیری بر مسیر کرنش گذاری قطعه ندارد. در شکل (۴-۵) کانتور مولفه های کرنش پلاستیک لوله مربوط به شعاع های گوشه مختلف قالب در فشار یکسان برابر ۳۵ MPa نشان داده شده است که در این شکل مقادیر PE_{11} ، PE_{22} ، PE_{33} و PEEQ به ترتیب مولفه های کرنش پلاستیک شعاعی، محیطی، طولی و کرنش پلاستیک موثر می باشد. در شکل ملاحظه می شود که تغییر شعاع گوشه قالب، کرنش های محیطی و طولی در ناحیه بروز پارگی تقریباً برابر است. زیرا با اعمال تغذیه محوری، تغییر شعاع گوشه قالب نقش کمتری در بهبود جریان ماده به ناحیه تغییر شکل دارد و عمده تغذیه مواد به ناحیه تغییر شکل، توسط سنبه انجام می گیرد. از این رو، در این حالت از بارگذاری، تغییر شعاع گوشه قالب بر کرنش محیطی و طولی قطعه در ناحیه تغییر شکل تاثیری ندارد.



شکل (۴-۴) مسیرهای کرنش مربوط به شعاع های گوشه مختلف قالب در حالت بارگذاری با تغذیه محوری،

($W=40\text{ mm}$, $L=40\text{ mm}$)، بدست آمده از شبیه سازی

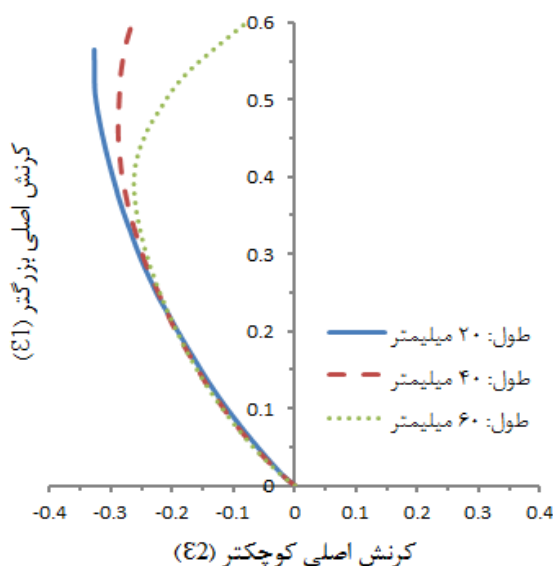


شکل (۴-۵) توزیع مولفه‌های کرنش پلاستیک در حالت بارگذاری با تغذیه محوری برای شعاع‌های گوشه مختلف قالب،

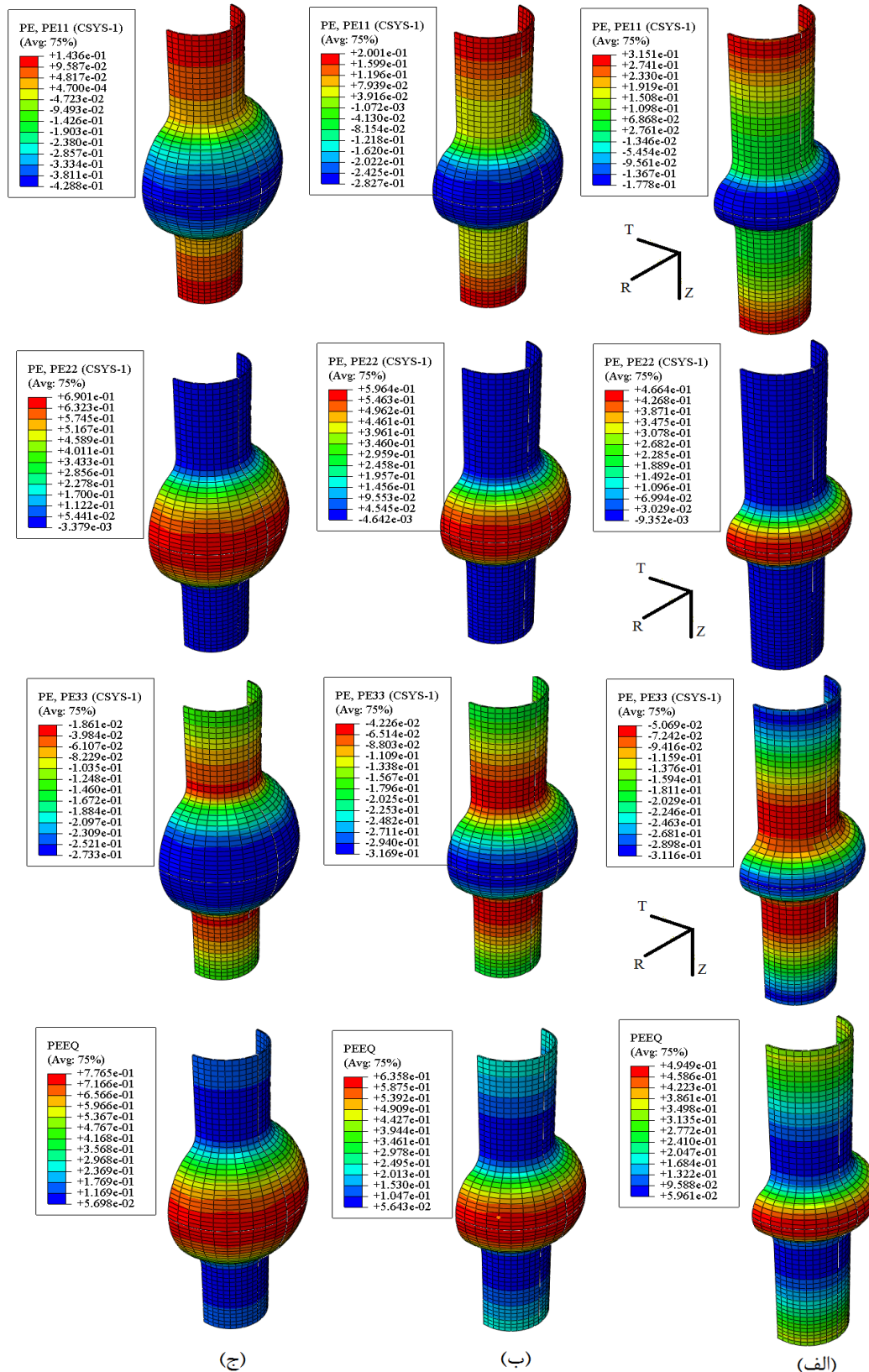
$R=15 \text{ mm}$ (ج) $R=10 \text{ mm}$ (ب) $R=5 \text{ mm}$ (الف)، $(W=40 \text{ mm}, L=40 \text{ mm})$

۴-۳-۲-۲- بررسی اثر طول ناحیه تغییر شکل (W)

به منظور مطالعه اثر طول ناحیه تغییر شکل بر مسیر کرنش گذاری قطعه، با ثابت نگه داشتن اندازه شعاع گوشه قالب (R) برابر ۱۰ mm و تغذیه محوری لوله (L) در ۴۰ mm، اثر طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل (۲۰ mm، ۴۰ mm و ۶۰ mm) مورد بررسی قرار گرفت. مسیرهای کرنش مربوط به طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل در حالت بارگذاری با تغذیه محوری لوله در شکل (۴-۶) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، با افزایش طول ناحیه تغییر شکل، نسبت کرنش اصلی بزرگ‌تر به کرنش اصلی کوچک‌تر (β) افزایش می‌یابد. با اعمال تغذیه محوری به لوله، فشار وارد بر المان‌های لوله در ناحیه تغییر شکل، با بزرگ‌تر شدن طول این ناحیه، کاهش می‌یابد. از این رو، کرنش فشاری اعمال شده به قطعه در راستای طول لوله، در حالتی که طول ناحیه تغییر شکل کمتر است، بیشتر خواهد بود. از طرفی، با افزایش طول ناحیه تغییر شکل، در یک فشار یکسان، کرنش محیطی اعمالی به قطعه نیز کمتر می‌باشد. در شکل (۴-۷) توزیع مولفه‌های کرنش پلاستیک در سیستم مختصات قطبی در طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل در فشار ۳۵ MPa نشان داده شده است.



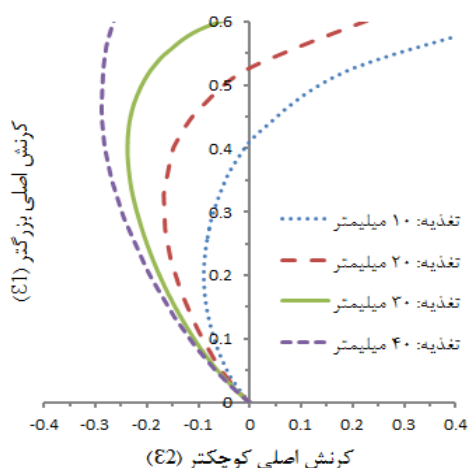
شکل (۴-۶) مسیرهای کرنش مربوط به طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل در حالت بارگذاری با تغذیه محوری لوله، (R=۱۰ mm، L=۴۰ mm)، بدست آمده از شبیه‌سازی



شکل (۴-۷) توزیع مولفه‌های کرنش پلاستیک در حالت بارگذاری با تغذیه محوری برای طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل،
 $W=60$ mm (ج)، $W=40$ mm (ب)، $W=20$ mm (الف)، $(R=10$ mm، $L=40$ mm)

۴-۳-۲-۳- بررسی اثر مقدار تغذیه محوری لوله (L)

به منظور بررسی اثر مقدار تغذیه محوری بر مسیر کرنش گذاری لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴، با شعاع گوشه قالب (R) برابر ۱۰ mm و طول منطقه تغییر شکل (W) برابر ۴۰ mm و مقادیر مختلف تغذیه لوله (۱۰ mm، ۲۰ mm، ۳۰ mm و ۴۰ mm) تحلیل و بررسی عددی صورت گرفت. اثر مقدار تغذیه محوری لوله بر مسیر کرنش گذاری قطعه در شکل (۴-۸) نشان داده شده است. با افزایش تغذیه محوری و جریان یافتن مواد به ناحیه تغییر شکل، فشار اعمالی در جهت طول لوله افزایش می‌یابد که منجر به افزایش کرنش فشاری در این جهت و کاهش نسبت کرنش (β) خواهد شد.



شکل (۴-۸) مسیرهای کرنش مربوط به مقادیر مختلف تغذیه لوله، بدست آمده از شبیه‌سازی ($R=10\text{ mm}$, $W=40\text{ mm}$)

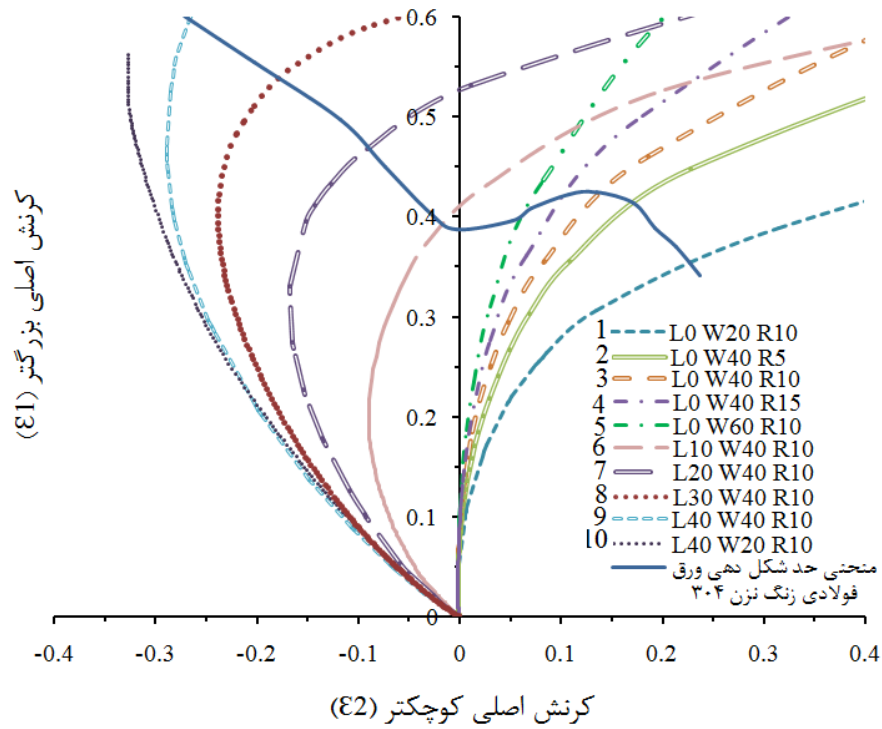
۴-۴- ترسیم منحنی حد شکل دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴

پس از انجام شبیه‌سازی و مطالعه اثر نحوه بارگذاری و پارامترهای هندسی قالب بر مسیر کرنش گذاری لوله، قالبی با ابعاد ارائه شده در پیوست ساخته شد و آزمایش‌های تجربی به منظور ترسیم منحنی حد شکل دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ انجام گردید. با توجه به نتایج بدست آمده در شبیه‌سازی‌ها، آزمایش‌هایی با تغییر در نحوه بارگذاری، شعاع گوشه قالب، طول ناحیه تغییر شکل و مقدار تغذیه محوری لوله انجام شد تا نقاط مختلفی جهت ترسیم منحنی حد شکل دهی حاصل شود. جدول (۴-۱) مشخصات حالت‌های انتخاب

شده جهت انجام آزمایش تجربی و استخراج نقاط ناپایداری پلاستیک را به همراه نسبت کرنش گلوبی پیش-بینی شده توسط شبیه‌سازی المان محدود (β^*) و بدست آمده از آزمایش تجربی را نشان می‌دهد. در شکل (۹-۴) مسیره‌های کرنش بدست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود آزمایش‌های طراحی شده بر روی منحنی FLD ورق فولادی زنگ‌زن ۳۰۴ نشان داده شده است. شکل‌دهی نمونه‌ها در آزمایشگاه تا زمانی ادامه یافت که در لوله پارگی ایجاد شود. سپس به‌منظور محاسبه نسبت کرنش اصلی بزرگ‌تر به کرنش اصلی کوچک‌تر (β)، کرنش‌ها در نزدیک‌ترین نقطه به محل پارگی اندازه‌گیری شدند. تعدادی از لوله‌های شکل داده شده در آزمایشگاه در شکل (۱۰-۴) مشاهده می‌گردد. منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌زن ۳۰۴ حاصل از این پژوهش در شکل (۱۱-۴) نشان داده شده است. در شکل (۱۲-۴) منحنی‌های حد شکل‌دهی مربوط به ورق و لوله نشان داده شده است. با توجه به منحنی حد شکل‌دهی ورق فولادی زنگ‌زن ۳۰۴ مستخرج از مرجع [۲۹] و مقایسه آن با منحنی حاصل از این پژوهش، منحنی حد شکل‌دهی لوله، پایین‌تر از منحنی مربوط به ورق قرار می‌گیرد. علت پایین‌تر بودن منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی، وجود محدودیت بیشتر در جریان یافتن ماده به ناحیه تغییر شکل و سخت‌تر بودن شرایط شکل‌دهی لوله نسبت به ورق است.

جدول (۱-۴) مشخصات حالت‌های انتخاب شده جهت انجام آزمایش‌های تجربی و نسبت کرنش گلوبی پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی (β^*) و بدست آمده از آزمایش تجربی (β)

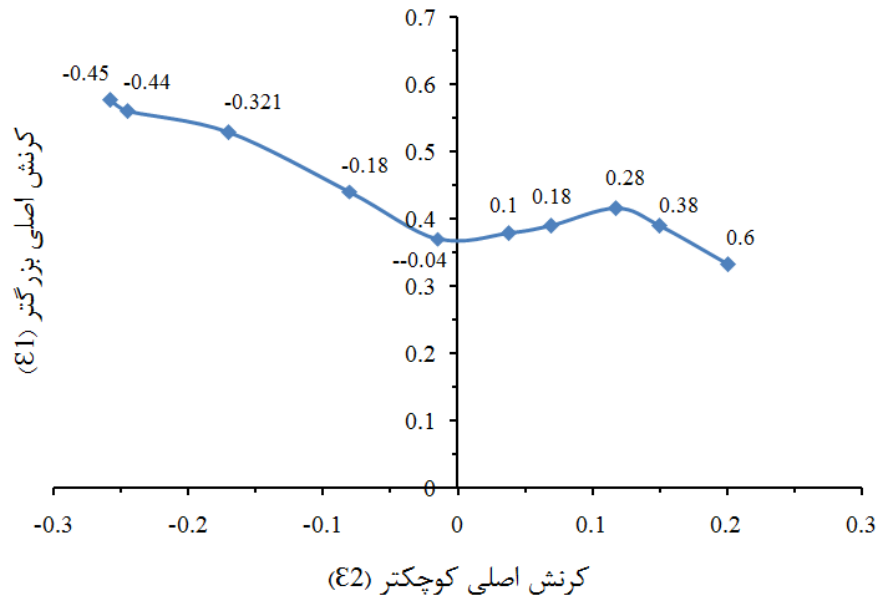
شماره آزمایش	شعاع گوشه قالب mm, (R)	مقدار تغذیه محوری mm, (L)	طول ناحیه تغییر شکل mm, (W)	β^*	β
۱	۱۰	۰	۲۰	۰/۶۹	۰/۶
۲	۵	۰	۴۰	۰/۴۱	۰/۳۸
۳	۱۰	۰	۴۰	۰/۳۲	۰/۲۸
۴	۱۵	۰	۴۰	۰/۲۲۵	۰/۱۸
۵	۱۰	۰	۶۰	۰/۱۷۴	۰/۱
۶	۱۰	۱۰	۴۰	-۰/۰۴	-۰/۰۴
۷	۱۰	۲۰	۴۰	-۰/۱۶۵	-۰/۱۸
۸	۱۰	۳۰	۴۰	-۰/۲۳۷	-۰/۳۲۱
۹	۱۰	۴۰	۲۰	-۰/۳۶۶	-۰/۴۴
۱۰	۱۰	۴۰	۴۰	-۰/۵	-۰/۴۵



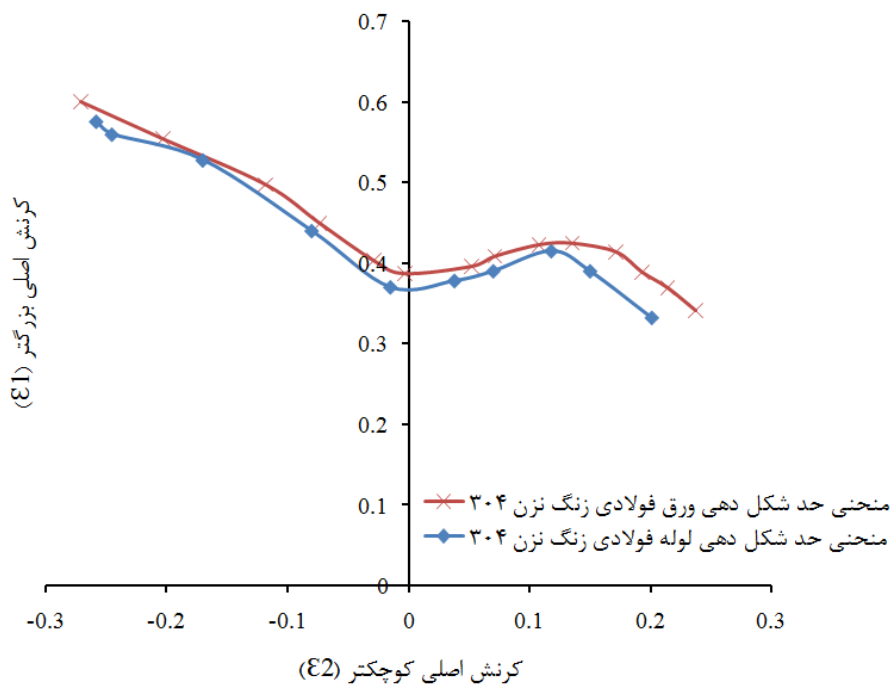
شکل (۹-۴) مسیرهای کرنش آزمایش‌های طراحی شده بر روی منحنی FLD ورق فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴، بدست آمده از شبیه‌سازی



شکل (۱۰-۴) تعدادی از لوله‌های شکل داده شده در آزمایشگاه



شکل (۴-۱۱) منحنی حد شکل دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴، حاصل از آزمایش‌های تجربی (اعداد روی نمودار بیان‌کننده نسبت کرنش β می‌باشد)

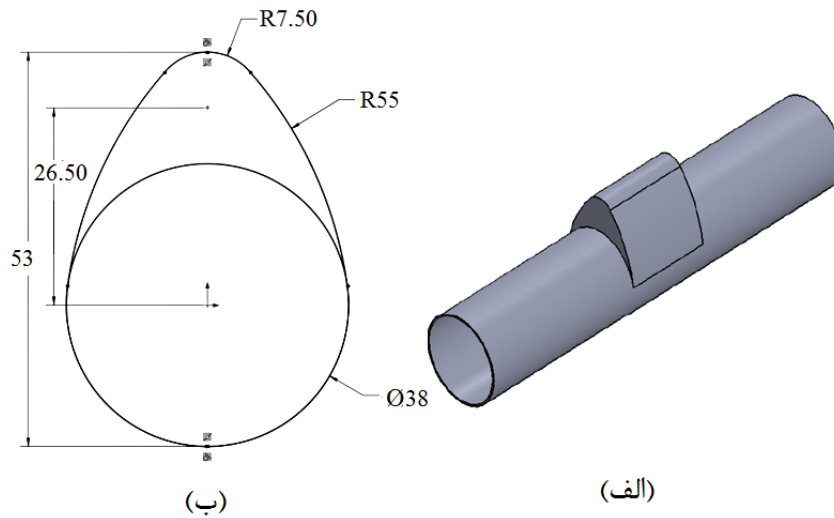


شکل (۴-۱۲) منحنی‌های حد شکل‌دهی لوله و ورق فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴

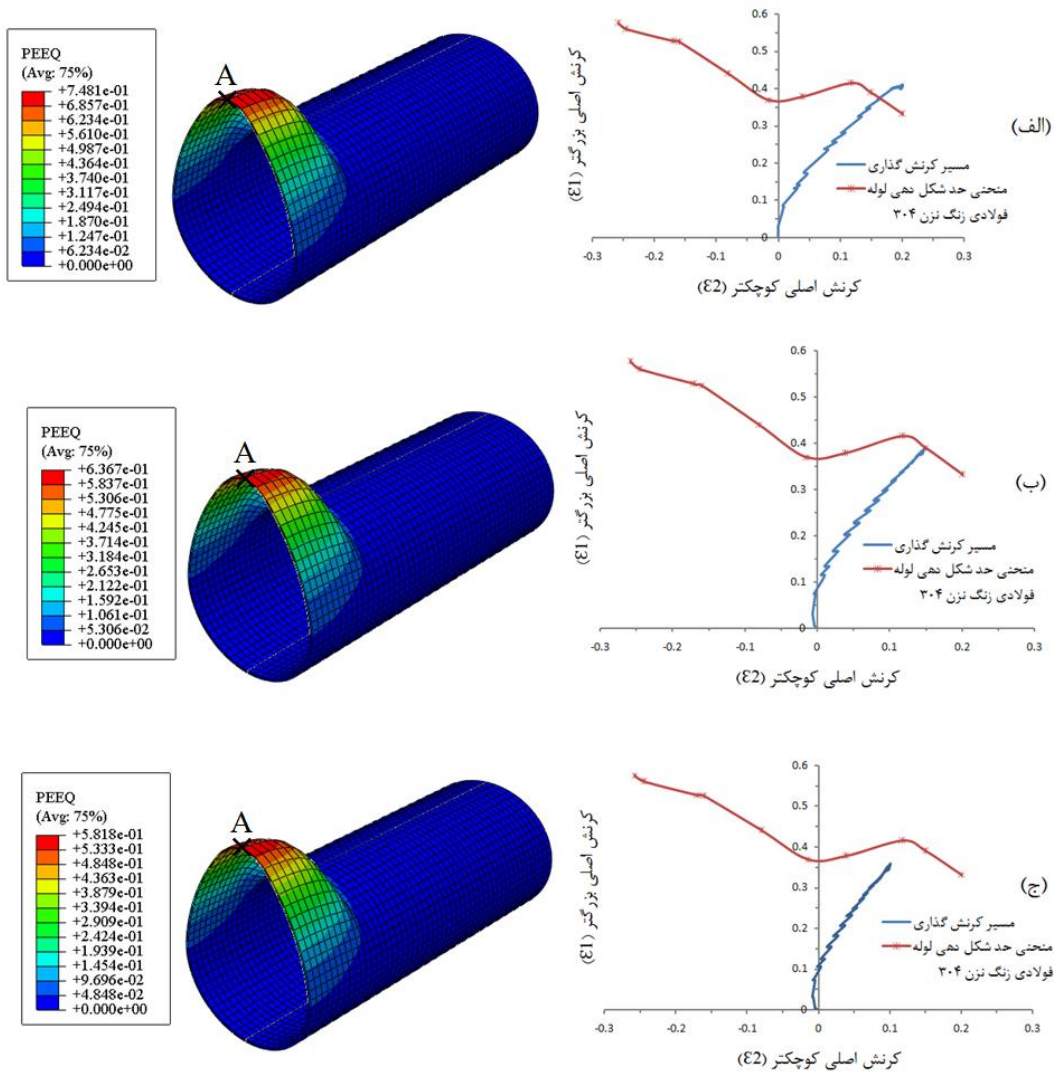
۴-۵- پیش‌بینی پارگی لوله در فرایند هیدروفرمینگ بادامک با استفاده از منحنی

حد شکل‌دهی بدست آمده از این پژوهش

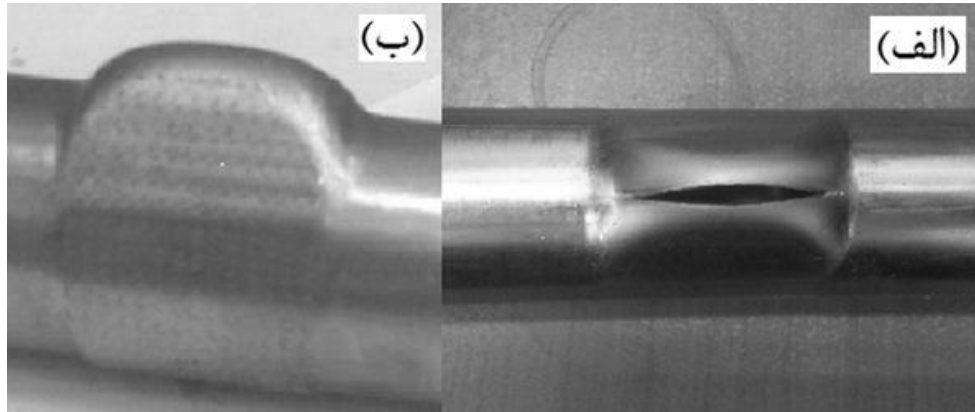
به‌منظور بررسی میزان کارایی و دقت منحنی شکل‌دهی حاصل از این پژوهش، شکل‌پذیری یک قطعه صنعتی از طریق شبیه‌سازی و آزمایش تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. قطعه صنعتی مورد بررسی و ابعاد هندسی آن در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است. به‌منظور مطالعه شکل‌پذیری قطعه مذکور، شکل‌دهی آن در دو حالت بارگذاری آزاد و بارگذاری با تغذیه محوری از طریق شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این قطعه در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است. در شکل مشاهده می‌شود که در حالت بارگذاری آزاد که تغذیه محوری به لوله اعمال نمی‌شود و در حالت بارگذاری با تغذیه محوری لوله به اندازه ۳۰ mm در قطعه پارگی در نقطه A رخ می‌دهد. ولی با اعمال تغذیه محوری به لوله به اندازه ۴۰ mm، قطعه‌ای سالم تولید شده است. در آزمایشگاه دو قطعه با شرایط بارگذاری مختلف شکل داده شدند که این قطعه‌ها در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی با یکدیگر مطابقت داشته‌اند. توزیع کرنش و ضخامت لوله بادامک شکل‌داده شده با شرایط بارگذاری با تغذیه محوری به اندازه ۴۰ mm، در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است. نتایج شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) نشان می‌دهد که منحنی FLD بدست آمده در این تحقیق پارگی لوله را در فرایند هیدروفرمینگ بادامک به درستی پیش‌بینی می‌کند. همچنین به نظر می‌رسد این منحنی معیار مناسبی برای تخمین گلوپی شدن و پارگی در قطعه‌های صنعتی مشابه که با روش هیدروفرمینگ تولید می‌شود، خواهد بود.



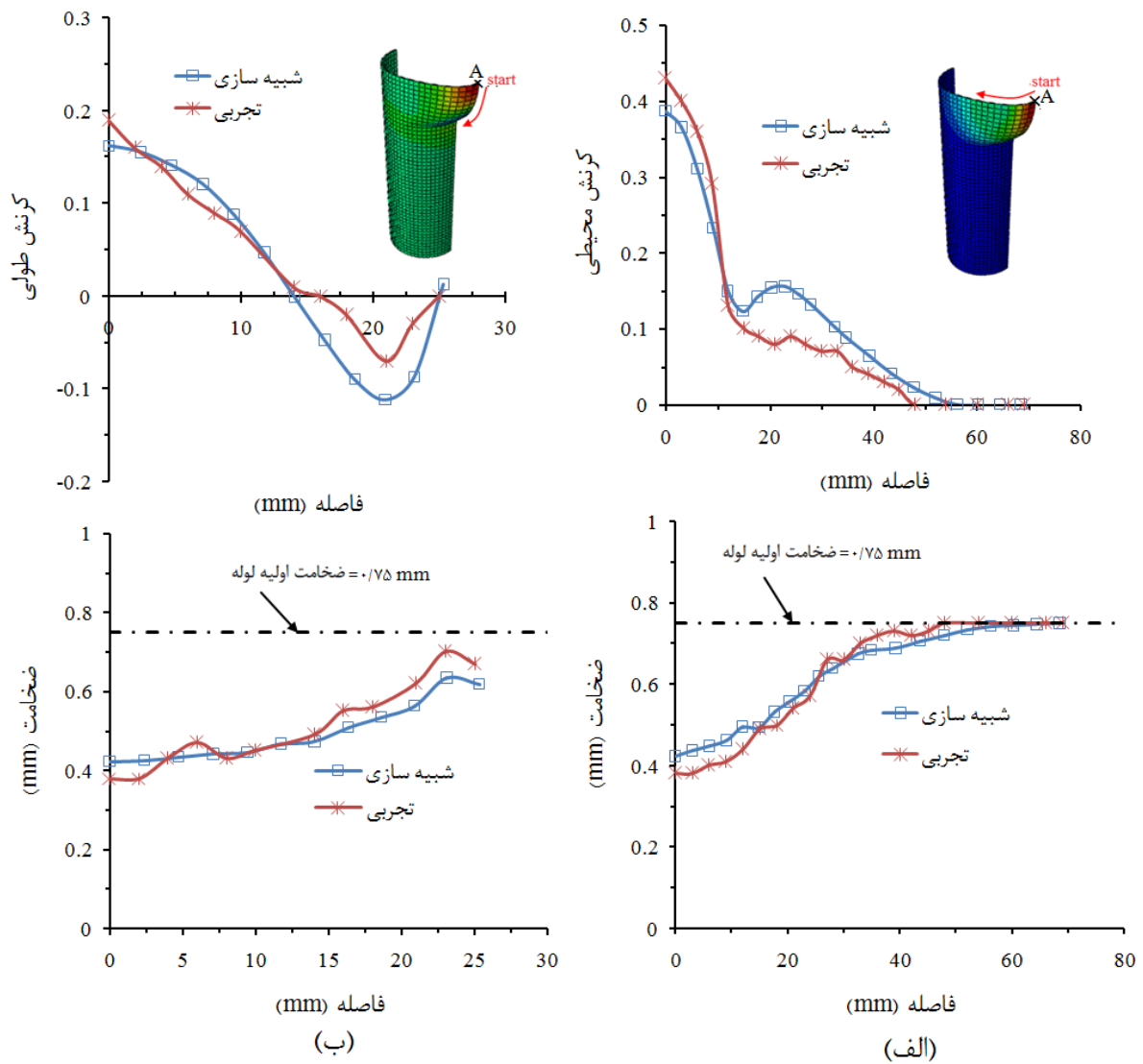
شکل (۴-۱۳) (الف) قطعه صنعتی مورد بررسی، (ب) ابعاد مقطع بادامک (بر حسب میلی‌متر)



شکل (۴-۱۴) مسیر کرنش نقطه A از قطعه، (الف) بارگذاری آزاد، (ب) بارگذاری با تغذیه محوری لوله به اندازه ۳۰ mm، (ج) بارگذاری با تغذیه محوری لوله به اندازه ۴۰ mm، حاصل از شبیه‌سازی

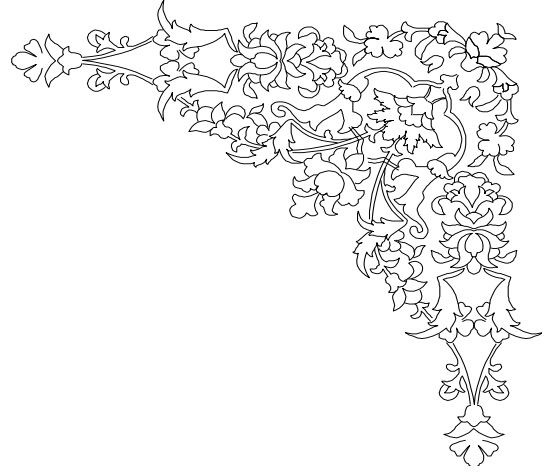


شکل (۴-۱۵) لوله‌های بادامک شکل داده شده در آزمایشگاه، (الف) بارگذاری آزاد، (ب) تولید قطعه سالم با تغذیه محوری ۴۰ mm



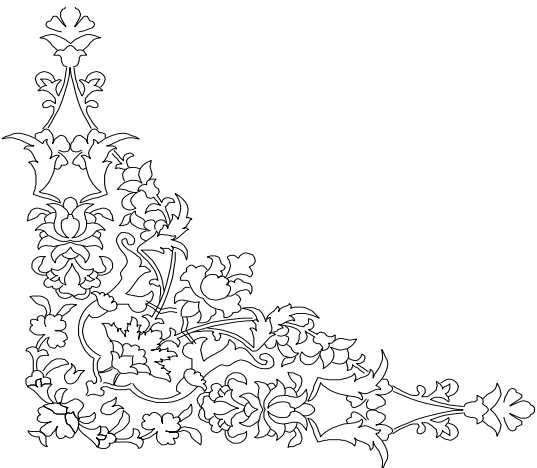
شکل (۴-۱۶) منحنی توزیع کرنش و ضخامت لوله بادامک در حالت بارگذاری با تغذیه محوری،

(الف) در جهت محیطی، (ب) در جهت طولی، $(R=10\text{ mm}, W=40\text{ mm}, L=40\text{ mm})$



فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها



۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پژوهش منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش تجربی مورد مطالعه قرار گرفت و اثر نحوه بارگذاری و هندسه قالب و همچنین مقدار تغذیه محوری لوله بر مسیر کرنش‌گذاری قطعه مورد بررسی و بحث قرار گرفت. بدین منظور از لوله‌هایی با طول ۲۰۰ mm و ضخامت ۰/۷۵ mm استفاده شد. به‌علاوه، جهت اعتبارسنجی به منحنی حاصل، شکل‌دهی یک قطعه صنعتی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از این پژوهش به طور خلاصه در زیر ارائه داده شده است:

۱- مسیر کرنش‌گذاری قطعه در دو حالت بارگذاری آزاد و بارگذاری با انتهای لوله ثابت در سمت راست منحنی FLD قرار داشته و نتایج با هم مشابه می‌باشد.

۲- با افزایش طول ناحیه تغییر شکل، مسیر کرنش‌گذاری قطعه به سمت حالت کرنش‌صفحه‌ای نزدیک می‌شود و نسبت کرنش (β) به سمت صفر میل می‌کند. این نتیجه مستقل از نحوه بارگذاری است.

۳- با افزایش شعاع گوشه قالب در حالت بارگذاری آزاد، مسیر کرنش‌گذاری به سمت حالت کرنش‌صفحه‌ای نزدیک می‌شود و نسبت کرنش (β) کاهش می‌یابد. اما در حالت بارگذاری با تغذیه محوری لوله، این پارامتر هیچ اثری بر مسیر کرنش قطعه و نسبت کرنش (β) ندارد.

۴- در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، با افزایش مقدار تغذیه لوله، نسبت کرنش (β) کاهش می‌یابد.

۵- در این پژوهش، منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ از طریق آزمایش تجربی بدست آمده است. منحنی حد شکل‌دهی حاصل برای لوله، شبیه به منحنی مربوط به ورق با همین جنس است، با این تفاوت که منحنی حد شکل‌دهی لوله اندکی پایین‌تر از منحنی حد شکل‌دهی ورق قرار می‌گیرد.

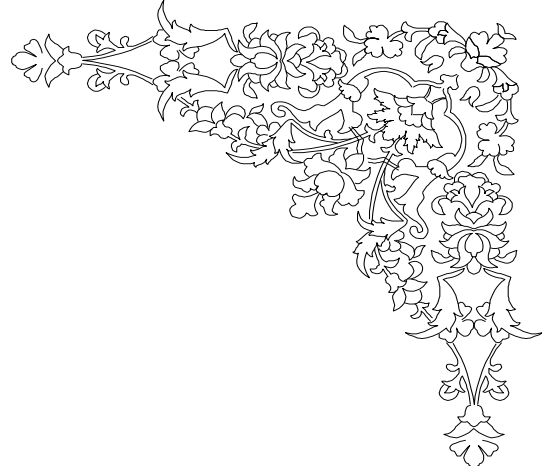
۶- نقاط سمت راست منحنی FLD با ۵ عدد تست بالجینگ آزاد و نقاط سمت چپ منحنی FLD با ۵ عدد تست بالجینگ با تغذیه محوری متفاوت قابل استخراج است. مجموعاً برای استحصال منحنی FLD لوله‌های فلزی می‌توان از ۱۰ آزمون هیدروبالجینگ لوله بر طبق ساختار طراحی شده در این پایان‌نامه بهره برد.

۷- منحنی FLD لوله بدست آمده از این پایان‌نامه با دقت خوبی توان پیش‌بینی پارگی قطعات هیدروفرم شده از لوله فلزی را دارا می‌باشد.

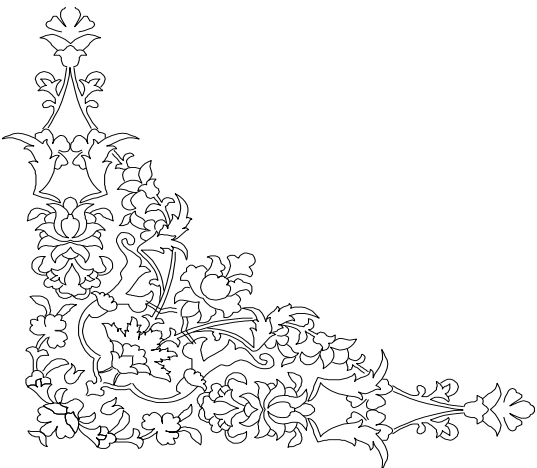
۵-۲- پیشنهادها

پس از انجام این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای انجام مطالعه‌های آینده ارائه می‌گردد:

- ۱- فرایند هیدروفرمینگ مورد بررسی در این پژوهش در دمای محیط و در حالت سرد انجام شده است. با توجه به افزایش شکل‌پذیری ماده در دماهای بالاتر، پیشنهاد می‌شود منحنی حد شکل‌دهی لوله در دمای بالا نیز مورد بررسی قرار گیرد.
- ۲- در فصل‌های قبل اشاره گردید که ماده لوله مورد استفاده در این پژوهش، همسانگرد در نظر گرفته شده است. در ادامه، پیشنهاد می‌شود منحنی حد شکل‌دهی لوله‌های ناهمسانگرد نیز مورد مطالعه قرار گیرد.
- ۳- در این پژوهش منحنی حد شکل‌دهی لوله‌های فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ بررسی شده است. پیشنهاد می‌شود که لوله با جنس‌های دیگر نیز بررسی گردد و اثر جنس، قطر و ضخامت‌های مختلف لوله بر منحنی حد شکل‌دهی آن مورد مطالعه قرار گیرد.



فهرست مراجع



- [۱] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, Manufacturing engineering and technology, *Prentice Hall*, Vol. 5, 2006.
- [۲] H. Singh, Fundamentals of Hydroforming, *Society of Manufacturing Engineers*, 2003.
- [۳] P. Groche, A. Peter, Performance of lubricants in internal high pressure forming of tubes, in *the 7th ICTP Conference*, 2002.
- [۴] M. Koç, O. N. Cora, Introduction and state of the art of hydroforming, *Hydroforming for advanced manufacturing*, pp. 93-94, 2008.
- [۵] L. H. Lang, Z. R. Wang, D. C. Kang, S. J. Yuan, S. H. Zhang, J. Danckert, K. B. Nielsen, Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, pp. 165-177, 2004 .
- [۶] www.Thefabricator.com.
- [۷] G. wilmes, Hydroforming of a steel tube, *University of Massachusetts*, 2003.
- [۸] S. H. Zhang, Developments in hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 91, pp. 236-244, 1999.
- [۹] J. Lundqvist, Numerical simulation of tube hydroforming, 2004 .
- [۱۰] P. Ray, B. J. M. Donald, Experimental study and finite element analysis of simple X and T branch tube hydroforming processes, *International Journal of Mechanical sciences*, Vol. 47, No. 10, pp. 1498-1518, 2005.
- [۱۱] C. Nikhare, M. Weiss, P. D. Hodgson, FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel, *Computational Materials Science*, Vol. 47, pp. 146-152, 2009.
- [۱۲] D. Banabic, Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits, *Springer*, 2000.
- [۱۳] ویلیام هاسفورد، رابرت کدل، شکل دادن فلزات (متالوژی و مکانیک)، مترجم: محمدرضا افضلی، دانشگاه صنعتی شریف (موسسه انتشارات علمی)، ۱۳۷۷.
- [۱۴] حامد دیلمی عضدی، تجزیه و تحلیل تئوری و تجربی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی با استفاده از معیار تسلیم غیر درجه دوم هیل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۱.
- [۱۵] سید غلامرضا قاسمی، شبیه‌سازی و مقایسه دیاگرام‌های حد شکل‌دهی کرنش و تنش به کمک روش اجزای محدود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، ۱۳۸۵.

- [۱۶] V. M. Nandedkar, K. Narasimhan, Measurement of strain history during the stretching of forming-grade steel sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 24-29, 1999.
- [۱۷] N. Asnafi, Analytical modeling of tube hydroforming, *Thin-Walled Structures*, Vol. 34, pp. 295-330, 1999.
- [۱۸] N. Asnafi, A. Skogsga, Theoretical and experimental analysis of stroke-controlled tube hydroforming, *Materials Science and Engineering A279*, pp. 95-110, 2000.
- [۱۹] G. Nefussi, A. Combescure, Coupled buckling and plastic instability for tube hydroforming, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, pp. 899-914, 2002.
- [۲۰] J. Kim, S. W. Kim, W. J. Song, B. S. Kang, Analytical approach to bursting in tube hydroforming using diffuse plastic instability, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, pp. 1535-1547, 2004.
- [۲۱] S. Boumaiza, J. P. Cordebois, M. Brunet, G. Nefussi, Analytical and numerical study on plastic instabilities for axisymmetric tube bulging, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, pp. 674-682, 2006.
- [۲۲] D. Sornin, S. Fayolle, P. O. Bouchard, E. Massoni, Plastic instabilities analysis during T-shaped tubes hydroforming process, *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, No. 2, pp. 131-144, 2009.
- [۲۳] C. Butcher, Z. Chen, A. Bardelcik, M. Worswick, Damage-based finite element modeling of tube hydroforming, *International journal of fracture*, Vol. 155, No. 1, pp. 55-65, 2009.
- [۲۴] J. Craps, Internal state variable plasticity-damage modeling of the copper T-shaped tube hydroforming process, *International Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 1726-1737, 2010.
- [۲۵] H. Y. Li, X. S. Wang, S. J. Yuan, Q. B. Miao, Z. R. Wang, Typical stress states of tube hydroforming and their distribution on the yield ellipse, *Journal of materials Processing Technology*, Vol. 151, pp. 345-349, 2004.

[۲۶] شهرام امیر عبدالهیان، مهدی گردویی، بررسی عددی ناپایداری پلاستیک در فرایند هیدروفورمینگ لوله، پنجمین کنفرانس شکل‌دهی فلزات و مواد ایران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۰.

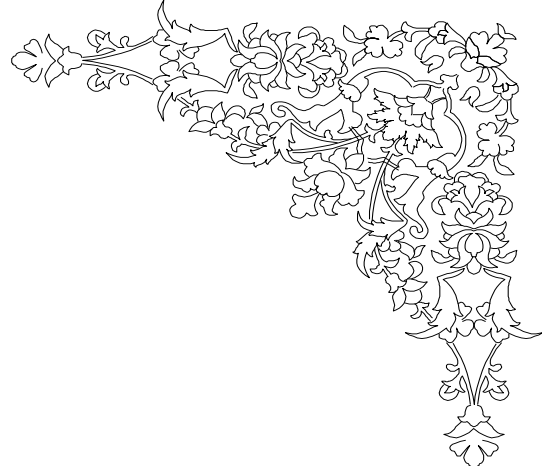
[۲۷] شهرام امیر عبدالهیان، مهدی گردویی، بررسی اثر خواص لوله ناهمسانگرد بر ترکیدگی حاصل از فشار فرایند هیدروفورمینگ، پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و جامعه علمی ریخته‌گری ایران، ۱۳۹۰.

[۲۸] بهروز باقری، محمود عباسی، مصطفی کتابچی، مرجع کاربردی نرم افزار ABAQUS، انتشارات کیان رایانه سبز، صفحات ۲۳-۲۴، ۱۳۹۱.

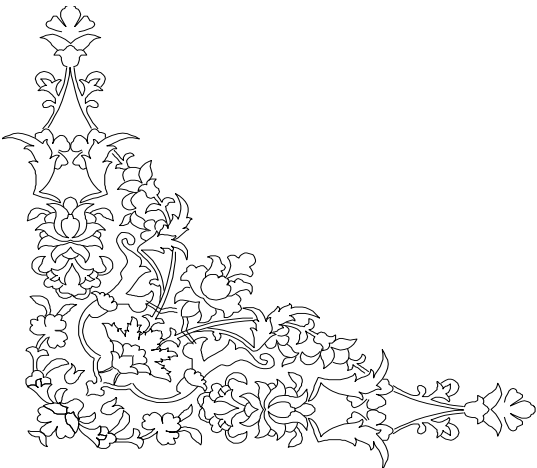
[۲۹] R. Makkouk, N. Bourgeois, J. Serri, B. Bolle, M. Martiny, M. Teaca, G. Ferron, Experimental and theoretical analysis of the limits to ductility of type 304 stainless steel sheet, *European Journal of Mechanics A/Solids* 27, pp. 181-194, 2008.

[۳۰] Abaqus version 6.11 documentation, *Abaqus Analysis User's Manual*.

[۳۱] G. Ngaile, S. Jaeger, T. Altan, Lubrication in tube hydroforming (THF) Part I. Lubrication mechanisms and development of model tests to evaluate lubricants and die coatings in the transition and expansion zones, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 108-115, 2004.

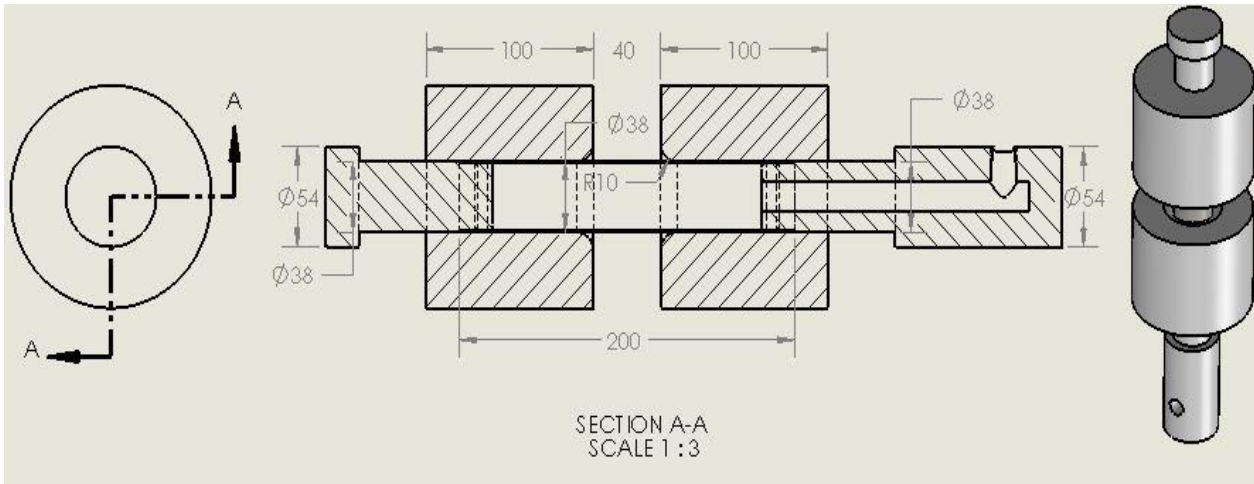


پیوست

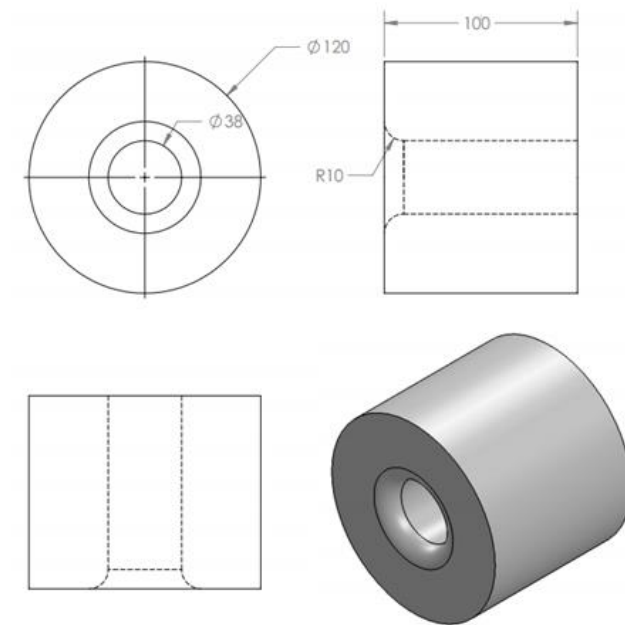


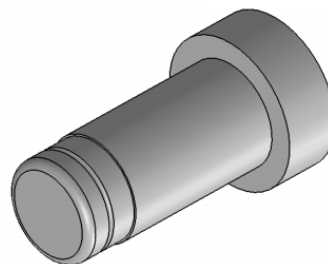
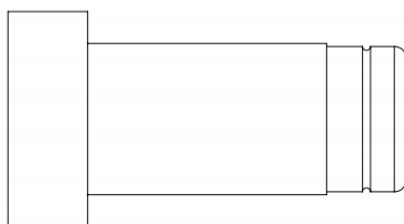
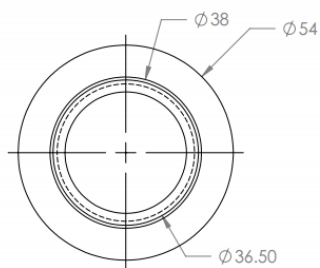
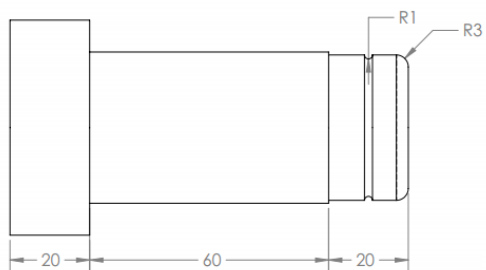
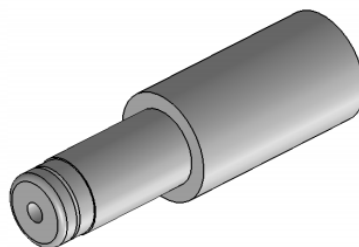
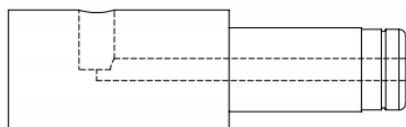
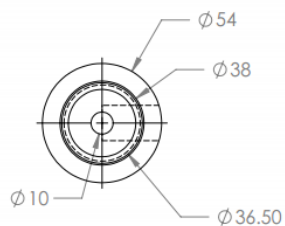
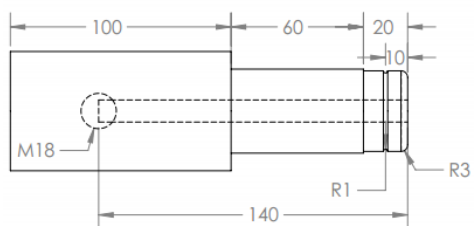
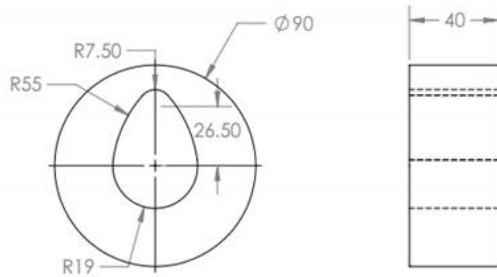
نقشه اجزای تشکیل دهنده قالب هیدروفرمینگ لوله:

۱- نقشه مونتاژی قالب



۲- نقشه اجزای قالب





Abstract

Recently, production of complex industrial products from metallic tubes with purpose of high strength to weight ratio specially in reduction of fuel consumption of transportation devices have been focused by researchers. In this case, tube hydroforming is a novel applicable method. Tearing in forming of sheet and tube metals is considered as a restricting phenomenon that is evaluated by forming limit diagram (FLD). Using FLD of conventional forming process is not appropriate for hydroforming process. Also, FLD of sheet forming process is not proper for tube hydroforming process.

In the current work, with the aim of empirical prediction of FLD of 304 stainless steel, firstly numerical investigation of hydro bulging process with various load path and die geometry has been performed on strain path and plastic instability. In order to investigate effects of load path, three types of loading condition, namely free loading, loading with axial feeding and loading with fixed tube ends have been studied. Study on geometry of dies has been performed by varying die corner radius (R) and bulging length (W). Here, effect of axial feeding on strain ratio (β) has been studied. Numerical results indicated that strain path in conditions of free loading and loading with clamps end are similar and located in the right hand side of FLD. In this condition, by increasing of W , the β tends to value of zero that this situation is independent to boundary condition. By increasing of R in free loading condition, by reduction of β the strain path is approached to plane strain state; while in loading with axial feeding condition, increasing of R has neglect able effect on strain path. In loading with axial feeding condition, increase in axial feeding the β is reduced drastically. In empirical study, from the simulated tests, number of 10 tests with distributed loading path condition was selected on strain diagram. After designing and manufacturing of the dies, meshed tubes are loaded controllably until tearing and the FLDs have been drawn using strains which were obtained near tearing locations. Also, the FLD of 304 SS tubes in current work, has been compared with FLD of SS sheets in other works.

At the end, in order to investigate efficiency and accuracy of developed method, it was used for forming of a tube cam type profile. Numerical and empirical results showed that obtained FLD can predict the forming of tube cam. Moreover, formability of this industrial part verified that obtained FLD of this work is appropriate for forming of other industrial parts.

Keywords: Tube hydroforming, FLD, FEM simulation, Empirical analysis of strain



Shahrood University
Department of Mechanical Engineering

Dissertation Submitted in Partial
Fulfillment of The Requirements For The
Degree of Master of Science in
Mechanical Engineering, Manufacturing and Production

Title

**Experimental and numerical study of formability in
metallic tubes hydroforming process**

Written by

Mehdi Falahati Naghibi

Supervisors

Dr. Mahdi Gerdooei
Dr. Mohammad Bakhshi-Jooybari

Advisor

Dr. Abdolhamid Gorji

February 2014