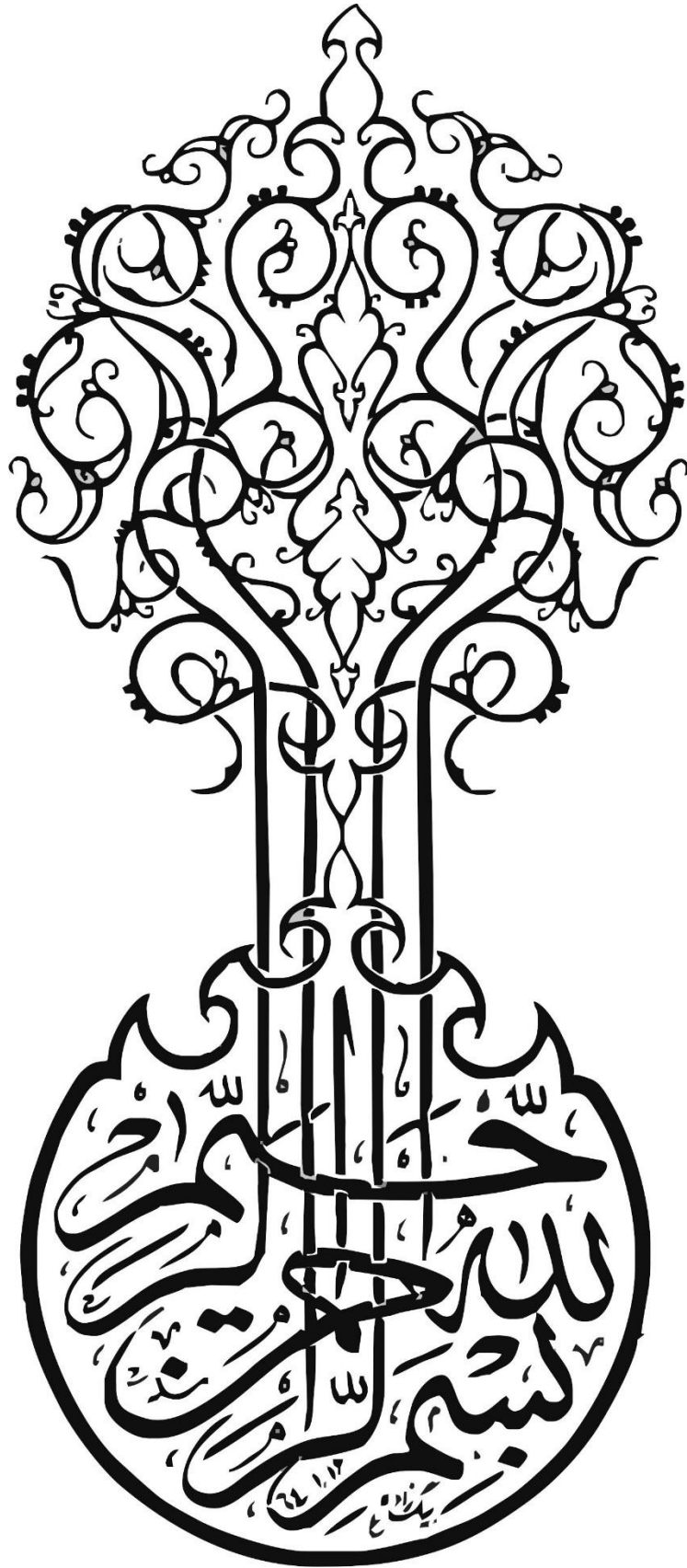






دانشگاه شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد
گرایش ساخت و تولید

عنوان
بررسی تجربی و عددی انبساط‌دهی لوله‌ی فلزی با استفاده از بالشتک
کشسان و مقایسه نتایج با روش شکل‌دهی با سیال

نگارش
حسن غفوریان نصرتی

استاد راهنما
دکتر مهدی گردویی

شهریور ۱۳۹۳

تقدیم‌نامه

تقدیم به پدر عزیز و مادر مهربانم که در یکایک گام‌های زندگی من را همراهی نموده‌اند؛ همچنین تقدیم به همسر گرامی‌ام؛ که به خاطر آن همه وقتی که برای انجام و نوشتن این پایان‌نامه از او ربودم، بر من بخشید و با تحمل و صبر خود آماده‌سازی این اثر را میسر ساخت.

سپاس‌گزاری

با تحمید ذات مقدس حضرت حق (جل جلاله) که توان انجام این پژوهش را به من عطا نمود و سلام و صلوات بر وجود پاک نبی اکرم (صلی الله علیه و آله و سلم) و اهل بیت مطهر ایشان و یگانه منجی عالم بشریت، قائم آل محمد (عج الله فرجه)؛ بر خود واجب می‌دانم تا از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر مهدی گردویی که در راستای انجام این پژوهش راهنمای اینجانب بودند، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورم. در اینجا لازم است تا از تمامی اساتید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و سایر اعضای هیئت علمی و مسئولین دانشگاه شاهرود که در دوران تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد از حضورشان بهره‌ی علمی و معنوی بردم تشکر نمایم. در پایان از جناب آقای دکتر مجتبی قطعی، جناب آقای دکتر قادری، مهندس فرید سالاری، مهندس سجاد ایزدپناه، مهندس امید ارجمند و تمامی افرادی که در طی انجام این پژوهش اینجانب را صمیمانه همراهی و یاری نمودند، کمال سپاس‌گزاری را دارم.

تعهدنامه

اینجانب حسن غفوریان نصرتی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشگاه شاهرود، نویسنده پایان نامه با عنوان بررسی عددی و تجربی انبساطدهی لوله‌ی فلزی با استفاده از بالشتک کشسان و مقایسه نتایج با روش شکل‌دهی با سیال، تحت راهنمایی دکتر مهدی گردویی متعهد می‌شوم؛

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های دیگر پژوهش‌گران، به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب این پایان نامه، تا کنون توسط خود، یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارایه نشده است.
- حقوق معنوی این اثر، به دانشگاه شاهرود متعلق دارد، و مقالات مستخرج با نام "دانشگاه شاهرود" یا "*Shahrood University*" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمامی افرادی که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در تمام مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته (یا استفاده) شده است، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

مالکیت نتایج و حق نشر

- تمامی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه-ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی، در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این پایان نامه بدون ذکر منبع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در سال‌های اخیر افزایش رقابت در صنایع خودروسازی، صنایع هوافضا و تسلیحاتی سبب شده است تا این مراکز به سمت تولید تجهیزات سبک، با مصرف سوخت کم و سازه‌های مستحکم سوق داده شود. در این راستا ساخت قطعات یکپارچه‌ی توخالی با هندسه‌ی پیچیده از ورق و لوله، با استفاده از روش‌های شکل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به شکل‌دهی با بالشتک کشسان و شکل‌دهی با سیال اشاره کرد که به علت انعطاف‌پذیری بالا در تولید قطعات پیچیده، کیفیت سطح مطلوب و هزینه‌ی پایین ساخت قالب؛ به علت استفاده از یک نیمه‌ی صلب ابزار؛ گوی سبقت را از دیگر روش‌های سنتی ربوده است.

در این پژوهش تحلیل عددی و تجربی فرایند انبساط‌دهی لوله درزدار فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴، با استفاده از بالشتک کشسان از جنس پلی‌اورتان انجام شد. نخست با هدف اطمینان خاطر از طراحی قالب شکل‌دهی با بالشتک کشسان، به تحلیل تنش اجزاء قالب -به صورت سه‌بعدی و شکل‌پذیر- پرداخته شد. به منظور استخراج ضریب نقص لوله و ثوابت شکست آن، مدل‌سازی فرایند هیدروبالجینگ لوله درزدار با مدل شکست نرم پیشرونده از نوع منحنی حد شکل‌دهی تا آستانه ترکیدگی انجام و ضمن مقایسه با نتایج آزمون تجربی دیگر مراجع، مورد مطالعه قرار گرفت. با هدف تشخیص میزان تاثیرگذاری عوامل ذاتی و محیطی بر روی فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان از تلفیق روش المان محدود و روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده شد. در این بخش اثر هفت عامل ضریب اصطکاک بین قالب و لوله، ضریب اصطکاک بین لاستیک و لوله، سختی و طول لاستیک، شعاع گوشه قالب، طول ناحیه تغییرشکل و پیشروی محوری لوله، بر روی عمق متوسط انبساط‌دهی، اختلاف عمق، تعداد چین، یکنواختی توزیع ضخامت و کرنش ضخامتی مورد مطالعه قرار گرفت. مدل‌سازی سه بعدی فرایند انبساط‌دهی لوله درزدار به کمک بالشتک کشسان تحت شرایط روانکاری مختلف نیز در مرحله پایانی شبیه‌سازی انجام شد. نتایج عددی از تاثیر قابل توجه سیستم روانکار مورد استفاده خصوصاً بین لاستیک و لوله در موفقیت فرایند حکایت دارد.

در بخش تجربی از این تحقیق، آزمون فشار لاستیک بر اساس استاندارد ASTM D575-91 انجام و منحنی تنش-کرنش و ثوابت معادله ساختاری مونی-ریولین پلی‌اورتان تعیین شد. شکل‌دهی لوله‌های مدرج شده فولادی، با استفاده از بالشتک کشسان در شرایط مختلف روانکاری تا رسیدن به آستانه پارگی

انجام؛ توزیع کرنش‌های طولی، محیطی و ضخامتی بدست آمد. مقایسه حالت کرنش‌های بدست آمده از این قطعات در ناحیه سالم با منحنی حد شکل‌دهی لوله از روش هیدروفرمینگ، افزایش شکل‌پذیری در فرایند شکل‌دهی با لاستیک را نشان می‌دهد. نتایج تجربی نشان داد، قطعات سالم بدون چین‌خوردگی با استفاده از روانکار نایلون بین لاستیک و لوله و روانکار روغن کشش بین لوله و قالب شکل داده می‌شود. در انبساط‌دهی آزاد لوله با بالشتک کشسان به علت افزایش فشار هیدروستاتیکی و همچنین تغذیه محوری ناخواسته از شرایط اصطکاکی بین لاستیک و لوله، که موجب انحراف مسیر کرنش به سمت چپ منحنی حد شکل‌دهی (حالت فشار-کشش) می‌گردد؛ بهبود شکل‌پذیری و افزایش عمق بالچ مشاهده خواهد شد.

در مرحله نهائی به منظور بررسی کارائی و دقت تحلیل، در یک مطالعه موردی، مدل‌سازی عددی و ساخت تجربی قطعه بادامک از لوله فولادی به روش شکل‌دهی با لاستیک انجام شد. در نهایت قطعه بادامک با موفقیت ساخته، نتایج این قسمت نیز با روش هیدروفرمینگ مقایسه شد.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی اجزای محدود، شکل‌دهی با بالشتک کشسان، هیدروبالجینگ، نمودار حد شکل‌دهی، انبساط‌دهی لوله درزدار.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- غفوریان نصرتی، ح؛ قادری س. ه؛ مدل سازی رایانه ای فرایند انبساط دهی آزاد لوله با کمک بالشتک کشسان- اثر اصطکاک و شکل پذیری لوله؛ ۱۳۹۲؛ کنفرانس سراسری مهندسی مکانیک ایران؛ پذیرش شده.

۲- غفوریان نصرتی، ح؛ گردویی، م؛ فلاحتی نقیبی، م؛ ارائه ی یک روش نوین جهت تعیین ثوابت معیار شکست نرم لوله ی درزدار فلزی به کمک فرایند هیدروبالجینگ؛ مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه ها و شاره ها؛ تحت داوری.

فهرست عنوان‌ها

چکیده.....	ت
تقدیم‌نامه.....	ت
سپاس‌گزاری.....	ث
فهرست عنوان‌ها.....	د
فهرست شکل‌ها.....	س
فهرست جدول‌ها.....	ط
فهرست نشانه‌ها.....	ظ
فصل ۱ مقدمه.....	۱
۱-۱ معرفی فرایندهای شکل‌دهی فلزات.....	۲
۲-۱ شکل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر.....	۳
۱-۲-۱ فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان.....	۴
۲-۲-۱ فرایند هیدروفرمینگ.....	۵
۳-۱ پنجره شکل‌دهی.....	۷
۴-۱ پیشینه تحقیق.....	۹
۵-۱ اهداف و ویژگی‌های پایان‌نامه.....	۱۱
۶-۱ معرفی فصول آتی پایان‌نامه.....	۱۲
فصل ۲ معرفی فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان.....	۱۳
۱-۲ فرایند گوارین.....	۱۳
۲-۲ فرایند مارفورم.....	۱۵
۳-۲ فرایند ورسون- ویلون.....	۱۶
۴-۲ فرایند دیمارست.....	۱۷
۵-۲ فرایند ماسلنیکو.....	۱۸
۶-۲ فرایند شکل‌دهی با چکش سقوطی.....	۱۸
۷-۲ محدودیت‌ها و مزایای فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان.....	۱۸
۸-۲ الاستومرها.....	۱۹
۸-۱-۲ مفهوم اولیه‌ی کائوچو.....	۲۰

۲-۸-۲	مفهوم اولیه‌ی لاستیک و الاستومر.....	۲۱
۲-۸-۳	الاستومرهای مورد استفاده در فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان [۴].....	۲۴
۲-۹-۲	مدل‌های ریاضی رفتار الاستومر [۴].....	۲۷
۲-۹-۱	معادله رفتاری مونی-ریولین و نحوه تعیین ثوابت آن.....	۳۰
فصل ۳ مواد و روش تحقیق عددی و تجربی.....		
۳-۱	روش المان محدود.....	۳۴
۳-۱-۱	معرفی حلگر صریح نرم‌افزار آباکوس.....	۳۴
۳-۱-۲	مدل‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق.....	۳۵
۳-۱-۳	مدل‌سازی سری اول: تحلیل تنش سه‌بعدی اجزای قالب انبساط‌دهی با بالشتک کشسان به روش المان محدود.....	۳۶
۳-۱-۴	مدل‌سازی سری دوم: محاسبه خواص شکست لوله به کمک مدل‌سازی هیدروبالجینگ لوله درزدار.....	۴۰
۳-۱-۵	مدل‌سازی سری سوم: تحلیل اثر فاکتورهای فرایند RPF بر متغیرهای محصول به روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی.....	۴۵
۳-۱-۶	تحلیل فرایند بالجینگ لوله فولادی درزدار در قالب انبساط‌دهی آزاد و بادامک.....	۵۲
۳-۲	روش تجربی.....	۵۵
۳-۲-۱	معرفی تجهیزات آزمایشگاهی.....	۵۵
فصل ۴ ارائه نتایج و بحث.....		
۴-۱	ارائه‌ی نتایج آزمون تعیین خواص مکانیکی.....	۶۳
۴-۱-۱	آزمون فشار لاستیک و ثوابت جنس لاستیک.....	۶۳
۴-۲	نتایج تحلیل عددی.....	۶۵
۴-۲-۱	تنش اجزای قالب در فرایند RPF	۶۵
۴-۲-۲	شکست و خواص ناحیه درز لوله در فرایند HF	۶۵
۴-۲-۳	اثر پارامترهای فرایند RPF به روش تاگوچی.....	۷۰
۴-۲-۴	فرایند انبساط‌دهی لوله فولادی درزدار با روش RPF	۸۱
۴-۲-۵	مقایسه نتایج عددی فرایند انبساط‌دهی لوله با لاستیک با فرایند هیدروبالجینگ.....	۸۴
۴-۳	نتایج تجربی انبساط‌دهی لوله با روش RPF و صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی.....	۸۶
۴-۳-۱	انبساط‌دهی آزاد لوله با روش RPF	۸۸
۴-۳-۲	انبساط‌دهی میل‌بادامک با روش RPF و مقایسه با نتایج HF	۹۳
فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....		
۵-۱	نتیجه‌گیری.....	۹۶

۹۶	۱-۱-۵ نتایج فعالیت‌های اولیه.....
۹۷	۲-۱-۵ نتایج مدل‌سازی سری دوم: تحلیل شکست لوله درزدار در فرایند هیدروفرمینگ.....
۹۷	۳-۱-۵ نتایج مدل‌سازی سری سوم: تحلیل اثر فاکتورهای فرایند RPF بر متغیرهای محصول به روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی.....
۹۸	۴-۱-۵ مدل‌سازی سری چهارم: تحلیل فرایند بالجینگ لوله فولادی درزدار در قالب انبساط‌دهی آزاد و اعتبارسنجی نتایج با آزمون‌های تجربی.....
۹۹	۵-۱-۵ مدل‌سازی سری پنجم: تحلیل فرایند انبساط‌دهی میل‌بادامک و اعتبارسنجی نتایج با آزمون‌های تجربی.....
۹۹	۶-۱-۵ نتایج مقایسه دو فرایند RPF و HF
۱۰۰	۲-۵ پیشنهادها.....
۱۰۲	منبع‌ها.....
۱۰۴	پیوست.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: کاربردهای مختلف شکل‌دهی با بالشتک کشسان به صورت شماتیک [۴] ۴
- شکل ۲-۱: شماتیک فرایند هیدروفرمینگ ورق ۶
- شکل ۳-۱: شماتیک فرایند هیدروفرمینگ لوله ۶
- شکل ۴-۱: مناطق مختلف دیاگرام حد شکل‌دهی [۱۰] ۸
- شکل ۱-۲: شماتیک فرایند گوارین [۴] ۱۴
- شکل ۲-۲: ابزارهای کمکی مورد استفاده در فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان [۴] ۱۵
- شکل ۳-۲: شماتیک فرایند مارفورم [۴] ۱۶
- شکل ۴-۲: شماتیک فرایند ورسون- ویلون [۴] ۱۶
- شکل ۵-۲: شکل‌دهی قسمتی از مخزن سوخت هواپیما به وسیله فرایند دیمارست [۴] ۱۷
- شکل ۶-۲: شماتیک فرایند ماسلنیکو ۱۸
- شکل ۷-۲: اتصالات عرضی در کائوچو [۲۰] ۲۱
- شکل ۸-۲: وابستگی مدول الاستیک و درجه حرارت در الاستومرها، پلاستومرها، دورومر و الاستومرهای ترموپلاستیک [۲۰] ۲۲
- شکل ۹-۲: مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش الاستومرهای مختلف [۴] ۲۵
- شکل ۱۰-۲: مقایسه رفتار تنش- کرنش پلی‌اورتان تحت فشار با ضرایب شکل متفاوت ۲۶
- شکل ۱۱-۲: شماتیک یک استوانه تحت فشار ۳۱
- شکل ۱-۳: هندسه و نحوی استقرار اجزای قالب ۳۷
- شکل ۲-۳: منحنی تنش- کرنش لوله فولادی [۲۳] ۳۸
- شکل ۳-۳: شماتیک فرایند بالچینگ لوله ۴۰
- شکل ۴-۳: مجموعه قالب و لوله به صورت سه‌بعدی ۴۱
- شکل ۵-۳: نمودار حد شکل‌دهی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ [۲۳] ۴۱
- شکل ۶-۳: نمودار حد شکل‌دهی ۴۲

- شکل ۷-۳: تعریف خواص مکانیکی ناحیه نقص و ناحیه سالم ۴۳
- شکل ۸-۳: پرس هیدرولیکی و اجزای قالب هیدروفرمینگ ۴۴
- شکل ۹-۳: دیاگرام بلوکی یک فرایند ۴۶
- شکل ۱۰-۳: ابعاد و نحوه چیدمان اجزا در شبیه‌سازی سری سوّم (ابعاد بر حسب میلی‌متر) ۴۹
- شکل ۱۱-۳: تغییر شکل ایجاد شده در لوله به صورت شماتیک ۵۰
- شکل ۱۲-۳: هندسه اجزای قالب و لوله در نرم‌افزار شبیه‌سازی؛ همچنین ابعاد مقطع بادامک ۵۲
- شکل ۱۳-۳: مونتاژ اجزای قالب و لوله در شبیه‌سازی، سمت راست: قطعه بادامک، سمت چپ: انبساط دهی آزاد ۵۳
- شکل ۱۴-۳: شرایط مرزی اعمال شده به ورق و قالب در شبیه‌سازی ۵۴
- شکل ۱۵-۳: مقایسه انرژی جنبشی ایجاد شده با انرژی کل در شبیه‌سازی فرایند RPF ۵۵
- شکل ۱۶-۳: دستگاه پرس هیدرولیکی ۱۰۰ تن زاو آریا ۵۶
- شکل ۱۷-۳: مجموعه قالب، سمت چپ: شماتیک قالب، سمت راست: قالب مورد استفاده ۵۷
- شکل ۱۸-۳: اجزای قالب انبساط‌دهی ۵۷
- شکل ۱۹-۳: مراحل شبکه‌بندی لوله فولادی ۵۸
- شکل ۲۰-۳: لوله شبکه‌بندی شده و لاستیک مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی ۵۹
- شکل ۲۱-۳: نوار مایلر برای اندازه‌گیری کرنش‌های حدی [۲۹] ۶۰
- شکل ۲۲-۳: تجهیزات اندازه‌گیری: (الف) ضخامت‌سنج مکانیکی (ب) کولیس دیجیتالی (ج) سختی سنج لاستیک ۶۰
- شکل ۱-۴: منحنی تنش-کرنش فشاری لاستیک ۶۴
- شکل ۳-۴: منحنی B بر حسب λ^{-1} ۶۴
- شکل ۴-۴: توزیع تنش موثر ون-میسز در اجزای قالب انبساط‌دهی بر حسب مگاپاسکال ۶۵
- شکل ۵-۴: توزیع کرنش موثر پلاستیک با افزایش فشار در مدل اولیه (بدون لحاظ شدن پارامتر رشد آسیب) $f = 0.9$ ۶۶

- شکل ۴-۶: تاریخچه کرنش بر روی نوار درز در صفحه کرنش (در مدل اولیه بدون لحاظ شدن پارامتر رشد آسیب)..... ۶۷
- شکل ۴-۷: اثر ضریب ناهمگنی لوله بر فشار بحرانی..... ۶۷
- شکل ۴-۸: اثر پارامتر جابه‌جایی پلاستیک موثر بر لحظه ایجاد شکست..... ۶۸
- شکل ۴-۹: تاریخچه کرنش نقطه بحرانی بر روی دیاگرام کرنش..... ۶۹
- شکل ۴-۱۰: اثر متغیر جابه‌جایی پلاستیک موثر بر قطر بیشینه بالچینگ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۱: مقایسه ترکیدگی لوله در شبیه‌سازی و آزمون تجربی..... ۷۰
- شکل ۴-۱۲: توزیع کرنش موثر لوله بدون درز تحت شبیه‌سازی عددی شماره‌ی ۹ از جدول ۳-۳... ۷۰
- شکل ۴-۱۳: منحنی نیرو- جابه‌جایی شبیه‌سازی شماره ۹..... ۷۱
- شکل ۴-۱۴: اثر اصلی شعاع گوشه قالب بر تعداد چین‌خوردگی..... ۷۲
- شکل ۴-۱۵: اثرات اصلی عوامل مستقل بر روی تعداد چین..... ۷۳
- شکل ۴-۱۶: اثرات اصلی عوامل مستقل بر روی عمق متوسط بالچینگ بر حسب میلی‌متر..... ۷۴
- شکل ۴-۱۷: اثرات اصلی عوامل مستقل بر روی میانگین اختلاف عمق بیشینه..... ۷۵
- شکل ۴-۱۸: اثرات اصلی عوامل مستقل بر روی میانگین نیروی فرایند بر حسب کیلو نیوتن..... ۷۶
- شکل ۴-۱۹: اثرات اصلی عوامل مستقل بر روی میانگین تغییر ضخامت متوسط بر حسب میلی‌متر..... ۷۷
- شکل ۴-۲۰: اثرات اصلی عوامل مستقل بر روی میانگین انحراف استاندارد کرنش ضخامتی (10^4)..... ۷۸
- شکل ۴-۲۱: توزیع کرنش پلاستیک موثر در حالت بدون روانکار در پنج مرحله..... ۸۱
- شکل ۴-۲۲: توزیع کرنش پلاستیک موثر در شرایط روانکاری فیلم جامد بین لوله و لاستیک در پنج مرحله..... ۸۲
- شکل ۴-۲۳: توزیع کرنش پلاستیک موثر در شرایط روانکاری کامل در شش مرحله..... ۸۳
- شکل ۴-۲۴: تغییرات شعاع در آستانه ترکیدگی در دو فرایند RPF و HF بر روی مسیر طولی AB به کمک روش عددی..... ۸۴
- شکل ۴-۲۵: مقایسه امضای کرنشی دو فرایند RPF و HF در آستانه ترکیدگی لوله..... ۸۵

- شکل ۴-۲۶: کرنش پلاستیک موثر دو فرایند RPF و HF ۸۶
- شکل ۴-۲۷: تعدادی از لوله‌های شکل داده شده در آزمایشگاه ۸۷
- شکل ۴-۲۸: منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ نزن ۳۰۴ در فرایند RPF ۸۸
- شکل ۴-۲۹: تغییر شکل لوله در شرایط بدون روانکار، الف) جابه‌جایی ۳۰ mm، ب) جابه‌جایی mm ۵۰
- شکل ۴-۳۰: مقایسه هندسه تغییر شکل در شبیه‌سازی و آزمون تجربی ۸۹
- شکل ۴-۳۱: توزیع کرنش محیطی و طولی لوله بدون حضور روانکار، با اعمال جابه‌جایی mm ۵۰..... ۸۹
- شکل ۴-۳۲: تغییر شکل لوله در شرایط روانکاری کامل، الف) جابه‌جایی ۳۰ mm، ب) جابه‌جایی mm ۵۰
- شکل ۴-۳۳: مقایسه هندسه تغییر شکل در شبیه‌سازی و آزمون تجربی ۹۰
- شکل ۴-۳۴: مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی، در شرایط روانکاری کامل و جابه‌جایی mm ۵۰ ۹۱
- شکل ۴-۳۵: مقایسه ترکیدگی لوله با روش RPF در الف) آزمون تجربی، ب) شبیه‌سازی ۹۲
- شکل ۴-۳۶: تصویر ترکیدگی لوله از ناحیه درز آن، الف) فرایند RPF ، ب) فرایند HF ۹۲
- شکل ۴-۳۷: مقایسه توزیع کرنش محیطی دو فرایند RPF و HF در آستانه ترکیدگی لوله ۹۳
- شکل ۴-۳۸: قطعه بادامک ساخته شده با روش RPF (روانکاری کامل - جابه‌جایی سنبه برابر mm ۲۳/۵) ۹۳
- شکل ۴-۳۹: تغییرات کرنش طولی و شعاعی قطعه میل‌بادامک ۹۴
- شکل ۴-۴۰: ترکیدگی در میل‌بادامک‌های شکل داده شده با روش الف) HF ، ب) RPF ۹۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: مقایسه خواص مکانیکی الاستومرها با دیگر مواد مهندسی [۴] ۲۳
- جدول ۱-۳: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله فولادی و اجزای قالب [۲۳] ۳۷
- جدول ۲-۳: عوامل و سطوح در طرح آزمایش مورد بررسی ۴۷
- جدول ۳-۳: ماتریس متعامد L36 برای سری آزمون‌های ۷ عاملی ۴۸
- جدول ۴-۳: خواص پلی‌اورتان مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها ۵۰
- جدول ۵-۳: ترکیب شیمیایی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ [۲۳] ۵۹
- جدول ۶-۳: شرایط آزمایش‌های تجربی انجام شده ۶۱
- جدول ۱-۴: میانگین تعداد چین به ازای سطوح مختلف از عوامل هفت‌گانه ۷۳
- جدول ۲-۴: عمق متوسط بالچینگ به ازای سطوح مختلف از عوامل هفت‌گانه بر حسب میلی‌متر ۷۴
- جدول ۳-۴: میانگین اختلاف عمق بیشینه به ازای سطوح مختلف از عوامل هفت‌گانه بر حسب میلی
متر ۷۵
- جدول ۴-۴: میانگین نیروی فرایند به ازای سطوح مختلف از عوامل هفت‌گانه بر حسب کیلونیوتن ... ۷۶
- جدول ۵-۴: میانگین تغییر ضخامت متوسط به ازای سطوح مختلف از عوامل هفت‌گانه بر حسب میلی
متر ۷۷
- جدول ۶-۴: میانگین انحراف استاندارد کرنش ضخامتی به ازای سطوح مختلف از عوامل هفت‌گانه ... ۷۸

فهرست نشانه‌ها

t	ضخامت	h	ارتفاع
W	پتانسیل انرژی کرنش	L	طول
$\bar{u}_f^{pl}$	متغیر جابه‌جایی پلاستیک موثر	X	مقادیر داده‌ها
C	تانسور کوشی-گرین راست	B	متوسط داده‌ها
I	تانسور واحد مرتبه دوم	v	ضریب پواسون
σ	تانسور تنش کوشی	f	ضریب ناهمگنی
ε	کرنش	H	سختی
ε_1	کرنش اصلی	R	ضریب همسانگردی
ε_2	کرنش فرعی	D	قطر
φ	انحراف استاندارد	F	نیرو
		λ	نرخ کرنش اصلی
		P	فشار
		E	مدول یانگ
		W_{FLD}	متغیر شکل‌پذیری

فصل ۱ مقدمه

در سال‌های اخیر پیشرفت روزافزون فن‌آوری و رقابت بازار تجارت در صنایع حمل و نقل سبب شده است تا این صنایع به سمت تولید وسایل نقلیه سبک‌تر، با مصرف سوخت کمتر و سازه‌های مستحکم‌تر سوق داده شوند. 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 روش‌هایی که به تازگی در صنایع هوافضا و همچنین اتومبیل‌سازی مورد توجه قرار گرفته شده است، فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان^۱ می‌باشد. از این روش به علت انعطاف‌پذیری بالا، کیفیت سطح مطلوب و هزینه‌ی پایین ساخت قالب – به علت استفاده از یک نیمه‌ی صلب ابزار- به عنوان جایگزین مناسبی برای روش‌های مرسوم شکل‌دهی یاد می‌شود. در این پژوهش از فرایند *RPF* برای انبساط‌دهی لوله استفاده می‌شود. انبساط‌دهی^۲، یک فرایند صنعتی است که عموماً به طور وسیع برای قطعات پیچیده‌ی لوله‌ای شکل استفاده می‌شود. بسیاری از قطعات صنعتی مثل روکش اکسل، لوله‌های توخالی پله‌دار و غیره را می‌توان با استفاده از فرایند انبساط‌دهی متقارن و نامتقارن لوله تولید کرد.

^۱ Rubber Pad Forming (RPF)

^۲ Bulging

در این فصل، نخست فرایندهای شکل‌دهی فلزات معرفی و دسته‌بندی شده؛ همچنین به جایگاه شکل‌دهی با بالشتک کشسان در بین آن‌ها اشاره می‌شود. سپس توضیح مختصری پیرامون فرایند هیدروفرمینگ و انواع آن، شکل‌پذیری و نمودار حد شکل‌دهی ارائه خواهد شد. سپس مروری بر پژوهش‌های انجام شده توسط محققان دیگر، که مرتبط با این پایان‌نامه می‌باشد؛ ارائه می‌گردد. در پایان این فصل نیز اهداف پایان‌نامه ذکر خواهد شد.

۱-۱ معرفی فرایندهای شکل‌دهی فلزات

توانایی تغییرشکل دائمی فلزات یکی از ارزشمندترین خصوصیات آن‌ها به شمار می‌آید. بی‌شک تولید ورق، تسمه، میل‌گرد، لوله، مقاطع ساختمانی و به طور کلی شکل‌دهی فلزات مدیون این قابلیت است. با توجه به این که شکل‌دهی فلزات یکی از روش‌های مهم ساخت و تولید قطعات است، شناخت هر چه دقیق‌تر این صنعت ضروری می‌باشد [۱]. در استاندارد DIN 8580 شکل‌دهی به عنوان تغییرشکل پلاستیک یک جسم در حالی که حجم و پیوستگی آن حفظ شود؛ شناخته می‌شود. به عبارتی دیگر شکل‌دهی یک روش تغییرشکل با کنترل هندسی شکل می‌باشد [۲].

به طور کلی فرایندهای شکل‌دهی فلزات را می‌توان به دو گروه عمده دسته‌بندی کرد [۳]:

الف- شکل‌دهی حجمی^۱

ب- شکل‌دهی ورق^۲

شکل‌دهی حجمی دارای دو مشخصه متمایز زیر است:

- ۱- شکل یا سطح مقطع قطعه کار، تغییر شکل مومسان دائمی و زیاد پیدا می‌کند.
- ۲- مقدار تغییر شکل مومسان^۳ در این فرایند نسبت به تغییر شکل کشسان^۴ معمولاً به قدری زیاد است که از برگشت فنری^۵ قطعه بعد از تغییر شکل صرف‌نظر می‌شود.

^۱ Bulk forming

^۲ Sheet forming

^۳ Plastic deformation

^۴ Elastic deformation

^۵ Spring back

فرایندهای حديدكاری^۱، آهنگری^۲، نوردکاری^۳ و كشش^۴ مثال‌هایی از فرایندهای شكل‌دهی حجمی فلزات می‌باشند.

مشخصه‌های فرایندهای شكل‌دهی ورق چنین است:

۱- شكل اولیه قطعه‌كار به صورت ورق است.

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

۳- اغلب تغییرشکل‌های مومسان و کشسان از یک مرتبه‌اند. بنابراین نمی‌توان از برگشت فنری چشم‌پوشی کرد.

فرایندهای كشش عمیق^۵، خمکاری^۶، شكل‌دهی چرخشی^۷، اتساع^۸ و شكل‌دهی با بالشتك کشسان نمونه‌هایی از فرایندهای شكل‌دهی ورق هستند.

۱-۲ شكل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر^۹

برخلاف فرایندهای متداول شكل‌دهی، در شكل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر از یک واسطه انعطاف‌پذیر به جای سنبه (یا ماتریس) صلب به عنوان انتقال دهنده‌ی فشار استفاده می‌شود. واسطه انعطاف‌پذیر می‌تواند مایع (مثل آب و روغن)، گاز (مثل هوای تحت فشار) و جامد (مثل مواد ویسکوپلاستیک و یا یک بالشتك کشسان) باشد.

فرایندهای شكل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر در مقایسه با فرایندهای با قالب صلب دارای مزایای متعددی مانند هزینه‌ی کم، انعطاف‌پذیری بالا، کیفیت سطح خوب و دقت ابعادی می‌باشد. البته هر فرایند

^۱ Extrusion

^۲ Forging

^۳ Rolling

^۴ Drawing

^۵ Deep drawing

^۶ Bending

^۷ Spinning

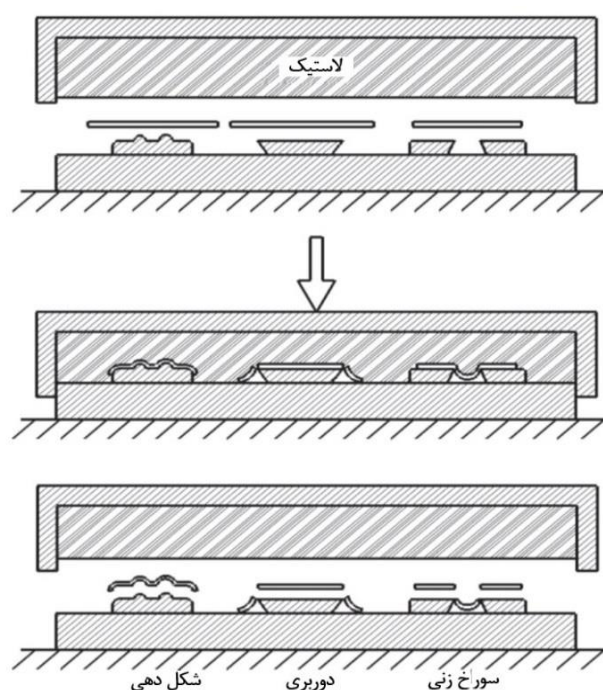
^۸ Stretching

^۹ Flexible die forming

انعطاف‌پذیر معایب خاص خود را دارد. در ادامه دو نوع از فرایندهای شکل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر؛ فرایند هیدروفرمینگ و شکل‌دهی با بالشتک کشسان معرفی می‌شود [۴].

۱-۲-۱ فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان

شکل‌دهی با بالشتک کشسان، به عنوان شکل‌دهی با ابزار انعطاف‌پذیر نیز شناخته می‌شود. در این فرایند از یک بالشتک لاستیکی یا یک دیافراگم انعطاف‌پذیر به عنوان یک نیمه‌ی قالب استفاده می‌شود و تنها به یک نیمه‌ی صلب ابزار برای شکل‌دهی نیاز است. نیمه صلب ابزار شکل‌دهی می‌تواند سنبه یا ماتریس باشد؛ همچنین جنس آن می‌تواند از چسب اپکسی^۱، چوب سخت، آلیاژهای روی، آلومینیوم، چدن و فولاد باشد. لاستیک به منظور شکل‌دهی همانند سیال هیدرولیک بر روی تمام سطح قطعه فشار تقریباً یکسانی وارد می‌کند. شکل‌دهی با بالشتک کشسان برای شکل‌دادن قطعاتی که دارای عمق فرورفتگی کم و فلنج‌های ساده هستند؛ مناسب است. عمق قطعه معمولاً کمتر از ۱۰۰ mm (۳/۹ in) می‌باشد. پرس‌های هیدرولیک در اغلب فرایندهای شکل‌دهی انعطاف‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳].



شکل ۱-۱: کاربردهای مختلف شکل‌دهی با بالشتک کشسان به صورت شماتیک [۴]

^۱ Epoxy

برخی از روش‌های شکل‌دهی با ابزار انعطاف‌پذیر می‌تواند برای تولید انبوه قطعاتی مانند منعکس کننده نور چراغ عقب اتومبیل و کشش عمیق پوسته‌های توستر استفاده شود. شکل ۱-۱ کاربردهای مختلف شکل‌دهی با بالشتک کشسان را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

۱-۲-۲ فرایند هیدروفرمینگ^۱

هیدروفرمینگ یکی از فرایندهای شکل‌دهی فلزات است که در آن از یک سیال تحت فشار به جای سنبه‌های (یا ماتریس‌های) صلب به منظور ایجاد تغییر شکل مومسان 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 [۵]. 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 بالا 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 کند تولید و تجهیزات گران‌قیمت اشاره کرد. از کاربردهای عمده این فرایند در صنعت خودروسازی می‌توان به ساخت قطعات سیستم آگزوز خودرو، قطعات شاسی، اجزای موتور، قطعات بدنه خودرو و همچنین سایر قطعات موتورسیکلت و دوچرخه اشاره کرد. فرایند هیدروفرمینگ را در حالت کلی می‌توان به دو دسته عمده هیدروفرمینگ ورق^۲ و هیدروفرمینگ لوله^۳ تقسیم کرد [۵]. در ادامه به معرفی هر یک از این فرایندها پرداخته می‌شود.

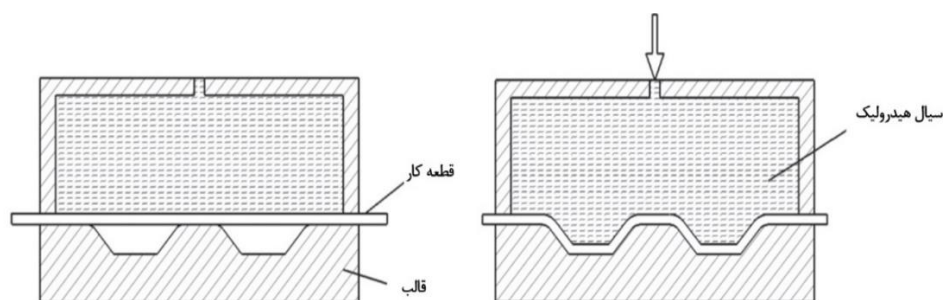
الف) هیدروفرمینگ ورق

در روش هیدروفرمینگ ورق، ماده خام یک ورق است که 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 ۱-۲ نشان داده شده است.

^۱ Hydroforming

^۲ Sheet hydroforming

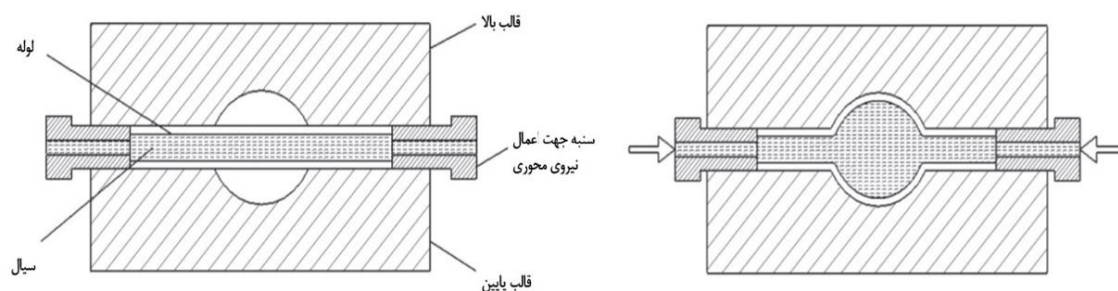
^۳ Tube hydroforming



شکل ۱-۲: شماتیک فرایند هیدروفرمینگ ورق

ب) هیدروفرمینگ لوله

در ابتدا کاربرد فرایند هیدروفرمینگ لوله محدود به بدنه دوچرخه بود، اما امروزه گسترش چشم‌گیری در بین قطعات تولیدی پیدا کرده است. شماتیک این فرایند در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. در این فرایند ابتدا قطعه‌ی اولیه که معمولاً یک لوله استوانه‌ای با/ بدون درز است، داخل قالب قرار می‌گیرد. بعد از بسته شدن قالب، دو سنبه در دو انتهای لوله به گونه‌ای قرار می‌گیرد 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. سپس 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 مرحله‌ی 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 ۱-۳: شماتیک فرایند هیدروفرمینگ لوله

از جمله محدودیت‌های فرایند هیدروفرمینگ لوله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۶]:

۱- زمان سیکل تولید بالا

۲- هزینه تجهیزات پرس بالا

۳- اطلاعات کم در زمینه‌ی تکنولوژی فرایند

۴- ترشح سیال در حین فرایند شکل‌دهی و دشواری در کنترل فشار سیال

نیاز به پرس‌ها و سیستم‌های تحت فشار قدرتمند برای این فرایند ضروری است. هیدروفرمینگ لوله به طور گسترده‌ای برای تولید قطعات با کیفیت خوب و همچنین به منظور کاهش تعداد قطعات یک مجموعه مونتاژی و در نتیجه کاهش وزن خودرو استفاده می‌شود.

از آنجایی که در این پژوهش مقایسه‌ی قابلیت شکل‌دهی لوله درزدار در دو فرایند انبساط‌دهی به کمک بالشتک کشسان و سیال روغن مورد نظر می‌باشد؛ در ادامه قابلیت شکل‌پذیری به صورت مختصر معرفی می‌گردد.

۱-۳ پنجره شکل‌دهی^۱

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 شکل-دهی در تشخیص مسائل بالفعل و بالقوه شکل‌دهی بسیار سودمند واقع شده‌اند. ورق‌ها و لوله‌هایی را که با شبکه‌های متشکل از دایره‌ها نشانه‌گذاری شده‌اند، می‌توان با استفاده از قالب‌های آزمایشی، یا قالب‌های اصلی که در تولید به کار می‌روند، شکل داد. کرنش‌های موضعی نزدیک به نقطه پارگی، یا نقاط مشکوک را می‌توان اندازه‌گیری و با نمودار حد شکل‌دهی مقایسه کرد. بدین ترتیب می‌توان نقاط دردرساز را شناسایی کرده و شدت مسئله را، حتی در هنگامی که پارگی رخ نمی‌دهد سنجید.

شکل‌پذیری یک ورق یا لوله‌ی فلزی، توانایی آن به تغییر شکل مومسان، بدون بروز هرگونه عیبی می‌باشد. گلوپی شدن^۲، شکست برشی^۳ و چروکیدگی^۴ را می‌توان به عنوان معیارهایی به منظور توصیف شکل-پذیری ماده بیان کرد. بر همین اساس، به منظور بیان شکل‌پذیری ماده، نمودار حد شکل‌دهی^۵ را

^۱ Forming window

^۲ Necking

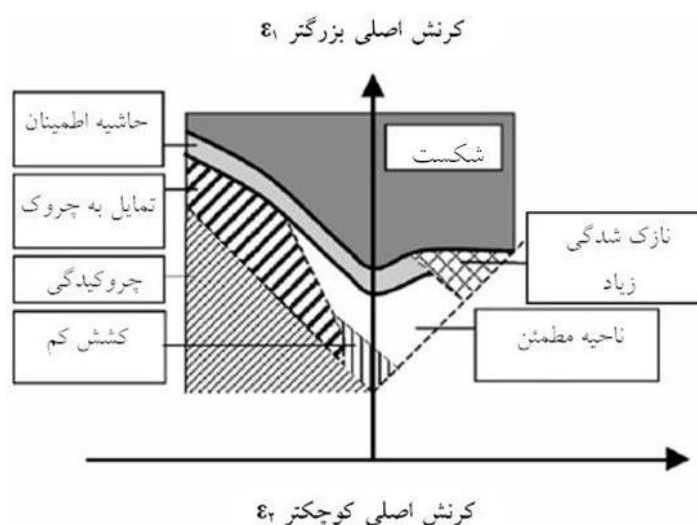
^۳ Fracture shear

^۴ Wrinkling

^۵ Forming Limit Diagram (FLD)

براساس معیار نازک شدن ضخامتی ورق بر روی صفحه‌ی کرنش‌های اصلی با عنوان منحنی حد شکل-دهی ابداع نمودند [۷]. در نمودار حد شکل‌دهی، کمترین مقدار نمودار در راستای عمودی در حالت کرنش صفحه‌ای ($\varepsilon_2 = 0$) دیده می‌شود، بنابراین اگر تغییرشکل در ناحیه بحرانی نزدیک به حالت کرنش صفحه‌ای باشد، تغییرات روانکاری یا قالب‌ها، که سبب کشیده شدن بیشتر می‌شود، سودمند خواهد بود [۸]. 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، قطعه حتماً پاره خواهد شد و در حقیقت برای موفقیت-آمیز 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 [۹]. بنابراین یکی از روش‌های واقع‌بینانه و موثر به منظور بررسی امکان‌پذیر بودن تولید یک قطعه و طراحی موفق در فرایندهای شکل‌دهی، استفاده از نمودارهای FLD می‌باشد. این ابزار ما را قادر به پیش‌بینی رفتار ماده در حین فرایند شکل‌دهی می‌سازد.

طراح باید موارد غیر از پارگی را نیز در نظر بگیرد که شامل نازک‌شدگی بیش از حد، تمایل به چروکیدگی و کشش غیر کافی است که با مطالعه سطوح کرنش بدست می‌آیند. در این حالت با پیش‌بینی کرنش‌های لازم در مورد قطعات طراحی شده و درک وضعیت کرنش در آن حالت خاص، می‌توان از نمودار FLD استفاده کرد. به طور نمونه، فضای یک نمودار حد شکل‌دهی در شکل ۴-۱ نشان داده شده است و خاصیت هر منطقه نیز ذکر شده است [۱۰].



شکل ۴-۱: مناطق مختلف دیاگرام حد شکل‌دهی [۱۰]

با در دست داشتن نمودار حد شکل‌دهی و با علم به اینکه هر قسمت از نمودار مذکور دارای خواص ویژه‌ای است، برای رسیدن به یک حالت خاص می‌توان کرنش‌های مربوط به آن حالت را که در شکل مشخص است، در قطعه پدید آورد. یکی دیگر از مشخصه‌های مکانیکی فرایند شکل‌دهی ورق‌ها و لوله‌های فلزی امضای کرنشی می‌باشد. امضای کرنشی فرایند مکان هندسی کرنش مجموعه‌ای از نقاط یک مسیر از قطعه است که بر روی صفحه‌ی کرنش ϵ_1 و ϵ_2 نمایش داده می‌شود. هرگاه این امضا با منحنی حد شکل‌دهی^۱ برخورد نماید ابتدای گلوپی شدن در محصول خواهد بود.

۴-۱ پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر فعالیت‌های پژوهشی قابل توجهی پیرامون فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان (RPF) با هدف دستیابی به یک قطعه بدون نقص صورت گرفته است. به کمک تحلیل‌های تجربی و عددی اثر ضریب اصطکاک، هندسه قالب و قطعه بر روی فرایند انبساط‌دهی لوله‌های مسی تی‌شکل به کمک واسطه‌ی پلی‌اورتان^۲ توسط کلانتری و همکارانش (۱۳۸۸) بررسی شد. در این تحقیق از، لوله‌ی مسی آنیل شده برطبق استاندارد ASTM B ۲۸۰، با قطر خارجی ۲۲/۲۲ mm و ضخامت ۱/۱۴ mm استفاده شد. بالشتک کشسان از جنس پلی‌اورتان، با طول ۱۰۰ mm و قطر ۱۹/۵ mm انتخاب گردید. نتایج نشان داد که افزایش شعاع قالب در افزایش طول شاخه‌ی تی‌شکل لوله مؤثر بوده و همچنین باعث کاهش میزان نازک‌شدگی سر شاخه می‌شود. در فرایند بالج فرمینگ لوله‌ی تی‌شکل، لوله‌هایی که دارای ضخامت اولیه‌ی بیشتری هستند، به منظور شکل‌دهی به نیروهای بزرگتر نیاز دارد که البته شاخه‌های بلندتری را تولید خواهد کرد، اما میزان افزایش ضخامت آن در انتهای لوله نیز بیشتر خواهد بود [۱۱].

[۱۲]. انقباض قطر موضعی لوله فولادی St۳۷ توسط یک حلقه‌ی کشسان به صورت عددی و تجربی توسط درویشی (۱۳۸۹) بررسی شد. در این تحقیق، شبیه‌سازی فرایند توسط نرم‌افزار المان محدود انسیس^۳ اجرا و نتایج عددی با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. در ادامه‌ی این تحقیق مونتاژ لوله‌های فولادی با کاهش قطر موضعی در حوزه اتصال توسط حلقه لاستیکی بررسی شد. قطر داخلی لوله ۱۴۴/۹ mm، ضخامت آن ۲ mm و ارتفاع آن ۷۳/۴ mm است؛ که در وسط طول آن کاهش قطری

^۱ Forming Limit Curve (FLC)

^۲ Polyurethane

^۳ ANSYS

به اندازه ۱۲ mm ایجاد می‌شود. لاستیک مورد استفاده از جنس تایر تراکتور با سختی ۷۰ شور-A^۱ می‌باشد. با توجه به نتایج استخراج شده از حل عددی، این روش را می‌توان به عنوان یک روش کاربردی در زمینه مونتاژ لوله‌ها معرفی نمود. علاوه بر حفظ کیفیت سطوح، این فرایند موجب ایجاد تغییرات متالورژیکی در ساختار لوله مثل فرایند جوشکاری نمی‌شود. از این روش می‌توان برای اتصال لوله‌هایی از جنس‌های مختلف که امکان اتصال آنها توسط سایر فرایندها مقدور نیست، استفاده کرد [۱۳]. تاثیر طول خم‌کاری و شعاع قالب بر برگشت فنری در خمکاری ۱۳۵ درجه با استفاده از بالشتک کشسان توسط باقری و همکارانش (۱۳۹۰) مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از ورق فولادی St۱۴ با ضخامت ۰/۶ mm جهت انجام فرایند خم‌کاری استفاده شد و بررسی تاثیر پارامترهای شعاع قالب و طول خم‌کاری بر برگشت فنری صورت گرفت. با توجه به نتایج، تاثیر شعاع قالب بر برگشت فنری نسبت به طول خم‌کاری بیشتر بوده است. افزایش شعاع قالب باعث افزایش برگشت فنری می‌شود؛ در حالی که پارامتر طول خم‌کاری تاثیر معکوس دارد و با کاهش طول خم‌کاری برگشت فنری افزایش ناچیزی پیدا می‌کند [۱۴]. مدل رایانه‌ای فرایند شکل‌دهی ورق با بالشتک کشسان به منظور بررسی اثر پارامترهای سختی بالشتک، جنس ورق و شرایط اصطکاکی؛ توسط دیریکلو (۲۰۰۴) ارائه شد. این بررسی با استفاده از نرم‌افزار تجاری المان محدود انسیس انجام شد. در این پژوهش از دو بالشتک کشسان با سختی‌های متفاوت و ورق‌های فولادی و آلومینیومی استفاده شد. نتایج نشان داد که یک بالشتک پلی‌اورتان با سختی متغیر می‌تواند برای شکل‌دهی با بالشتک لاستیکی استفاده شود. همچنین تغییر در سختی بالشتک باعث تغییر در مقدار تنش‌های شکل‌دهی ورق نمی‌شود و روند توزیع تنش برای ورق با مواد مختلف به صورت مشابه می‌باشد [۱۵]. دو مدل اصطکاکی برای رفتار واقعی فرایند شکل‌دهی متقارن محوری ورق با بالشتک کشسان؛ بنابر نظریه‌ی ایستایی و مدل اصطکاک جنبشی توسط رضانی (۲۰۰۹) ارائه شد. از مهمترین مشکلات مربوط به مدل‌سازی این فرایند نیروی اصطکاک بین ورق و ابزارهای شکل‌دهی می‌باشد؛ که نقش مهمی بر روی عملکرد فرایند و خواص نهایی قطعه دارد. هر دو مدل براساس شرایط موضعی تماس می‌باشد. نتایج نشان داد که مدل اصطکاکی ارائه شده در مقایسه با مدل اصطکاک کولمبی ارتباط بهتری با نتایج تجربی داشته است [۱۶]. از فرایند *RPF* برای تولید صفحه‌ی فلزی پوسته‌ی قابل تعویض محفظه‌ی سوخت پروتون با چند کانال جریان کوچک توسط لین هوا و

^۱ Shore-A

همکارانش (۲۰۱۰) استفاده شد. این نتایج بیان می‌کند که فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان یک تکنیک عملی برای ساخت صفحه‌های محفظه‌ی سوخت می‌باشد [۱۷]. در همان سال شبیه‌سازی المان محدود و تجربی فرایند *RPF* با استفاده از سه نوع لاستیک طبیعی، مصنوعی و پلی‌اورتان به عنوان سنبه انعطاف‌پذیر، با هدف بررسی اثر سرعت سنبه و جنس لاستیک بر روی نیروی فرایند؛ توسط رضانی (۲۰۱۰) بررسی شد. از مهمترین نتایج بدست آمده از این تحقیق آن است که پلی‌اورتان مناسب‌ترین نوع لاستیک برای فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان می‌باشد [۱۸]. مطالعه‌ی عددی و تجربی بر روی پارامترهای موثر شکل‌دهی با استفاده از بالشتک کشسان در قطعه‌های دارای شعاع انحنا از جنس آلومینیوم توسط مهشیدی‌فر (۲۰۱۳) انجام گرفت. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل شعاع انحنا، ضخامت ورق، ضخامت و سختی بالشتک کشسان و شرایط روانکاری می‌باشد. نتایج بیان می‌کند که افزایش اصطکاک بین سنبه و ورق فلزی به خم‌شدن ورق کمک می‌کند؛ بنابراین با ایجاد یک شرایط مناسب برای اصطکاک بین سطح ورق و لاستیک، همچنین ورق و سنبه؛ کیفیت و شکل‌پذیری ورق افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ضخامت لاستیک باعث کاهش اثر برگشت فنی می‌شود [۱۹].

۱-۵ اهداف و ویژگی‌های پایان‌نامه

در تحقیق حاضر تحلیل عددی و تجربی فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله‌ی فلزی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و امکان‌سنجی تولید یک قطعه‌ی صنعتی با هندسه‌ی نامتقارن محوری با روش شکل‌دهی با بالشتک کشسان بررسی و نتایج با روش شکل‌دهی به وسیله‌ی سیال روغن مورد مقایسه قرار می‌گیرد. لذا در این پژوهش، نخست به بررسی عددی اثر پارامترهای موثر بر فرایند و خواص ناحیه درز لوله در حین فرایند *RPF* پرداخته شده است. این مطالعه شامل شبیه‌سازی عددی قالب و طراحی آن، شبیه‌سازی عددی فرایند و تعقیب مسیر کرنش تا لحظه پارگی است. همچنین فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان که در بردارنده پارامترهای مستقل مربوط به لاستیک، لوله و شرایط مرزی مسئله می‌باشد، از پیچیدگی خاصی در تحلیل و پیش‌بینی مشخصات محصول برخوردار است. به همین منظور از روش طراحی آزمایش‌های^۱ تاگوچی^۲ که یکی از متداول‌ترین روش‌های *DOE* محسوب می‌شود، برای

^۱ Design Of Experimental (DOE)

^۲ Taguchi

جداسازی یا غربال کردن^۱ پارامترهای موثر از غیر موثر استفاده شده است. در نتیجه آن، آزمون‌های تجربی طراحی گردید. پس از ساخت قالب‌ها، فرایند اجرا و تحلیل تجربی کرنش با اندازه‌گیری مقادیر کرنش صورت گرفت. در مرحله پایانی به منظور بررسی میزان کارایی و دقت در کنترل موثر پارامترهای فرایند، از آن برای امکان‌سنجی تولید یک قطعه پیچیده صنعتی استفاده شد.

از مهمترین نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به بررسی مقایسه‌ای توزیع کرنش و در نتیجه کشش‌پذیری لوله در دو فرایند انبساط‌دهی به کمک بالشتک کشسان و سیال روغن اشاره نمود. همچنین تخمین پارگی لوله با بکارگیری معیار شکست نرم پیش‌رونده FLD در فرایند انبساط‌دهی لوله به کمک بالشتک کشسان از دیگر نوآوری‌های این پایان‌نامه محسوب می‌شود.

۱-۶ معرفی فصول آتی پایان‌نامه

در انجام پایان‌نامه حاضر، در ابتدا مطالعه‌ای پیرامون فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان و فرایند هیدروفرمینگ، نمودارهای حد شکل‌دهی و همچنین مطالعه‌ای پیرامون پژوهش‌های انجام شده توسط سایر محققان صورت گرفت که در فصل اول بیان شد. معرفی فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان، مزایا و معایب آن، الاستومرهای مورد استفاده در این فرایند و خواص آن در فصل دوم ارائه شده است. به منظور بررسی کامل‌تر تاثیر پارامترهای موثر فرایند، از نتایج شبیه‌سازی استفاده شد. لذا در بخش اول از فصل سوم مراحل انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس و چگونگی تعریف محیط‌های مختلف آن، همچنین تحلیل‌های انجام شده معرفی می‌گردد. تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده در انجام آزمایش‌ها، نحوه بدست آوردن خواص مکانیکی لوله و لاستیک، و روند انجام آزمایش‌های تجربی در بخش دوم از این فصل ذکر شده است. 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.

^۱ Screening

فصل ۲ معرفی فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان

در گذشته روش‌های شکل‌دهی با ابزار انعطاف‌پذیر به وسیله فرایندهای خاص زیر تعیین می‌گردید. فرایند گوارین^۱، فرایند ورسون-ویلون^۲، فرایند شکل‌دهی به وسیله لاستیک با استفاده از چکش^۳، فرایند مارفورم^۴، فرایند ماسلنیکو^۵ و فرایند دیمارست^۶. تکنولوژی مدرن این لیست از فرایندها را کاهش داده است، این روش‌ها به سه گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شود [۳]:

(۱) شکل‌دهی با بالشتک کشسان

(۲) شکل‌دهی با سیال

(۳) شکل‌دهی با سلول حاوی سیال

۲-۱ فرایند گوارین

این فرایند اصلی‌ترین و قدیمی‌ترین نوع از فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان می‌باشد که از مزیت‌های آن، سادگی تجهیزات، انعطاف‌پذیری در تولید و سودبخشی ابزار مورد استفاده در سیستم

^۱ Guerin

^۲ Verson-Wheelon

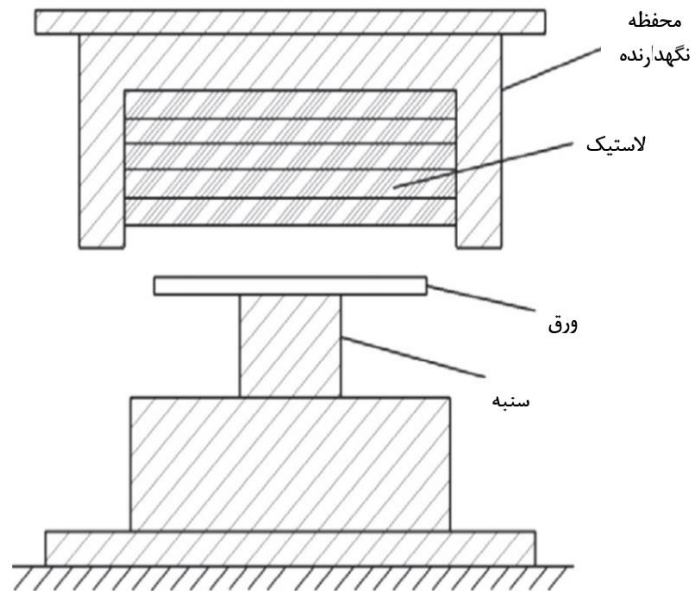
^۳ Trapped-rubber

^۴ Marform

^۵ Maslennikov

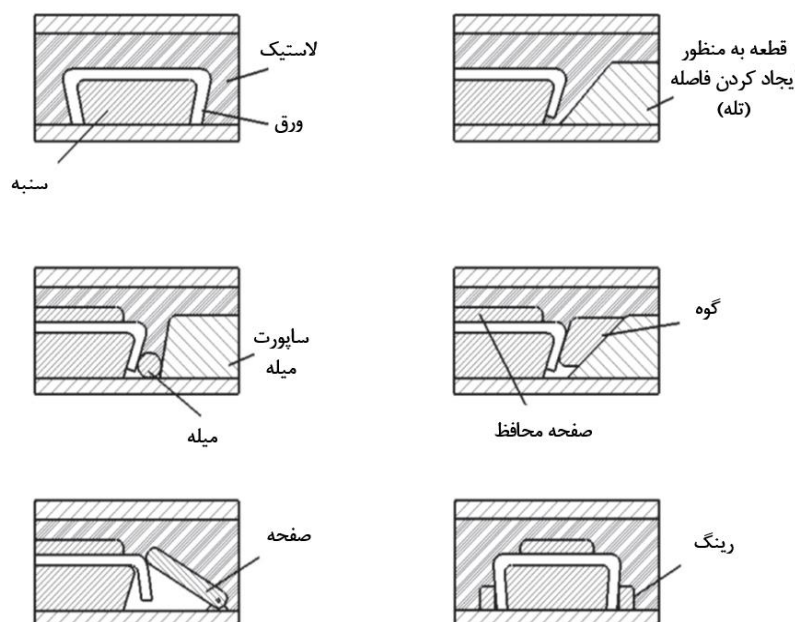
^۶ Demarest

می‌باشد. ابزارهای اصلی بالشتک لاستیکی، سنبه یا ماتریس می‌باشند. معمولاً اندازه بالشتک کشسان سه برابر عمق قطعه شکل داده شده است. بالشتک می‌تواند یکپارچه یا به صورت تکه‌هایی که روی یکدیگر به صورت ورقه ورقه چسبانده شده‌اند؛ باشد و در یک محفظه نگه‌داشته شود (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱: شماتیک فرایند گوارین [۴]

محفظه‌ی لاستیک معمولاً از فولاد یا چدن ساخته می‌شود و اغلب ۲۵ mm عمیق‌تر نسبت به بالشتک کشسان می‌باشد. این محفظه مقاومت کافی برای ایستادگی در برابر نیروهای شکل‌دهی را دارد. ضخامت بالشتک از ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. محفظه نگهدارنده لاستیک بر روی رم بالایی پرس ثابت می‌شود و صفحه فلزی شامل سنبه بر روی صفحه پایینی پرس قرار می‌گیرد. یک ورق بر روی سنبه قرار می‌گیرد و توسط دو یا چندین پین موقعیت دهنده، در جای خود نگه‌داشته می‌شود. این پین‌ها باید به صورت صلب طراحی شوند تا لاستیک باعث حرکت آن نشود؛ و نباید باعث سوراخ شدن بالشتک لاستیکی شود. با پایین آمدن رم پرس، لاستیک ورق را به روی سنبه فشار می‌دهد و قطعه کار شکل‌دهی می‌شود. فشار تابعی از تعداد قطعه‌های شکل داده شده نمی‌باشد اما تابعی از مساحت صفحه فلزی نگهدارنده سنبه می‌باشد. بنابراین تعدادی سنبه ممکن است بروی یک صفحه فلزی نصب شود. اگر تغییر شکل در آن کمی دشوار باشد، باید از ابزارهای کمکی به منظور جلوگیری از چین‌خوردگی استفاده کرد. شکل ۲-۲ نشان دهنده ابزارهای کمکی مورد استفاده در فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان می‌باشد.

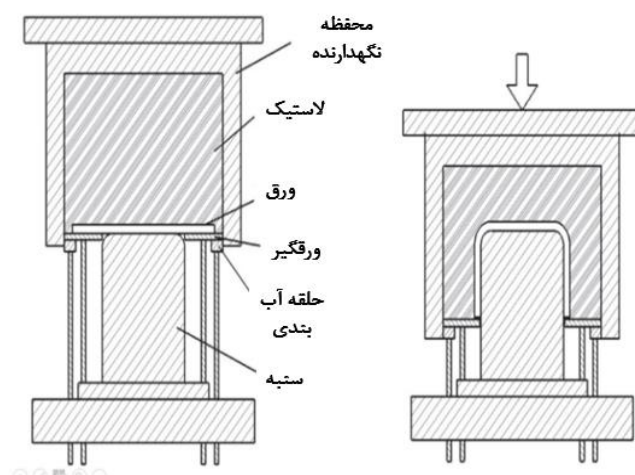


شکل ۲-۲: ابزارهای کمکی مورد استفاده در فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان [۴]

۲-۲ فرایند مارفورم

در واقع این فرایند، فرایند گوارین اصلاح شده می‌باشد. خصوصیت آن در دارا بودن یک ورق گیر و آویزه اضافی می‌باشد که این فرایند را برای عمیق‌تر کشیدن و کم کردن مشکل چروکیدگی که در فرایند گوارین متداول است، مناسب می‌سازد. یکی از بزرگترین مزایای کشش عمیق با استفاده از این فرایند توانایی کاهش قطر تا ۶۵ درصد در یک مرحله کشش بدون چین و چروک‌های سطحی است [۴].

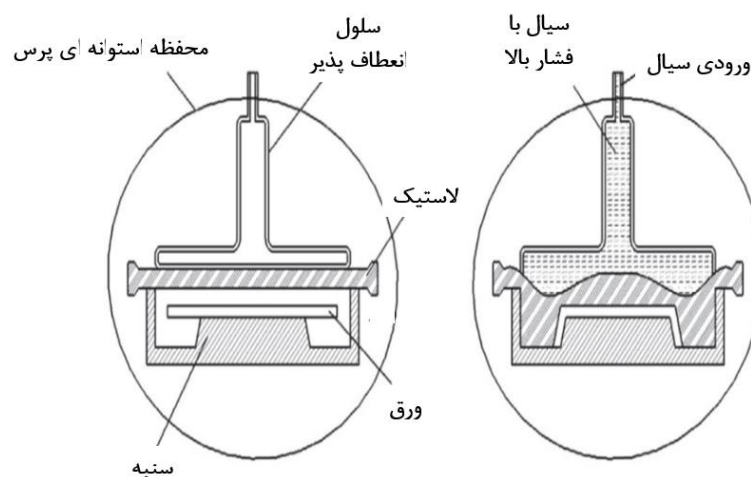
سیستم مورد استفاده در فرایند مارفورم بر روی یک پرس هیدرولیک با طول جابه‌جایی بزرگ نصب می‌شود. بالشتک لاستیکی که در این فرایند استفاده می‌شود مشابه فرایند گوارین می‌باشد. ضخامت آن معمولاً ۱/۵ تا ۲ برابر کل عمق قطعه می‌باشد. صفحه‌های نگهدارنده ورق معمولاً از فولاد کم‌کربن ساخته می‌شوند. از یک حلقه آب‌بندی نیز برای جلوگیری از خروج لاستیک از محفظه استفاده شده است. ورق بر روی صفحه ورق‌گیر بالای سنبه قرار می‌گیرد. میله‌هایی حلقه آب‌بندی را پشتیبانی و صفحه نگهدارنده به وسیله سیستم هیدرولیک با فشار متغیر کنترل می‌شود.



شکل ۲-۳: شماتیک فرایند مارفورم [۴]

۳-۲ فرایند ورسون- ویلون

این فرایند از یک بالشتک لاستیکی به جای سنبه یا ماتریس استفاده می‌کند. پرس ویرسون-ویلون دارای یک اسکلت فولادی افقی که در قسمت سقف آن یک مخزن انعطاف‌پذیر قرار دارد. جنس مخزن انعطاف‌پذیر ترکیبی از پلی‌اورتان یا نیوپرن^۱ می‌باشد. سنبه بر روی میز لغزنده‌ی پرس نصب می‌شود و به داخل پرس می‌لغزد.



شکل ۲-۴: شماتیک فرایند ورسون- ویلون [۴]

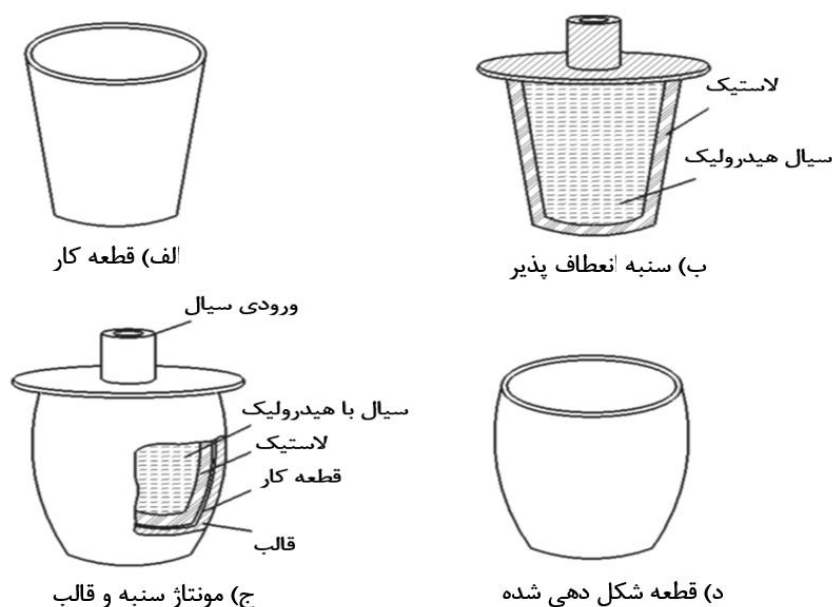
همانگونه که در شکل ۲-۴ قابل مشاهده است؛ مخزن منعطف از سیال هیدرولیک پر شده و نیروی کمکی به بالشتک لاستیکی وارد می‌کند تا ورق شکل بگیرد؛ یک فشار تقریباً یکسان بر تمامی نقاط

^۱ Neoprene

ورق اعمال می‌شود. سیال هیدرولیک باعث متورم شدن سلول انعطاف‌پذیر می‌شود. این انبساط نیروی لازم برای جلو راندن لاستیک و فشردن قطعه زیرین را ایجاد می‌کند و قطعه شکل داده می‌شود. سیکل زمانی برای فرایند ویرسون- ویلون نسبت به فرایندهای دیگر طولانی‌تر است. کاهش زمان پر شدن و خالی شدن سلول انعطاف‌پذیر و همچنین استفاده از یک سنبه‌ی دیگر بر روی میز لغزنده به‌طور همزمان برای کاهش زمان سیکل موثر است.

۴-۲ فرایند دیمارست

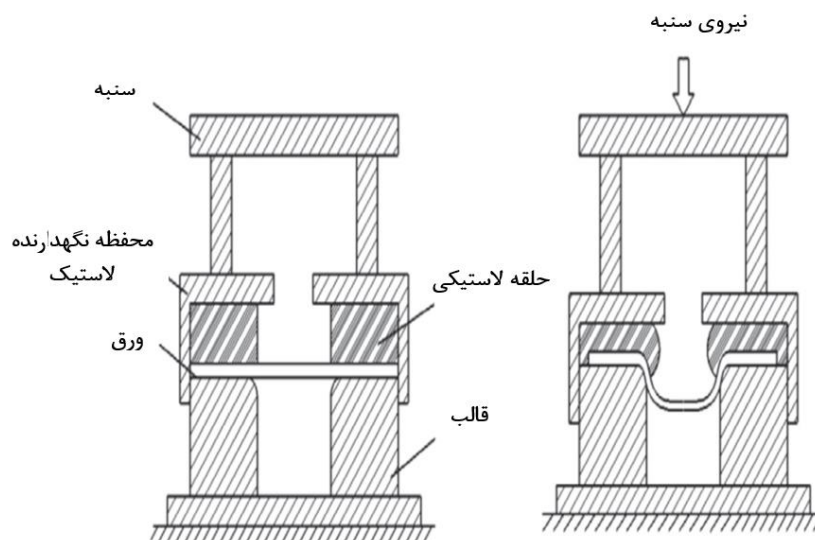
قطعه‌های استوانه‌ای و مخروطی می‌توانند به وسیله یک سنبه انبساط‌دهی کشسان تولید شوند. سنبه، به یک سلول هیدرولیک مجهز است که در داخل قطعه‌کار قرار می‌گیرد. قطعه‌کار نیز در داخل قالب قرار دارد. فشار سیال هیدرولیک سنبه را منبسط می‌کند. در شکل ۲-۵ استفاده از این فرایند برای شکل‌دهی بخشی از مخزن سوخت هواپیما مشاهده می‌شود. قطعه‌کار از جنس آلایاژ آلومینیوم بوده، پس از نورد و جوشکاری؛ تبدیل به مخروط می‌شود. مخروط در داخل قالب چدنی قرار می‌گیرد. مدت زمان کل فرایند، شامل پیاده‌سازی قالب و خارج کردن قطعه کار حدود ۳ دقیقه بوده است که در مقایسه با فرایند چرخ‌کاری برای این قطعه‌کار (۱۵ تا ۲۰ دقیقه برای چرخ‌کاری) کمتر می‌باشد.



شکل ۲-۵: شکل‌دهی قسمتی از مخزن سوخت هواپیما به وسیله فرایند دیمارست [۴]

۲-۵ فرایند ماسلنیکو

در سال ۱۹۵۷، ماسلنیکو یک تکنیک کشش بدون سنبه با استفاده از یک حلقه لاستیکی را معرفی کرد. در این فرایند از یک حلقه لاستیکی به جای سنبه صلب به منظور تولید قطعات لیوانی شکل بسیار عمیق استفاده شده است. شکل ۲-۶ فرایند ماسلنیکو را نشان می‌دهد که در آن از یک سنبه برای اعمال فشار بر روی حلقه لاستیکی استفاده کرده است. نیروی اصطکاک بین لاستیک و ورق فلزی، ورق را به داخل محفظه قالب هدایت خواهد کرد [۴].



شکل ۲-۶: شماتیک فرایند ماسلنیکو

۲-۶ فرایند شکل‌دهی با چکش سقوطی

این فرایند مشابه فرایند گوارین است که برای شکل‌دهی قطعات کم عمق مناسب است. تفاوت‌های اصلی این فرایند، سرعت شکل‌دهی سریعتر و نیروی اعمال شده توسط چکش است. نسبت به فرایند گوارین، دور ریختگی ناشی از چروکیدگی کمتر است.

۲-۷ محدودیت‌ها و مزایای فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان

از مزایای فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان در مقایسه با فرایندهای شکل‌دهی سنتی می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد.

- برای شکل دادن قطعه تنها به یک نیمه از ابزار صلب نیاز است.

- یک بالشتک کشسان یا یک دیافراگم برای شکل‌دهی انواع مختلف قطعه استفاده می‌شود، بالشتک کشسان با برداشتن فشار از روی آن به حالت اولیه خود بر می‌گردد.
 - ابزارها را می‌توان از مواد ارزانتر تولید کرد.
 - در طی پیشرفت فرایند، شعاع شکل‌دهی به طور پیش‌رونده‌ای کاهش می‌یابد، در صورتی که در شکل‌دهی سنتی این شعاع ثابت است.
 - نازک‌شدن موضعی قطعه کار که در کشش عمیق به روش سنتی اتفاق می‌افتد، در این فرایند به طور قابل توجه‌ای کاهش می‌یابد.
 - قطعات با ضخامت‌های مختلف با یک ابزار می‌توانند شکل‌دهی شود.
 - قطعات با کیفیت سطح بالایی می‌توانند شکل‌دهی شود و از خراشیدگی سطح قطعه خوداری می‌شود. این امر خصوصاً در شکل‌دهی قطعات روکش‌دار دارای اهمیت است.
 - مدت زمان تنظیم قالب به طور قابل توجه‌ای کاهش می‌یابد.
- از سوی دیگر محدودیت‌های فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان نیز شامل این موارد است:
- مدت زمانی که می‌توان از بالشتک کشسان استفاده کرد محدود می‌باشد که به سختی و فشار شکل‌دهی وابسته است.
 - فشار شکل‌دهی کم، باعث می‌شود که گوشه‌های تیز کاملاً شکل پیدا نکند و ممکن است که نیاز به عملیات ثانویه داشته باشد.
 - نرخ تولید نسبتاً کند است، در نتیجه فرایند برای تولید قطعه کارهای کم حجم و نمونه‌سازی اولیه مناسب می‌باشد.

۸-۲ الاستومرها^۱

در این بخش مقدمه‌ای کوتاه در مورد خواص مواد الاستومری و روش ساخت آن‌ها ارائه می‌شود، همچنین الاستومرهای مناسب برای فرایند شکل‌دهی با استفاده از بالشتک کشسان معرفی می‌شود.

^۱ Elastomers

نزدیک به ۱۵۰ سال است که الاستومرها (یا مواد لاستیکی) به عنوان مواد مهندسی استفاده می‌شود. ماده‌ی اولیه برای تولید الاستومرها، کائوچو^۱ می‌باشد. خاصیت مهم الاستومرها، رفتار الاستیکی آنها بعد از تغییر شکل در مقابل فشار یا کشش می‌باشد. برای مثال ممکن است یک الاستومر ۱۰ برابر طول اولیه‌ی خود کشیده شود ولی بعد از حذف کشش، تحت شرایط محیطی ایده‌آل، به شکل و طول اولیه‌ی خود باز گردد. علاوه بر این، الاستومرها با ویژگی‌هایی نظیر استحکام و سفتی بالا تحت تنش‌های دینامیکی یا استاتیکی، مقاومت بسیار خوب در مقابل سایش که تنها فولادها بالاتر از آن قرار می‌گیرد، نفوذناپذیری در مقابل هوا و آب، و در بعضی از موارد مقاومت بالا در برابر تورم در حلال‌ها و مقاوم بودن در برابر مواد شیمیایی مشخص می‌شوند [۲۰].

۲-۸-۱ مفهوم اولیه‌ی کائوچو

اولین ماده‌ی شناخته شده به عنوان کائوچو (مشتق شده از کلمه‌ی سرخپوستی کا، ئو، چو، به معنی درخت تراوش‌کننده یا گریه‌کننده)، پلی‌ایزوپرن کائوچوی طبیعی است که بازیافت شده از شیرهای درخت هو آی برزیلی می‌باشد. امروزه در مقایسه با کائوچوهای تولید شده به روش مصنوعی، این ماده به عنوان کائوچوی طبیعی شناخته می‌شود. کائوچوی طبیعی برای تشکیل اتصالات عرضی^۲ (ولکانیزاسیون^۳) در دمای بالا با گوگرد می‌تواند واکنش دهد. بنابراین، قادر است کاملاً از یک حالت چسبناک و خیلی نرم (پلاستیکی) به حالت الاستیکی؛ یا از کائوچو به یک لاستیک یا الاستومر؛ تغییر کند.

ولکانیزاسیون فرایندی است که در طی آن، کائوچوی ترموپلاستیکی یا لاستیک خام به یک حالت الاستیکی کشسان تغییر می‌کند. این فرایند، که ماکرومولکول‌ها را از طریق محلهای فعالش (یا واکنش-دار) درگیر می‌کند، پخت یا اتصالات عرضی می‌نامند. بنابراین، واژه‌ی ولکانیزاسیون نه تنها خود واکنش اتصالات عرضی را، بلکه فرایندی را که منجر به رسیدن به این واکنش می‌شود نیز در بر می‌گیرد [۲۰].

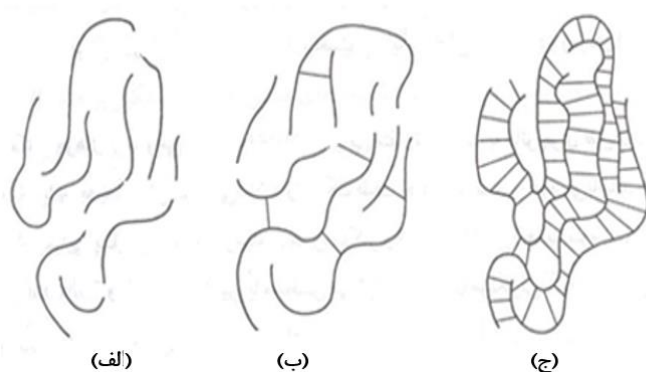
^۱ Caoutchouc

^۲ Cross Linking

^۳ Vulcanization

۲-۸-۲ مفهوم اولیه‌ی لاستیک^۱ و الاستومر

تفاوتی میان لاستیک‌های خام یا کائوچوها و لاستیک‌های شبکه‌بندی شده که الاستومرها می‌باشد، وجود دارد. کائوچوها کاملاً قابلیت تغییر شکل پلاستیکی دارند به ویژه اگر در دماهای بالا قرار گرفته باشند، زیرا آن‌ها ساختمان شبکه‌ای سفت و سخت ندارند. در مقایسه، لاستیک‌های شبکه‌بندی شده دارای محدوده‌ی گذر یا انتقال به حالت پلاستیک نیستند؛ چون آن‌ها به شبکه‌های سه‌بعدی تبدیل شده‌اند که از حرکت ماکرومولکول‌های زنجیره‌ی مولکولی جلوگیری می‌کنند. بنابراین، این مواد فقط بعد از متحمل شدن بعضی تغییرات ساختاری (فیزیکی یا شیمیایی) که بر اثر عوامل شیمی-رئولوژیکی^۲ ناشی از فرسودگی، تجزیه و یا تغییر آرایش مولکولی ایجاد می‌شود؛ یا بعد از ایجاد شکاف فیزیکی یا شیمیایی در اتصالات عرضی می‌توانند به صورت پلاستیکی تغییر شکل یابند. الاستومرها دارای یک ساختمان شبکه‌ای خیلی باز هستند، این مواد موقعیت حد وسط بین کائوچوی بدون اتصال عرضی (پلاستومر)^۳ و ابونیت با اتصالات عرضی زیاد و سخت (ترموالاست)^۴ یا دورومر^۵ را اشغال می‌کنند (شکل ۷-۲).



الف) پلاستومر (ترموپلاستیک): بدون اتصالات عرضی
 ب) الاستومر: شبکه‌بندی با اتصالات عرضی ضعیف
 ج) دورومر (پلاستیک ترموست): شبکه‌بندی با اتصالات عرضی قوی

شکل ۷-۲: اتصالات عرضی در کائوچو [۲۰]

^۱ Rubber

^۲ Chemorheological

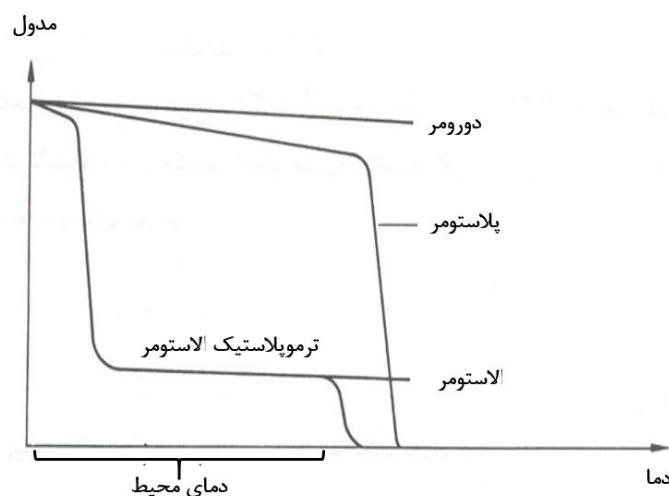
^۳ Plastomer

^۴ Thermoelast

^۵ Duomer

بنابراین، واژه‌های پلاستومر، ترموپلاست، الاستومر و دورومر، حالت‌های ویژه‌ی ماکرومولکولهای مواد را توضیح می‌دهند. با توجه به وابستگی درجه حرارت به مدول الاستیکی پلاستومرها (کائوچو)، الاستومرها و دورومرها، شکل ۲-۸ می‌تواند به صورت زیر تحلیل می‌شود.

به طور ایده‌آل، مدول الاستیک یک دورومر در محدوده‌ی وسیعی از دما تغییر نمی‌کند. از طرف دیگر، یک پلاستومر، جریان ترموپلاستیک را در ناحیه‌ی دمای ذوب شدن و بالاتر از آن، نشان می‌دهد، و مدول الاستیک آن تا نزدیک صفر کاهش می‌یابد. یک الاستومر نیز بعد از نرم شدن از یک فاز لاستیکی عبور می‌کند و یک مدول الاستیکی نسبتاً بالا را تا اینکه به دمای تجزیه برسد حفظ می‌کند. در ترموپلاستیک‌های الاستومرها که در سال‌های اخیر شناخته شده‌اند؛ اتصالات عرضی فیزیکی در دماهای بالا حل می‌شوند، اما دوباره با سرد شدن، بازیابی می‌شوند (به حالت اولیه باز می‌گردند). همانطور که مشاهده می‌شود، ترموپلاستیک‌های الاستومر این ویژگی را دارد که در بیش از یک دمای معینی، از فاز الاستومری به ماهیت ترموپلاستیک تغییر کند. یک الاستومر، مشابه کائوچو، به صورت زیر مشخص می‌شود [۲۰].



شکل ۲-۸: وابستگی مدول الاستیک و درجه حرارت در الاستومرها، پلاستومرها، دورومر و الاستومرهای ترموپلاستیک [۲۰]

مدول الاستیکی اغلب الاستومرها به 10^6 تا 10^8 dynes/cm^2 محدود می‌شود در حالی که برای پلیمرهای کریستالی حدود 10^{10} تا $10^{13} \text{ dynes/cm}^2$ یا بیشتر می‌باشد.

واژه‌ی الاستومر، که از الاستیک و پلیمر مشتق شده است، پلیمری است که دارای خواص ویسکوالاستیکی با مدول الاستیک پایین و کرنش تسلیم بالا می‌باشد. الاستومر از مونومرهای تشکیل

شده که با یکدیگر در ارتباط هستند و معمولاً از کربن، هیدروژن، اکسیژن و یا سیلیکون ساخته شده‌اند. لاستیک‌ها به طور گسترده‌ای به عنوان آب‌بندها، چسب، فنر، محافظ در برابر خوردگی و سایش، عایق الکتریکی و حرارتی استفاده می‌شود. براساس استاندارد ASTM D-۱۵۶۶، الاستومر ماده‌ای است که پس از تغییر شکل‌های بزرگ به سرعت و بدون نیاز به استفاده از نیروی خارجی به شکل اولیه خود بازمی‌گردد؛ همچنین قادر است درصد بالایی از ازدیاد طول قبل از شکست را تحمل کند. تحت تنش، الاستومرها به طور کلی ۳۰۰ تا ۵۰۰ درصد قبل از شکستن کشیده می‌شوند، که به عنوان مواد هایپرلاستیک شناخته می‌شوند. بیشتر الاستومرهای موجود با استفاده از یک فرایند قالب‌ریزی ساخته می‌شوند. لاستیک مورد استفاده برای فرایند قالب‌گیری با دیگر مواد شیمیایی (که به عنوان مواد افزودنی شناخته می‌شوند) مخلوط می‌شود و سپس حرارت داده شده، ذوب شده و درون قالب ریخته می‌شود. فرایند قالب‌ریزی براساس چرخه‌ی دما، فشار و زمان کنترل می‌شود [۴].

جدول ۱-۲ خواص مکانیکی الاستومرهای معمول را در مقایسه با دیگر مواد مهندسی نشان می‌دهد. مدول الاستیک پایین، ضریب پواسون حدود ۰/۵ (تراکم‌ناپذیر) و مقدار درصد بالای تغییر طول قبل از شکست از مشخصه‌های الاستومرها می‌باشد.

جدول ۱-۲: مقایسه خواص مکانیکی الاستومرها با دیگر مواد مهندسی [۴]

ماده	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	تنش کششی نهایی (MPa)	درصد تغییر طول قبل از شکست (%)	هدایت حرارتی (W/m K)
الاستومرها	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۰۷	۰/۴۷ - ۰/۵	۷ - ۲۰	۱۰۰ - ۸۰۰	۰/۱۳ - ۰/۱۶
آلیاژهای آلومینیوم	۷۰ - ۷۹	۰/۳۳	۱۰۰ - ۵۵۰	۱ - ۴۵	۱۷۷ - ۲۳۷
فولادها با درجه استحکام بالا	۱۹۰ - ۲۱۰	۰/۲۷ - ۰/۳	۵۵۰ - ۱۲۰۰	۵ - ۲۵	۳۵ - ۶۰
آلیاژهای تیتانیوم	۱۰۰ - ۱۲۰	۰/۳۳	۹۰۰ - ۱۲۰۰	۱۰	۷ - ۷/۵
نایلون	۲/۱ - ۳/۴	۰/۴	۴۰ - ۸۰	۲۰ - ۱۰۰	۰/۳

۲-۸-۳ الاستومرهای مورد استفاده در فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان [۴]

الف) لاستیک طبیعی

بسیاری از درخت‌ها، درختچه‌ها و حتی بوته‌ها هستند که شیرهایی شبیه به شیر تولید می‌کنند که لاتکس^۱ نامیده می‌شود. لاتکس شامل یک محلول کلئیدی کائوچوی پخش شده در یک واسطه‌ی مایع می‌باشد. درخت تولیدکننده‌ی لاتکس، هو آی برزیلی^۲ است. لاستیک طبیعی^۳ از لاتکس این درخت مشتق شده است. بزرگترین کاربرد لاستیک طبیعی در لاستیک خودرو است. لاستیک طبیعی، زمانی که ولکانیزه شده، مولکول‌های شبه-زنجیره‌ای طولانی خواهد داشت که به وسیله پیوندهای عرضی با یکدیگر ارتباط تنگاتنگی دارند و تشکیل یک شبکه مولکولی می‌دهند. برای افزایش سختی و مقاومت به سایش، فیلرهای ساخته شده از کربن و سیلیکا در طی چرخه تولید به آن اضافه شده است.

ب) لاستیک استایرن- بوتادین

لاستیک استایرن- بوتادین^۴ یک لاستیک مصنوعی کوپلیمر ساخته شده از ترکیب استایرن و بوتادین است. معمولاً به دلیل مقاومت خوب در برابر سایش به هنگام ساخت لاستیک خودرو با لاستیک طبیعی مخلوط می‌شود.

ج) لاستیک سیلیکون

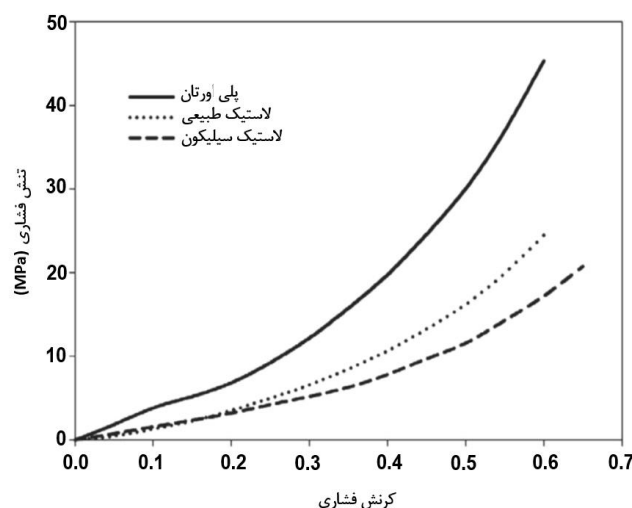
لاستیک سیلیکون^۵ الاستومرهای معدنی مصنوعی ساخته شده از پلیمر سیلیکون می‌باشد که حاوی سیلیکون، کربن، هیدروژن و اکسیژن است. این نوع لاستیک برای قالب‌گیری تزریق مناسب است. خواص لاستیک سیلیکون در دماهای بالا عالی است و همچنین دارای طیف گسترده‌ای از سختی ۱۰ تا ۸۰ شور است.

د) پلی‌اورتان

پلی‌اورتان‌ها پلیمرهای خطی هستند که شامل گروه‌های کاربامات^۶ (-NHC0_2) می‌باشد. پلیمرهای پلی‌اورتان از طریق یک واکنش شیمیایی دی‌ایزوسیانات^۷ و پلی‌ال^۸ تولید می‌شود. مزایای بسیاری برای

^۱ Latex^۲ Brasiliensis Hevea^۳ Natural Rubber^۴ Styrene-Butadiene Rubber^۵ Silicone Rubber^۶ Carbamate^۷ Diisocyanate^۸ Polyol

پلی‌اورتان وجود دارد؛ مقاومت به سایش بالای آن، که در چرخ‌های زیر میز و صندلی استفاده می‌شوند. همچنین ظرفیت تحمل بار بالا در مقایسه با سایر لاستیک‌ها باعث شده تا به‌طور گسترده‌ای در فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان استفاده شود. با توجه به خواص میرایی خوب، پلی‌اورتان‌های سخت به عنوان چرخ‌دنده به‌منظور کاهش سر و صدا استفاده می‌شوند. به‌طور کلی سه شکل مختلف از پلی‌اورتان وجود دارد؛ فوم‌ها، پوشش‌ها^۱ و الاستومرها. بزرگترین بازار برای پلی‌اورتان، فوم انعطاف‌پذیر مورد استفاده در زیرسازی مبلمان است. فوم پلی‌اورتان نیمه‌انعطاف‌پذیر در داشبورد و خطوط دور درب اتومبیل استفاده می‌شود. به‌طور کلی محدوده دمای سودمند پلی‌اورتان 30°C تا 70°C است. اگرچه برای کاربردهای خاص از پلی‌اورتان‌های مقاوم در دمای بالا (70°C تا 260°C) استفاده می‌شود.



شکل ۲-۹: مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش الاستومرهای مختلف [۴]

منحنی‌های تنش-کرنش فشاری برای لاستیک سیلیکون، لاستیک طبیعی و پلی‌اورتان با سختی‌های یکسان در شکل ۲-۹ مقایسه شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، پلی‌اورتان را می‌توان فراتر از محدودیت‌های متداول که برای انواع لاستیک‌ها وجود دارد، بارگذاری کرد. این ظرفیت تحمل بار بالا، طراحی قطعات کوچکتر به‌منظور صرفه‌جویی در وزن و هزینه‌ی مواد را ممکن می‌سازد. البته باید توجه داشت که در خصوص مواد لاستیکی منحنی تنش-کرنش به ضریب شکل^۲ وابسته است. ضریب شکل نسبت مساحت سطح بارگذاری شده به مساحت سطوح بدون بار است که به‌صورت آزاد بالچ می‌شوند. ضریب شکل در خصوص بالشتک‌های مکعبی و استوانه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

^۱ Coatings

^۲ Shape factor

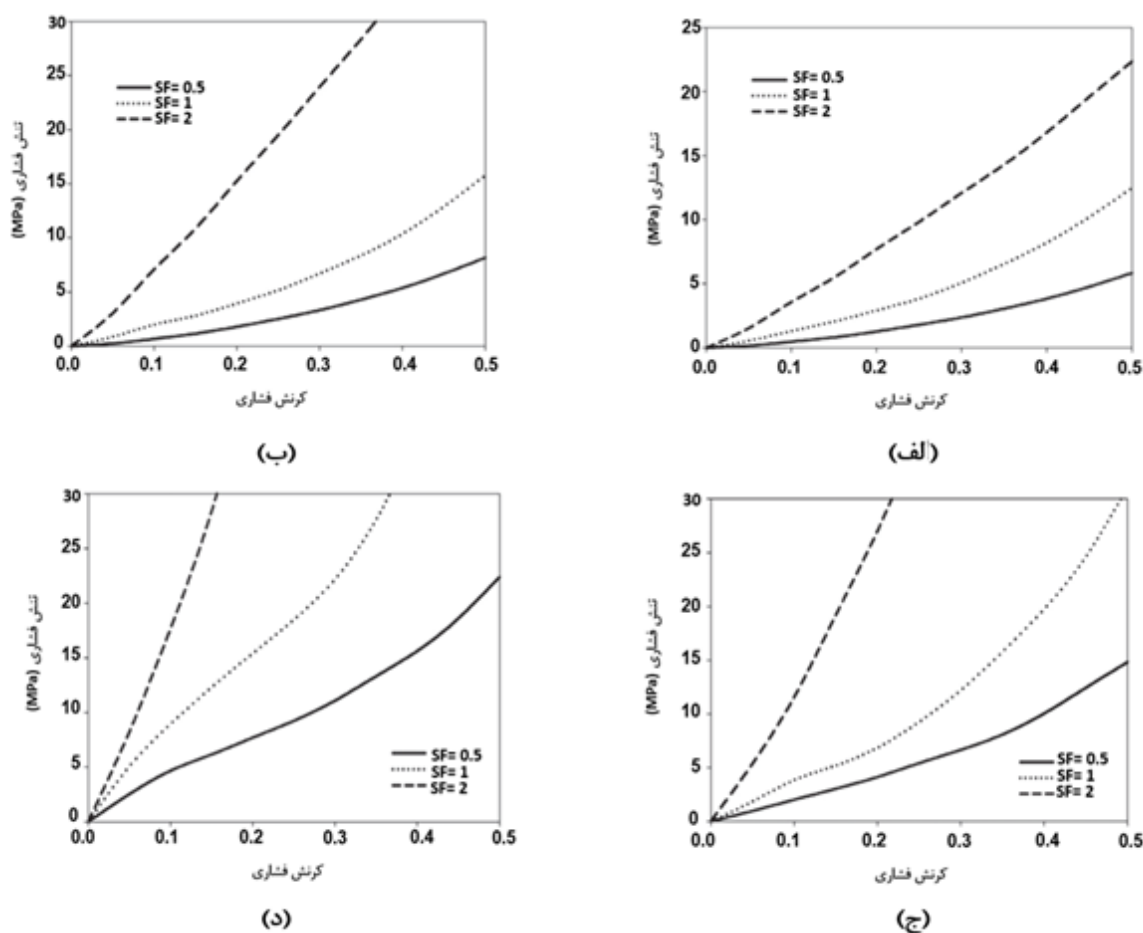
- برای بلوک‌های مکعبی شکل

$$SF = \frac{LW}{2t(L+W)} \quad (۱-۲)$$

- برای دیسک‌ها و استوانه‌های جامد

$$SF = \frac{d}{4h} \quad (۲-۲)$$

L ، W و t به ترتیب طول، عرض و ارتفاع (ضخامت) بلوک مکعبی؛ همچنین d و h به ترتیب قطر و ارتفاع دیسک استوانه‌ای می‌باشد.



شکل ۲-۱۰: مقایسه رفتار تنش-کرنش پلی‌اورتان تحت فشار با ضرایب شکل متفاوت

(الف) سختی ۶۰، (ب) سختی ۷۰، (ج) سختی ۸۰، (د) سختی ۹۰ شور A [۴]

شکل ۲-۱۰ اثر ضریب شکل و سختی بر روی رفتار تنش-کرنش پلی‌اورتان تحت فشار را نشان می‌دهد.

۹-۲ مدل‌های ریاضی رفتار الاستومر [۴]

سه روش برای مطالعه الاستیسیته الاستومرها وجود دارد. روش اول روش ترمودینامیکی^۱، که بر روی رفتار ماکروسکوپی مواد تمرکز دارد. دوم، روش‌های آماری^۲ است که از مکانیک آماری برای توصیف رفتار دینامیک مولکولی استفاده می‌کند و روش سوم پدیدارشناسانه^۳ است که رفتار الاستیسیته‌ی مشاهده شده برای تغییر شکل‌های بزرگ را از طریق داده‌های تجربی با معادلات ریاضی توصیف می‌کند. زمانی که الاستومر تغییر شکل پیدا می‌کند، انرژی الاستیک ذخیره شده را می‌توان با حالت‌های کرنش شرح داد که توسط سه نسبت کشش اصلی^۴ λ_1 ، λ_2 و λ_3 توصیف می‌شود. تابع پتانسیل یا چگالی انرژی کرنشی^۵ (انرژی کرنشی ذخیره شده در واحد حجم) معمولاً با ترم‌هایی از ثوابت تانسور تغییر شکل نوشته می‌شود. چندین مدل چندجمله‌ای برای نشان دادن این تابع مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ از جمله آردا-بویس^۶، مونی-ریولین^۷، نئو-هوکن^۸، اوگدن^۹، چندجمله‌ای^{۱۰}، چندجمله‌ای کاهش‌یافته^{۱۱}، یئو^{۱۲} و واندروالس^{۱۳}. به طور کلی مدل‌های ریاضی رفتار الاستومرها را می‌توان در دو گروه چندجمله‌ای و مدل‌های غیرچندجمله‌ای^{۱۴} طبقه‌بندی کرد.

مدل‌های چندجمله‌ای شامل مونی-ریولین و چندجمله‌ای کاهش‌یافته می‌باشد که مدل‌های یئو و نئو-هوکن یک زیر مجموعه‌ای از مدل چندجمله‌ای کاهش‌یافته می‌باشند. انتخاب مدل برای استفاده در تجزیه و تحلیل به در دسترس بودن داده‌های تجربی بستگی دارد. براساس داده‌های آزمون‌هایی مانند آزمون تنش تک محوری یا آزمون فشار، مدل‌های آردا-بویس، واندروالس و یا مدل‌هایی از چندجمله‌ای

^۱ Thermodynamic^۲ Statistical approach^۳ Phenomenological^۴ Principle stretch ratio^۵ Strain energy density^۶ Arruda-Boyce^۷ Mooney-Rivlin^۸ Neo-Hookean^۹ Ogden^{۱۰} Polynomial^{۱۱} Reduced polynomial^{۱۲} Yeoh^{۱۳} Van der Waals^{۱۴} Non-polynomial

کاهش یافته ارتباط بهتری خواهد داشت. با در دسترس بودن داده‌های هر دو آزمون تک‌محوره و دوماحوره، مدل‌های اوگدن و واندروالس دقیق‌تر خواهند بود.

پتانسیل انرژی کرنش الاستومرها، W ، می‌تواند در قالب چندجمله‌ای زیر نوشته شود:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} J_1^i J_2^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} J_3^{2i} \quad (۳-۲)$$

$$J_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3 \quad J_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 - 3 \quad J_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 - 1$$

که در آن C_{ij} و D_i ثابت هستند. پارامتر N می‌تواند تا عدد شش باشد.

برای $N = 1$ ، مدل مونی-ریولین تولید می‌شود:

$$W = C_1 J_1 + C_2 J_2 + \frac{1}{D_1} J_3^2 \quad (۴-۲)$$

از معادله بالا، تنها ترم‌های خطی از انرژی کرنشی انحرافی^۱ حفظ شده است.

مدل چندجمله‌ای کاهش یافته، با قرار دادن $J = 0$ در همه C_{ij} ها که $J \neq 0$ است طبق معادله (۴-۲) بدست می‌آید:

$$W = \sum_{i=1}^N C_i J_1^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} J_3^{2i} \quad (۵-۲)$$

مدل یئو، نوع خاصی از مدل چندجمله‌ای کاهش یافته با $N = 3$ است:

$$W = C_1 J_1 + C_2 J_1^2 + C_3 J_1^3 + \frac{1}{D_1} J_3^2 + \frac{1}{D_2} J_3^4 + \frac{1}{D_3} J_3^6 \quad (۶-۲)$$

ساده‌ترین شکل زمانی است که $N = 1$ و $C_2 = 0$ ، که به تولید مدل نئو-هوکن منجر می‌شود:

$$W = C_1 J_1 + \frac{1}{D_1} J_3^2 \quad (۷-۲)$$

^۱ Deviatoric

پتانسیل انرژی کرنش نئو-هوکن ساده‌ترین مدل هایپرالاستیک است. پتانسیل انرژی کرنش اوگدن طبق رابطه زیر داده می‌شود:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} J_3^{2i} \quad (۸-۲)$$

اگر $N = 2$ ، $\alpha_1 = 2$ و $\alpha_2 = -2$ باشد، مدل مونی-ریولین؛ و اگر $N = 1$ و $\alpha_1 = 2$ ، مدل اوگدن هم‌ارز با مدل مواد نئو-هوکن خواهد شد.

برای مدل آرودا-بویس، پتانسیل انرژی کرنش به صورت زیر داده می‌شود (آرودا-بویس، ۱۹۹۳):

$$W = C_1 \left[\frac{1}{2} (I_1 - 3) + \frac{1}{20C_2^2} (I_1^2 - 9) + \frac{11}{1050C_2^4} (I_1^3 - 27) + \frac{19}{7000C_2^6} (I_1^4 - 81) + \frac{519}{673750C_2^8} (I_1^5 - 243) \right] + \frac{1}{D_1} \left(\frac{I_3^2 - 1}{2} - \ln I_3 \right) \quad (۹-۲)$$

مدل بالا تنها به ثابت اول بستگی دارد. یک تفسیر فیزیکی بیان می‌کند که تحت تغییرشکل هشت زنجیر به مقدار یکسان کشیده می‌شوند. ثابت اول، $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$ ، به طور مستقیم نشان دهنده این افزایش طول است. تعیین مدل مورد استفاده به عوامل مختلف مانند: نوع کاربرد، نرخ کرنش، در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز و غیره بستگی دارد. ثابت مواد برای مواد لاستیکی به جنبه‌های مختلف از جمله مقدار کرنش، نوع تغییرشکل، سرعت و تاریخچه‌ی بارگذاری بستگی دارد.

یکی از چالش‌ها در بدست آوردن داده‌های تجربی قابل اعتماد، اثر نرم شدن لاستیک در چند سیکل اول است که به عنوان اثر مولین^۱ شناخته می‌شود. مدل‌های هایپرالاستیک که در بالا ذکر شد به طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی المان محدود لاستیک و فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان استفاده می‌شود. روش المان محدود (FEM) یک تکنیک عددی قوی است که می‌توان از آن برای بدست آوردن رفتار و مکانیزم‌های تغییرشکل قطعه کار و ابزار در طول فرایند شکل‌دهی استفاده کرد. بر خلاف روش‌های تحلیلی، این روش اجازه تجزیه و تحلیل تغییرشکل‌های پیچیده و فرایندهای شکل‌دهی را بدون

^۱ Mullin

نیاز به حل معادلات پیچیده می‌دهد. تعداد زیادی از نرم‌افزارهای تجاری FEM مانند: ABAQUS، ANSYS، DYNA3D و NASTRAN را می‌توان برای شبیه‌سازی المان محدود فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان و پیش‌بینی نقص‌های ممکن در فرایند مانند چروکیدگی و پارگی استفاده کرد.

۲-۹-۱ معادله رفتاری مونی-ریولین و نحوه تعیین ثوابت آن

در تابع چگالی انرژی کرنشی (W) مواد لاستیکی دارای سه ثابت کرنش I_1, I_2, I_3 می‌باشد؛ که این ثوابت در واقع ثوابت^۱ تانسور کوشی-گرین می‌باشد.

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (۱۰-۲)$$

تابع چگالی انرژی کرنش می‌تواند به صورت تابعی خطی از $(I_1 - 3)$ و $(I_2 - 3)$ نوشته شود.

$$W = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (۱۱-۲)$$

که در آن C_{ij} ثوابت ماده می‌باشد. در مدل مونی-ریولین از دو ثابت استفاده می‌شود.

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (۱۲-۲)$$

همانطور که بیان شد؛ λ_i نسبت کشش/فشار اصلی در جهت i ام می‌باشد. بنابراین ثوابت C_{ij} در تابع چگالی انرژی کرنش را می‌توان به این صورت بیان کرد:

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \\ I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2, \\ I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{cases} \quad (۱۳-۲)$$

برای مواد تراکم‌ناپذیر مقدار $I_3 = 1$ می‌باشد. همچنین ثوابت مدل رفتاری مونی-ریولین در کرنش ۱۰۰٪ کششی و یا ۳۰٪ فشاری استخراج می‌شود.

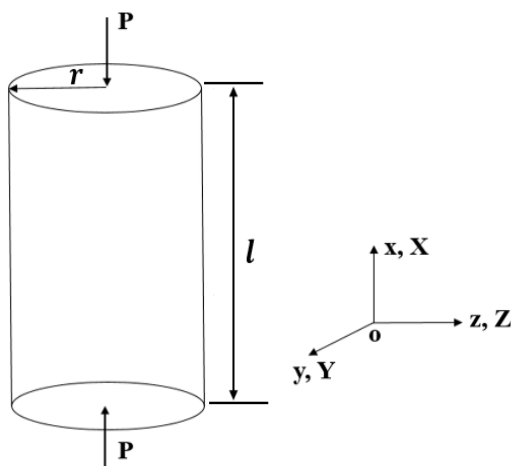
^۱ Invariant

در شکل زیر یک نمونه استوانه‌ای شکل را تحت فشار تک محوری به صورت شماتیک مشاهده می‌کنید. طول و شعاع استوانه در هر مرحله از تغییر شکل به ترتیب l و r خواهد بود؛ همچنین طول و شعاع اولیه استوانه L و R می‌باشد. با استفاده از سیستم مختصات مشخص شده در شکل ۲-۱۱ می‌توان نوشت که [۲۱]:

$$\begin{cases} x = \lambda_1 X \\ y = \lambda_2 Y \\ z = \lambda_2 Z \end{cases} \quad (۲-۱۴)$$

همچنین λ_1 و λ_2 به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{l}{L} \\ \lambda_2 = \frac{r}{R} \end{cases} \quad (۲-۱۵)$$



شکل ۲-۱۱: شماتیک یک استوانه تحت فشار

با استفاده از روابط ۲-۱۴ و ۲-۱۵ تانسور کوشی-گرین راست می‌تواند به این صورت بیان شود:

$$C = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2^2 \end{bmatrix} \quad (۲-۱۶)$$

می توان تابع چگالی انرژی کرنش را همانطور که ذکر شد با ثوابت تانسور گوشه-گرین تعریف کرد؛ که در آن $I_1 = tr C$, $I_2 = [(tr C)^2 - tr C^2]/2$ ؛ پس می توان رابطه تنش پیولا-کیرشهف^۱ را به صورت زیر بیان کرد.

$$S = \frac{\partial W}{\partial E} = 2 \frac{\partial W}{\partial C} \quad (۱۷-۲)$$

که در آن S تانسور تنش پیولا-کیرشهف دوم، E تانسور کرنش گرین^۲ و C تانسور گوشه-گرین راست^۳ می باشد. لازم به ذکر است که بین E و C رابطه زیر برقرار می باشد؛ که در آن I تانسور واحد مرتبه دوم است.

$$E = \frac{1}{2}(C - I) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \lambda_1^2 - 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 - 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 - 1 \end{bmatrix} \quad (۱۸-۲)$$

معادله ساختاری برای مواد تراکم ناپذیر را می توان به صورت:

$$\sigma = -pI + 2(c_1 C - c_2 C^{-1}) \quad (۱۹-۲)$$

که σ تانسور تنش گوشه، p فشار هایدرواستاتیک و C تانسور کرنش گرین است؛ تعریف کرد. همچنین در کشش یا فشار تک محور:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2} \\ \sigma_{11} = \sigma, \sigma_{22} = \sigma_{33} = 0 \end{cases} \quad (۲۰-۲)$$

پس معادله ساختاری به این ترتیب بیان می شود:

$$\sigma = 2(\lambda^2 - \lambda^{-1})(c_1 + c_2 \lambda^{-1}) \quad (۲۱-۲)$$

پارامتر B به صورت زیر تعریف می شود:

^۱ Piola-Kirchhoff

^۲ Green

^۳ Right Cauchy-Green

$$B = \frac{\sigma}{2(\lambda^2 - \lambda^{-1})} = c_1 + c_2 \lambda^{-1} \quad (22-2)$$

می‌توان دید که نمودار B بر حسب λ^{-1} خطی است؛ که C_2 شیب خط و C_1 عرض از مبدا آن می‌باشد. پس می‌توانیم به آسانی ضرایب مونی-ریولین را از طریق شیب منحنی^۱ بدست آوریم [۲۲].

^۱ Intercept and Slope

فصل ۳ مواد و روش تحقیق عددی و تجربی

۳-۱ روش المان محدود

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 LS-DYNA3D، ANSYS و ABAQUS اشاره کرد. به علت قابلیت‌های بالای نرم‌افزار آباکوس نسبت به سایر نرم‌افزارهای اجزای محدود، در این پژوهش از حلگر صریح^۲ نرم‌افزار آباکوس ۱۲-۶ برای انجام شبیه‌سازی استفاده شده 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.

۳-۱-۱ معرفی حلگر صریح نرم‌افزار آباکوس

این حلگر محصولی با اهداف ویژه است که برای مدل‌سازی مسائل دینامیکی گذرا مانند برخورد و ضربه‌ی انفجار، آزمایش ضربه و همچنین مسائل شبه استاتیکی یا مسائل غیرخطی که در آنها شرایط

^۱ Finite element method (FEM)

^۲ Explicit solver

تماس تغییر می‌کند (مانند شکل‌دهی) مناسب است. این محصول، دستگاه معادلات حاکم را بر پایه قانون انتگرال‌گیری صریح^۱ به همراه استفاده از ماتریس جرم قطری المان تحلیل می‌کند. در این روش تعیین اندازه نمو در مسایل غیرخطی توسط کاربر ممکن نبوده و نرم‌افزار بر اساس شرایط پایداری، میزان نمو در هر مرحله را به صورت اتوماتیک محاسبه می‌کند.

با توجه به قابلیت بالای حلگر صریح در مسائل پیچیده تماسی از آن برای حل مسائل شبه استاتیکی استفاده می‌شود. دو تکنیک سریع حل برای مسائل در این حلگر وجود دارد، یکی تکنیک افزایش سرعت^۲ و دیگری بزرگنمایی جرم^۳ می‌باشد. باید در نظر داشته باشیم که نسبت بزرگنمایی استفاده شده توسط کاربر باعث سریع‌تر حل شدن مسئله شود، در حالی که باعث وارد شدن اثرات دینامیکی در مسئله نگردد. نتایج حلگر صریح برای مسائل شبه استاتیکی با دو شرط قابل استناد است: اولاً انرژی جنبشی کسر کوچکی از انرژی کل داخلی باشد (کمتر از ۵ درصد)؛ ثانیاً تغییرات انرژی جنبشی فرایند باید دارای رفتاری غیر نوسانی و نسبتاً مرتبط با هندسه فرایند باشد.

۳-۱-۲ مدل‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق

در این پژوهش نرم‌افزار *ABAQUS/EXPLICIT 6.12.1* جهت انجام شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است و شبیه‌سازی شامل پنج قسمت مجزا است که در هر یک از آن‌ها هدف مشخصی دنبال می‌شود.

مدل‌سازی سری اول: مدل‌سازی سه‌بعدی مجموعه قالب انبساط‌دهی لوله به روش *RPF* با هدف طراحی اجزای قالب و پیش‌بینی خطر شکست و یا تسلیم احتمالی اجزاء قالب صورت گرفت.

مدل‌سازی سری دوم: مدل‌سازی سه‌بعدی فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله درزدار به روش *HF* که با هدف محاسبه‌ی خواص شکست لوله شامل ضریب نقص مکانیکی در ناحیه درز لوله و ثوابت شروع و رشد آسیب انجام شد.

^۱ Explicit

^۲ Time scale

^۳ Mass scale

مدل‌سازی سری سوم: به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف ذاتی و محیطی فرایند RPF بر موفقیت محصول از مدل‌سازی دو بعدی متقارن محوری فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله بدون درز و روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده و غربال‌سازی عوامل مسئله صورت پذیرفت.

مدل‌سازی سری چهارم: آزمون‌های برگزیده از فرایند انبساط‌دهی لوله درزدار با روش RPF به صورت کامل مدل‌سازی گردید. خواص شکست لوله نیز بر طبق نتایج مدل‌سازی سری دوم اعمال شد.

مدل‌سازی سری پنجم: شکل‌دهی قطعه بادامک با استفاده از روش RPF همانند قبل با اعمال خواص شکست مدل‌سازی و به‌منظور امکان‌سنجی شکل‌دهی این نوع لوله فولادی انجام شد. به‌منظور مدل‌سازی مجموعه قالب و لوله در هر یک از قسمت‌ها، مراحل مختلفی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شده است که این مراحل در ادامه به ترتیب توضیح داده خواهد شد.

۳-۱-۳ مدل‌سازی سری اول: تحلیل تنش سه‌بعدی اجزای قالب انبساط‌دهی با بالشتک کشسان به روش المان محدود

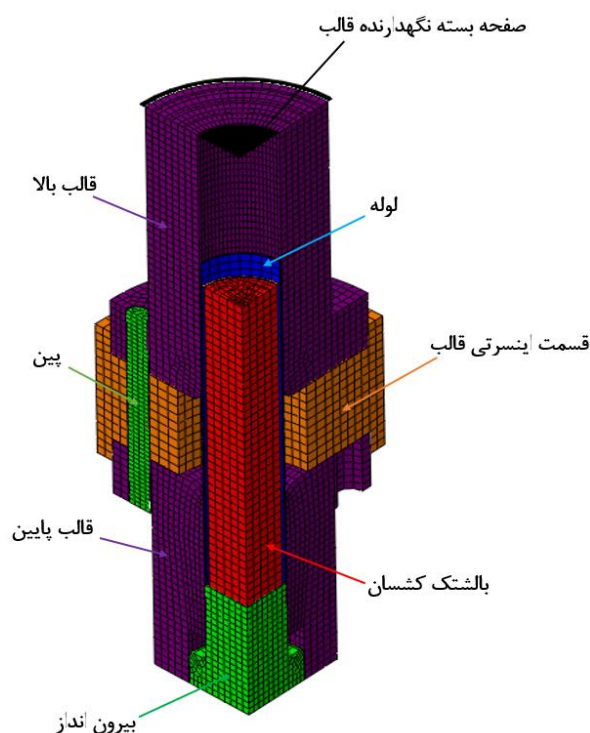
با توجه به پیچیدگی فرایند RPF ، تحلیل تنش اجزای قالب به منظور ایجاد اطمینان خاطر از سلامت آن با روش تحلیل اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شد. شرح مختصری تعریف اولیه مدل که در محیط $Abaqus/CAE$ انجام شده است در ذیل آمده است.

أ) ایجاد مدل هندسی

در این پژوهش از مدل سه‌بعدی اجزای قالب استفاده شد. به دلیل تقارن محوری اجزای قالب، یک‌چهارم مجموعه‌ی قالب به همراه لوله و بالشتک کشسان مدل شد. تمامی اجزای اصلی قالب از نوع شکل‌پذیر^۱ انتخاب شد. به‌منظور جابه‌جایی بالشتک کشسان و همچنین بسته نگه‌داشتن قالب از دو صفحه که به صورت صلب گسسته^۲ مدل شده‌اند، استفاده شده است. در ادامه به هر یک از اجزای صلب یک نقطه مرجع اختصاص داده شد تا به‌منظور تعریف شرایط مرزی از آن استفاده شود. در شبیه‌سازی‌ها ضخامت لوله برابر با اندازه واقعی آن یعنی ۰/۷۵ mm و طول آن ۱۵۰ mm در نظر گرفته شد. در شکل ۱-۳ مدل ترسیم شده اجزای قالب نشان داده شده است. نقشه‌ی مونتاژی و اجزای قالب در پیوست پایان‌نامه ارائه شده است.

^۱ Deformable

^۲ Discrete rigid



شکل ۳-۱: هندسه و نحوی استقرار اجزای قالب

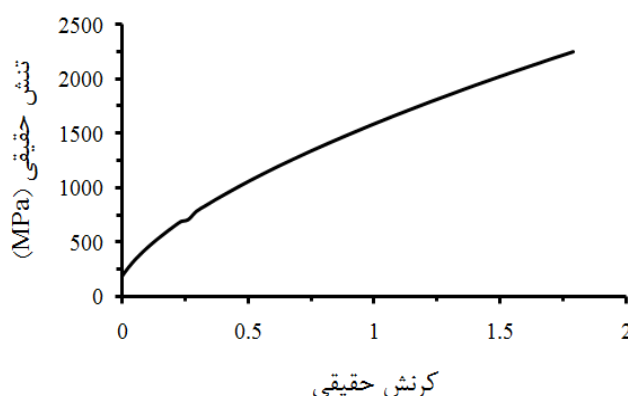
ب) تعیین خصوصیات لوله و اجزای قالب

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله در واحد خواص^۱ 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 ۳-۱ و شکل ۳-۲ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله به نرم‌افزار اعمال گردید. لوله‌ی فولادی استفاده شده در آزمایش هموزن و همسانگرد در نظر گرفته شد. تمامی اجزای قالب به صورت کاملاً الاستیک از جنس فولاد CK۴۵، با خواص ذکر شده در جدول ۳-۱ مدل‌سازی شد.

جدول ۳-۱: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله فولادی و اجزای قالب [۲۳]

جنس	چگالی (kg/m ³)	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون
فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴	۷۹۳۰	۲۰۰	۲۱۵	۰/۲۹
فولاد CK۴۵	۷۸۰۰	۲۱۰	۴۳۰	۰/۳۳

^۱ Property



شکل ۳-۲: منحنی تنش-کرنش لوله فولادی [۲۳]

ج) مونتاژ لوله و اجزای قالب

پس از مشخص کردن خصوصیات مکانیکی، در واحد مونتاژ^۱ قطعه‌های مربوطه فراخوانی شده و در محل مناسب نسبت به سایر قطعه‌ها مستقر می‌شوند. شکل ۳-۱ چگونگی استقرار اجزای مجموعه قالب را نشان می‌دهد.

د) تعیین تعداد مراحل و نوع حل مسئله

در این پژوهش انجام شبیه‌سازی فرایند در یک گام^۲ تنظیم گردید که در آن ابتدا سنبه ثابت بوده و جابه‌جایی بالشتک کشسان فشار داخلی مورد نیاز برای انبساط‌دهی لوله را ایجاد می‌کند. با توجه به نوع فرایند که در حالت سرد انجام می‌شود و تغییر شکل زیاد ماده، از گزینه حل صریح دینامیکی^۳ برای تحلیل استفاده شد. برای کاهش زمان محاسبات، در استفاده از حلگر صریح زمان تحلیل به میزان کسری از زمان واقعی فرایند، برابر ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شد و همواره دقت شد تا مقدار انرژی جنبشی تغییر شکل در کسر کوچکی از انرژی داخلی شکل‌دهی باشد 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 تأثیری در مکانیک فرایند شکل‌دهی نخواهد داشت [۲۴].

^۱ Assembly

^۲ Step

^۳ Dynamic Explicit

ه) تعیین نوع تماس سطوح اجزا با هم

شرایط تماسی بین سطوح مختلف مسئله را می‌توان در واحد برهم‌کنش^۱ تعریف کرد که در این واحد ابتدا مشخصات فیزیکی تماس و سپس نوع تماس تعریف می‌شود. مشخصات تماس بکار رفته در این پژوهش تماس سطح به سطح^۲ است.

و) شرایط مرزی و بارگذاری

در واحد بار^۳، 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 سطوح قالب و بالشتک کشسان و لبه‌های لوله اعمال می‌شود. نوع دوم قید جابجایی است که برای محدود کردن درجه‌های آزادی قالب پایین و بیرون‌انداز، همچنین برای جابه‌جایی بالشتک کشسان اعمال می‌شود. در این پژوهش جابه‌جایی ۵۰ mm برای بالشتک در نظر گرفته شد. قید سوم مربوط به بارگذاری است که به صفحه نگهدارنده قالب وارد می‌شود. مقدار جابه‌جایی در قسمت دامنه^۴ به صورت جدولی^۵ که در آن مقدار جابه‌جایی بالشتک در طول گام شکل‌دهی، با ضریبی از جابه‌جایی بیشینه بالشتک مشخص گردید، به نرم‌افزار وارد شد.

ز) شبکه‌بندی

شبکه‌بندی لوله، بالشتک و قالب در واحد شبکه^۶ 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، بالشتک کشسان و اجزای قالب از نوع C3D8R است که یک المان پیوسته هشت گره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته می‌باشد. برای شبکه‌بندی صفحه نگهدارنده قالب و سنبه از المان نوع R3D4 که یک المان صلب سه‌بعدی چهار گره‌ای است؛ 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

^۱ Interaction

^۲ Surface to surface

^۳ Load

^۴ Amplitude

^۵ Tabular

^۶ Mesh

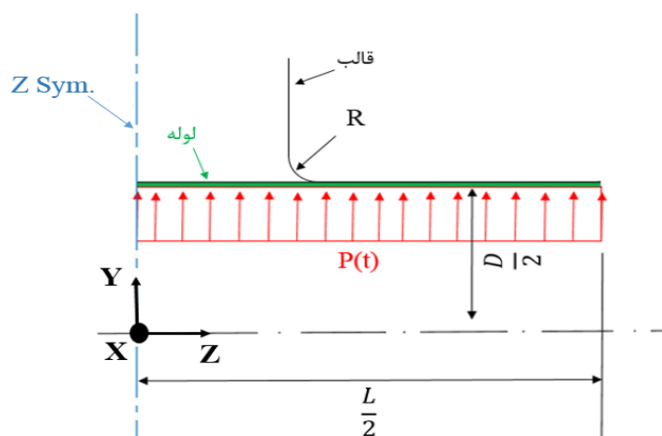
می‌دهد و استفاده از المان‌های بزرگ مانع همگرایی مسئله شده و دقت مناسب حاصل نمی‌گردد. مقدار $2/5 \text{ mm}$ برای طول المان‌های لوله و تعداد ۴ المان در ضخامت لوله انتخاب شد.

۳-۱-۴ مدل‌سازی سری دوم: محاسبه خواص شکست لوله به کمک مدل‌سازی هیدروبالجینگ لوله درزدار

در این بخش به بررسی عددی تحلیل شکست نرم پیش‌رونده در لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ درزدار، تحت انبساط‌دهی آزاد به کمک فشار روغن پرداخته شده است. شکست در هیدروفرمینگ لوله، در مقایسه با کمانش و چین‌خوردگی غیر قابل جبران است. در تحلیل عددی ناحیه درز جوش به عنوان یک نقص مکانیکی مدل‌سازی گردید. به منظور مدل‌سازی شروع آسیب از معیار FLD و متغیر جابه‌جایی پلاستیک موثر با تغییرات خطی برای مدل‌سازی رشد آسیب استفاده شد.

ا) شرح مدل عددی

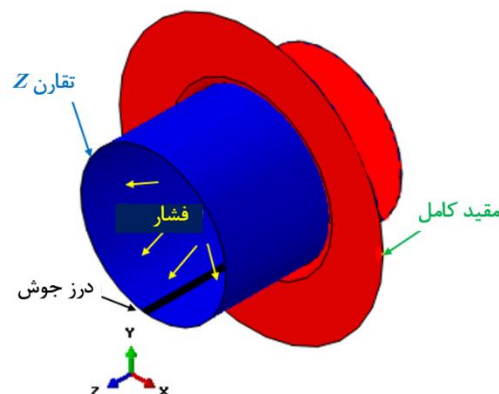
در تحقیق حاضر از مدل‌سازی المان محدود فرایند هیدروبالجینگ با کمک نرم‌افزار تجاری آباکوس ۱-۶،۱۲ استفاده شده است. لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ دارای ضخامت $0/75 \text{ mm}$ ، قطر و ارتفاع به ترتیب ۳۸ و ۱۰۰ میلی‌متر جهت انجام شبیه‌سازی می‌باشد. شماتیک مدل شبیه‌سازی در شکل ۳-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۳: شماتیک فرایند بالجینگ لوله

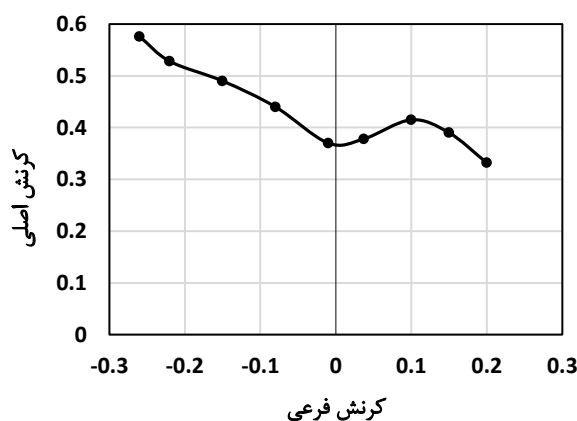
برای کاهش زمان تحلیل نیمی از مدل طراحی و از قید تقارن صفحه‌ای استفاده شد. فشار داخلی سیال به صورت تابع گام نرم با مقدار بیشینه‌ی ۳۸ مگاپاسکال تنظیم شد. برای تماس بین لوله و قالب ضریب اصطکاک $0/06$ در نظر گرفته شده است [۲۵]. در این شبیه‌سازی از حلگر دینامیکی صریح با تکنیک

کمکی بزرگنمایی سرعت برای کاهش زمان تحلیل استفاده شده است. لوله با المان‌های تغییرشکل‌پذیر پوسته‌ای S4R مدل شده و قالب صلب در نظر گرفته شده است. شکل ۳-۴ نحوه‌ی مدل‌سازی، مونتاژ و قیدگذاری لوله درزدار را در قالب نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۴: مجموعه قالب و لوله به صورت سه‌بعدی

چگالی فولاد 7800 kg/m^3 ، ضریب پواسون 0.33 و مدول یانگ 210 GPa است. از معیار تسلیم ون-میسز برای توصیف تسلیم لوله‌ی همسانگرد استفاده می‌شود. از منحنی تنش-کرنش پلاستیک لوله که با استفاده از آزمون کشش لوله؛ مطابق با استاندارد ASTM-A370 بدست آمده است (شکل ۳-۲)؛ و همچنین به منظور تامین پارامترهای مربوط به شکست نرم لوله از نمودار حد شکل‌دهی مطابق شکل ۳-۵ استفاده شد [۲۳].

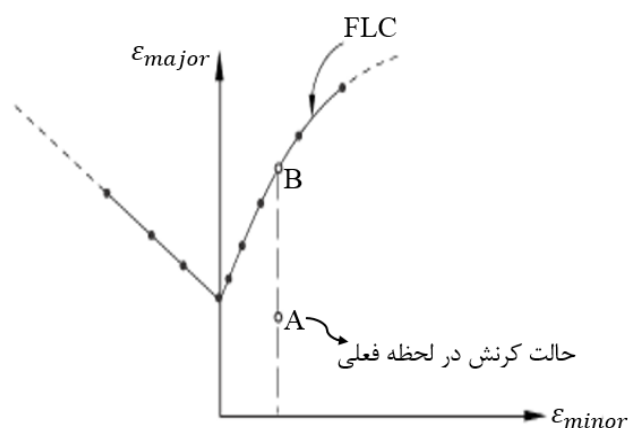


شکل ۳-۵: نمودار حد شکل‌دهی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ [۲۳]

ب) تحلیل شکست نرم به کمک نمودار حد شکل‌دهی

FLD مفهومی است که اولین بار توسط کیلر و بکفن (۱۹۶۴) ارائه شد. این نمودار میزان تغییرشکلی را که یک ورق فلزی می‌تواند قبل از شروع ناپایداری گلوبی شدن تحمل کند، تعیین می‌کند.

معیار شروع شکست FLD نیاز به مشخصات منحنی حد شکل‌دهی دارد. به منظور تعریف FLD می‌توان کرنش اصلی را بر حسب کرنش فرعی، دمای فرایند و دیگر متغیرهای فرایند به صورت $\varepsilon_{major}^{FLD}(\varepsilon_{minor}, \theta, f_i)$ وارد کرد.



شکل ۳-۶: نمودار حد شکل‌دهی

در این روش متغیر شکل‌پذیری تحت عنوان w_{FLD} طبق رابطه ۳-۱ بیان می‌شود. متغیر w_{FLD} یک تابعی از حالت تغییرشکل فعلی می‌باشد که به عنوان نسبت کرنش اصلی در حال حاضر، به کرنش اصلی بر روی منحنی حد شکل‌دهی تعریف شده و به صورت زیر ارائه می‌گردد.

$$w_{FLD} = \frac{\varepsilon_{major}}{\varepsilon_{major}^{FLD}(\varepsilon_{minor}, \theta, f_i)} \quad (۳-۱)$$

به عنوان مثال، در شکل ۳-۶ برای نقطه A متغیر شکل‌پذیری FLD به صورت زیر محاسبه می‌شود. در لحظه رسیدن حالت کرنش فعلی (نقطه A) به حد شکل‌دهی (B)؛ پارامتر شکل‌پذیری $w_{FLD} = 1$ خواهد شد (لحظه شروع آسیب) و می‌توان نوشت:

$$w_{FLD} = \frac{\varepsilon_{major}^A}{\varepsilon_{major}^B} \quad (۳-۲)$$

اگر مقدار کرنش فرعی در خارج از محدوده‌ی مقادیر جدولی مشخص شده باشد؛ مقادیر کرنش فرعی روی منحنی حد شکل‌دهی با این فرض که شیب در نقطه پایانی از منحنی ثابت بماند؛ برون‌یابی می‌شوند.

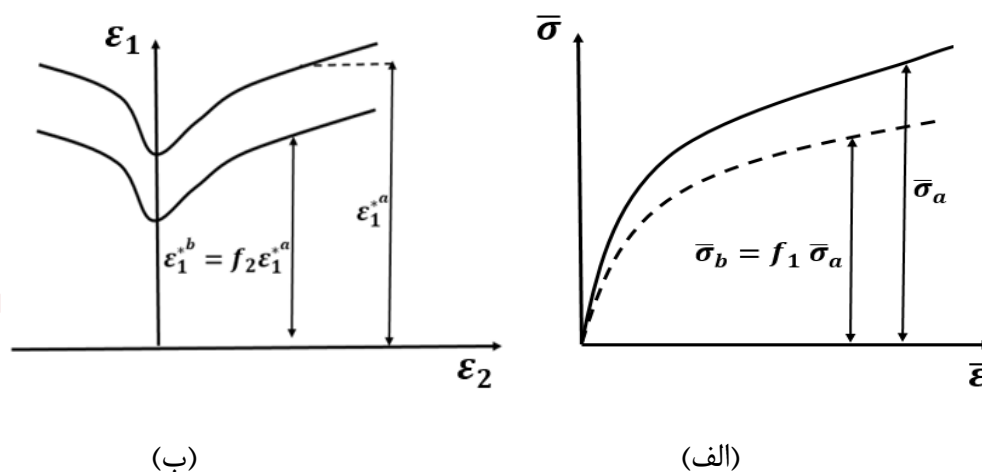
ج) مدل سازی درز لوله با یک نقص مکانیکی

درز لوله به صورت یک نوار نازک به عرض ثابت ۱ میلی متر در طول با خواص مکانیکی ضعیف تر نسبت به دیگر نواحی تعریف شده است. به منظور تعیین خواص مکانیکی ناحیه درز لوله ضریب ناهمگنی^۱ f_1 برای افت تنش جریان $\bar{\sigma}$ و f_2 برای افت کرنش اصلی شروع آسیب (ε_1^*) تعریف گردید.

$$f_1 = \frac{\bar{\sigma}^b}{\bar{\sigma}^a} \quad (۳-۳)$$

$$f_2 = \frac{\varepsilon_1^{*b}}{\varepsilon_1^{*a}} \quad (۴-۳)$$

در روابط فوق بالانویس a و b به ترتیب مربوط به نواحی سالم و درز جوش می باشند. شکل ۳-۷ تنش جریان پلاستیک و منحنی حد شکل دهی را برای دو ناحیه سالم و نقص به صورت شماتیک نشان می دهد. می توان با استفاده از روابط ۳-۳ و ۴-۳ خواص ناحیه ی نقص را بر حسب ناحیه سالم بدست آورد.



شکل ۳-۷: تعریف خواص مکانیکی ناحیه نقص و ناحیه سالم

الف: براساس منحنی تنش و کرنش ب: براساس منحنی حد شکل دهی

در شبیه سازی ها به منظور دستیابی به مقدار بهینه ی ضریب نقص، با تغییر مقادیر آن؛ اثر ضریب ناهمگنی f بر روی قطر بحرانی لحظه شکست (d^*) و فشار بحرانی (p^*) مورد بررسی قرار گرفت ($f_1 = 0.89, 0.98, 0.99, \dots, f_2 = f$). با مقایسه یافته های تحلیلی با نتایج آزمون تجربی مقدار ضریب ناهمگنی f دقیق انتخاب گردید. همچنین از مدل رشد آسیب با معیار جابه جایی پلاستیک موثر به ازای

^۱ Inhomogeneity factor

مقادیر $\bar{u}_f^{pl} = 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$ با روند تغییرات خطی استفاده شده است. نحوه رشد پارگی با تغییرات فشار سیال به ازای هر یک از مقادیر فوق مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج آزمون تجربی مورد مقایسه قرار گرفت و در پایان مقدار جابه‌جایی پلاستیک بحرانی مطلوب حاصل شد.

د) صحنه‌گذاری نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی هیدروبالجینگ

به منظور دستیابی به ضرایب مطلوب نتایج عددی با نتایج فلاحتی و گردویی مورد مقایسه قرار گرفت [۲۳]. تمامی آزمایش‌ها با استفاده از یک دستگاه آزمون اونیورسال هیدرولیکی DMG با ظرفیت KN ۶۰۰ انجام شده است که تصویر آن در شکل ۳-۸ قابل مشاهده است. همچنین در این شکل اجزای مختلف قالب شامل سنبه و ماتریس نمایش داده شده است. قالب از جنس St۳۷ با عملیات تراشکاری ساخته و سطح آن پرداخت شد.



شکل ۳-۸: پرس هیدرولیکی و اجزای قالب هیدروفرمینگ

سیال به کار رفته در آزمایش‌ها، روغن SAE 20W50 ساخت کارخانه نفت پارس می‌باشد. گرانیوی این روغن در 40°C برابر ۱۵۸ cSt و چگالی آن برابر 0.891 g/cm^3 می‌باشد. لوله فولادی پس از برشکاری به طول ۲۰۰ میلی‌متر در داخل حفره قالب قرار گرفته و با نرخ ثابت تحت فشار داخلی تا رسیدن به آستانه پارگی قرار گرفت. نتایج مربوط به مقایسه داده‌های تجربی و عددی در فصل بعد و در بخش تحلیل شکست و خواص ناحیه‌ی درز لوله قابل مشاهده می‌باشد.

۳-۱-۵ مدل سازی سری سوّم: تحلیل اثر فاکتورهای فرایند RPF بر متغیرهای محصول به روش طراحی آزمایش های تاگوچی

در اختیار داشتن اطلاعات کافی از نحوه تاثیرگذاری پارامترهای مستقل یک فرایند بر روی مشخصه های وابسته یا پارامترهای کیفی محصول کمک شایانی به طراحی هرچه بهتر یک فرایند می نماید. این آگاهی در فرایندهای تجربی منجر به انتخاب هر چه بهتر نمونه ها و کاهش سعی و خطاهای بیهوده و در نتیجه صرفه جویی زمانی و اقتصادی خواهد شد.

فرایند شکل دهی با بالشتک کشسان که در بردارنده پارامترهای مستقل مربوط به لاستیک، لوله و شرایط مرزی مسئله می باشد، از پیچیدگی خاصی در تحلیل و پیش بینی مشخصات محصول برخوردار است. در این بخش با استفاده از روش طراحی آزمایش های^۱ تاگوچی^۲ که یکی از متداول ترین روش های DOE محسوب می شود، جداسازی یا غربال کردن^۳ پارامترهای موثر از غیر موثر به اجرا گذاشته شده است. در این راستا پارامترهای ورودی مسئله به صورت ۷ عامل^۴، که ۴ عامل آن دو سطحی^۵ و ۳ عامل دیگر سه سطحی در نظر گرفته شد و براساس ماتریس متعامد L36 آزمون های مربوطه طراحی و شبیه سازی عددی فرایند شکل دهی با بالشتک کشسان، با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام شد. پارامترهای خروجی به دست آمده از شبیه سازی عددی، به کمک نرم افزار مینیتب^۶ مورد تحلیل آماری قرار گرفت. خروجی این تحلیل در قالب منحنی های اثر میانگین^۷ ارائه شده است. در این تحقیق فاکتورهای موثر بر روی مشخصه های اصلی فرایند و میزان تاثیرگذاری آن ها مشخص خواهد شد.

• طراحی آزمایش ها به روش تاگوچی

روش های مختلف طراحی آزمایش های تجربی که تاریخچه آن به تحقیقات اولیه فیشر در سال ۱۹۲۰ باز می گردد امروزه به یک ابزار کارآمد اقتصادی و صنعتی برای مدیران تبدیل شده است. مطابق شکل ۳-۹ فاکتورهای مستقل ورودی به یک سیستم می تواند از نوع قابل کنترل یا غیر قابل کنترل یا نویز باشد. در این شکل عوامل قابل کنترل با متغیر X_i و عوامل غیر قابل کنترل با متغیر Z_i نمایش داده

^۱ Design of experiments (DOE)

^۲ Taguchi

^۳ Screening

^۴ Factor

^۵ Level

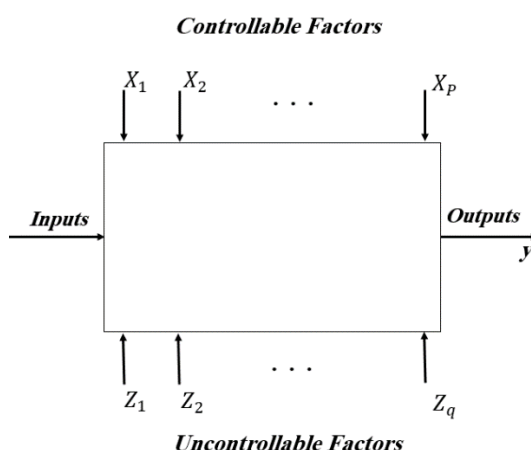
^۶ Minitab

^۷ Mean Effect

شده است. متغیر وابسته‌ی y نیز که با عناوین مشخصه کیفی^۱، رفتار^۲ و یا پاسخ^۳ شناخته می‌شود خروجی سیستم می‌باشد.

روش‌های طراحی فرایند معمولاً به منظور دستیابی به اهداف زیر مورد توجه می‌باشد:

- شناسایی میزان و نحوه‌ی تاثیر متغیرهای ورودی بر رفتار y ،
- تنظیم بهینه پارامترهای قابل کنترل X_i به گونه‌ای که تابع رفتار y نزدیکترین مقدار را به عدد مطلوب نامی داشته باشد.
- تنظیم پارامترهای قابل کنترل X_i به گونه‌ای که تابع رفتار y کمترین وابستگی و بیشترین صلبیت را داشته باشد.
- تنظیم پارامترهای قابل کنترل X_i به گونه‌ای که مقادیر غیر قابل کنترل Z_i ، کمترین میزان تاثیر را در تابع رفتار y دارا باشد.



شکل ۳-۹: دیاگرام بلوکی یک فرایند

در این روش‌ها، طراح فرایند نخست با اجرای یک‌سری آزمون اولیه، عوامل موثر و غیر موثر بر روی رفتار فرایند را از یکدیگر تفکیک می‌نماید که به این مرحله جداسازی یا غربال کردن گفته می‌شود. سپس شرایط بهینه‌ی هر یک از پارامترهای مستقل را به منظور دستیابی به هدف ارائه می‌دهد.

^۱ Quality Characteristic

^۲ Treatment

^۳ Response

در سال‌های اخیر در بین الگوهای مختلف طراحی آزمایش‌های صنعتی، روش تاگوچی بیش از دیگر روش‌ها به چشم می‌آید. این روش توسط جینیچی تاگوچی که یک مهندس مخابرات ژاپنی است در سال ۱۹۸۰ با هدف بهبود کنترل کیفی محصولات صنعتی پایه‌ریزی شد. دیدگاه کیفی‌نگر در این روش، سهولت یادگیری و پیاده‌سازی آن، نگرش صنعتی در پایه‌گذاری روش آماری و همچنین نتایج قابل توجه به دست آمده از اجرای آن، از عوامل برجسته‌ی موفقیت و فراگیر شدن این روش در مراکز صنعتی می‌باشد.

در این تحقیق با هدف شناسایی میزان و نحوه‌ی تاثیرگذاری پارامترهای مستقل فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان بر روی پاسخ فرایند، عوامل قابل کنترل در قالب ۷ فاکتور مطابق جدول ۲-۳ زیر تقسیم بندی شد:

جدول ۲-۳: عوامل و سطوح در طرح آزمایش مورد بررسی

نام عامل	سطح یک	سطح دو	سطح سه
A ضریب اصطکاک بین لوله و لاستیک	۰/۶۶	۰/۰۵	-----
B ضریب اصطکاک بین لوله و قالب	۰/۳	۰/۱	-----
C سختی لاستیک (shore A)	۷۵	۵۰	-----
D پیشروی محوری لوله (میلی‌متر)	۰	۱۰	-----
E ارتفاع لاستیک (میلی‌متر)	۱۴۰	۱۵۰	۱۳۰
F شعاع گوشه قالب (میلی‌متر)	۵	۱۰	۲
G طول ناحیه تغییر شکل (میلی‌متر)	۴۰	۵۰	۳۰

اگر از روش عاملی کامل^۱ برای بررسی اثر این عوامل استفاده شود؛ با توجه به رابطه ۳-۵ نیاز به انجام ۴۳۲ شبیه‌سازی می‌باشد که زمان زیادی را به خود اختصاص می‌دهد. در این رابطه m تعداد فاکتورها با b سطح و n تعداد فاکتور با a سطح می‌باشد.

$$\text{Number of Experiment} = a^n \times b^m \quad (۵-۳)$$

^۱ Full Factorial

جدول ۳-۳: ماتریس متعامد L36 برای سری آزمون‌های ۷ عاملی

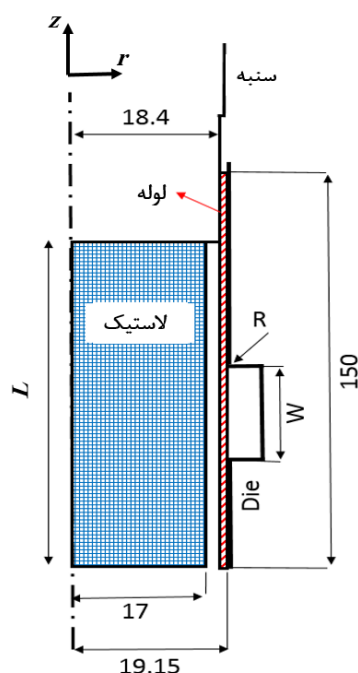
آزمون	A	B	C	D	E	F	G	آزمون	A	B	C	D	E	F	G
19	2	1	2	1	2	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1
20	2	1	2	2	3	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2
21	2	1	2	3	1	3	2	2	1	1	3	3	3	3	3
22	2	1	2	1	2	2	3	2	1	1	1	1	1	1	1
23	2	1	2	2	3	3	1	2	1	1	2	2	2	2	2
24	2	1	2	3	1	1	2	2	1	1	3	3	3	3	3
25	2	1	1	1	3	2	1	2	1	1	2	1	1	3	2
26	2	1	1	2	1	3	2	2	1	1	2	2	2	1	3
27	2	1	1	3	1	2	3	2	1	1	3	3	3	1	2
28	2	2	2	2	2	1	3	2	2	1	1	1	1	3	2
29	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	1	2	2	1	3
30	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	3	3	3	2	1
31	2	2	2	1	1	3	3	2	2	2	1	2	2	3	1
32	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2	3	1	1
33	2	2	2	3	1	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2
34	2	2	2	1	1	3	2	2	2	2	1	2	2	3	1
35	2	2	2	2	1	2	3	2	2	2	2	2	3	1	2
36	2	2	2	3	1	2	1	2	2	2	3	2	1	3	1

ولی با استفاده از یکی از روش‌های عاملی کسری^۱ می‌توان این تعداد آزمون را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. برای این منظور در این تحقیق از روش تاگوچی و ماتریس متعامد^۲ L36 که در جدول ۳-۳ نمایش داده شده استفاده شد. اعداد ثبت شده در سطرهای جدول بیان‌کننده‌ی سطوح عوامل در آزمون مشخص می‌باشد. که مجموعاً با ۳۶ شبیه‌سازی قضاوت صورت می‌گیرد.

به عنوان مثال در شبیه‌سازی اول که همه‌ی عامل‌ها در سطح یک قرار دارد؛ ضریب اصطکاک بین لوله و لاستیک ۰/۶۶، ضریب اصطکاک بین لوله و قالب ۰/۳، سختی لاستیک ۷۵ شور A، بدون اعمال پیشروی محوری به لوله، ارتفاع لاستیک ۱۴۰ mm، شعاع گوشه قالب ۵ mm و طول ناحیه تغییرشکل ۴۰ mm لحاظ شده است.

• آماده سازی مدل اولیه در محیط نرم‌افزار آباکوس

در این بخش نخست شرایط آزمون بالجینگ شامل لوله، لاستیک، قالب و سنبه به صورت دو بعدی متقارن محوری مطابق شکل ۱۰-۳ مدل شد. این شکل نحوه چیدمان و ابعاد قالب، لوله و لاستیک را در آزمون شماره یک نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰-۳: ابعاد و نحوه چیدمان اجزا در شبیه‌سازی سری سوم (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

^۱ Fractional Factorial

^۲ Orthogonal Array

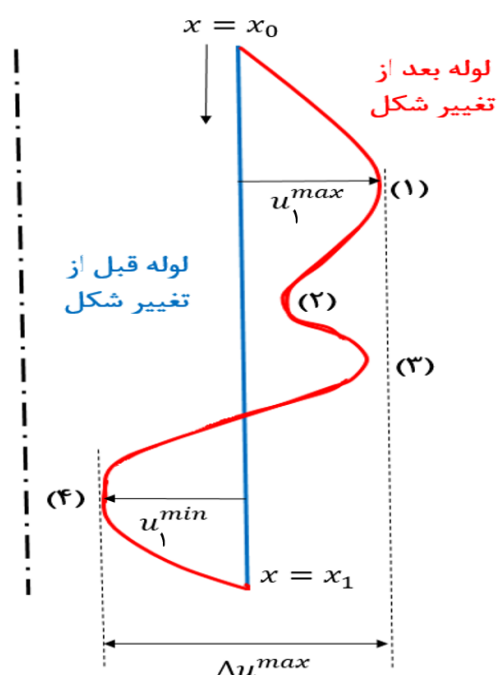
جدول ۳-۴: خواص پلی‌اورتان مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها

ضریب C1 (MPa)	ضریب C2 (MPa)	سختی لاستیک (شور A)
۲/۳۰۷	۰/۱۵۷	پلی‌اورتان با سختی ۵۰ [۱۶]
۱/۸۵۶	۰/۳۲۸	پلی‌اورتان مورد استفاده در این تحقیق با سختی ۷۵

به جهت مقایسه اثر سختی پلی‌اورتان دو نوع سختی متفاوت، ۷۵ و ۵۰ شور A مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور تعیین خواص پلی‌اورتان‌ها از مدل ریاضی مونی-ریولین استفاده شده است که ضرایب مربوط به آن‌ها در جدول ۳-۴ آورده شده است.

• شرح عوامل خروجی

به منظور استخراج داده‌های خروجی و بررسی هر یک از فاکتورها؛ بر روی سطح خارجی لوله یک مسیر به طول x تعریف شده است. فرض کنید که همانند شکل ۳-۱۱ در لوله تغییر شکل ایجاد شده است.



شکل ۳-۱۱: تغییر شکل ایجاد شده در لوله به صورت شماتیک

در این شکل مقداری از جابه‌جایی سطح لوله مثبت و مقداری از آن منفی می‌باشد، لذا برای بدست آوردن مقدار متوسط عمق بالچینگ میانگین داده‌ها را حساب می‌کنیم.

$$Av(u_1) = \frac{\int_{x_0}^{x_1} u_1 dx}{x_1 - x_0} \quad (۶-۳)$$

همچنین به منظور به دست آوردن اختلاف عمق بیشینه از رابطه زیر استفاده شد.

$$\Delta u^{max} = u_1^{max} - u_1^{min} \quad (۷-۳)$$

برای بررسی چین خوردگی نیز از تعداد قله‌های ایجاد شده در سطح لوله استفاده شده است، به عبارت دیگر از منحنی جابه‌جایی- طول مسیر مشتق اول گرفته و تعداد ریشه‌های آن، تعداد چین خوردگی‌ها در نظر گرفته شده است. در شکل شماتیک بالا تعداد قله‌ها ۴ عدد می‌باشد.

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} = 0 \quad (۸-۳)$$

برای بررسی توزیع کرنش در راستای ضخامت لوله، مقادیر متوسط ضخامت و انحراف استاندارد^۱ آن از روابط زیر بدست می‌آید.

$$t = t_0 e^{-\varepsilon t} \quad (۹-۳)$$

$$\varphi = St.Dev(t_{av}) = \sqrt{B(X^2) - [B(X)]^2} \quad (۱۰-۳)$$

که در آن‌ها t_0 ضخامت اولیه، φ انحراف استاندارد، X مقادیر داده‌ها و B متوسط داده‌ها می‌باشند. هر چه مقدار انحراف معیار به صفر نزدیک‌تر باشد، توزیع ضخامت یکنواخت‌تر است.

بر طبق روش تحلیل عاملی کسری، با استفاده از ماتریس متعامد تاگوچی L36 که در جدول ۳-۳ مشاهده شد، تعداد ۳۶ شبیه‌سازی به انجام رسید. بر این اساس نحوه‌ی تعیین سطوح فاکتورها در هر شبیه‌سازی باید مطابق جدول ۲-۳ باشد. مهمترین داده‌های خروجی شامل نیروی فرایند (RF)، عمق متوسط بال‌جینگ (U)، تعداد چین خوردگی (NW)، اختلاف عمق بیشینه (Δu^{max}) و توزیع کرنش لوله می‌باشد. هر یک از این داده‌ها، به صورت مجزا یک متغیر پاسخ در نظر گرفته شده و نحوه‌ی تاثیرگذاری عوامل مستقل هفت‌گانه بر آن به دست آمد و در بخش نتایج ارائه شد. لازم به ذکر است که به منظور حذف وابستگی داده‌ها به رنج تغییرات؛ بی‌مقیاس سازی بر روی داده‌ها اجرا شده است. روش‌های

^۱ Standard Deviation

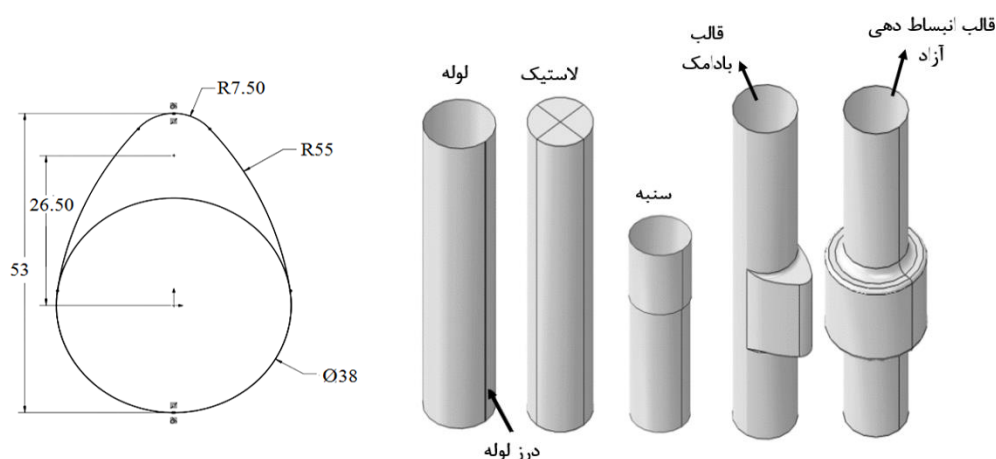
مختلفی از قبیل روش بی‌مقیاس سازی فازی، روش بی‌مقیاس سازی خطی و غیره برای این منظور وجود دارد، که در این بخش تحقیق از روش RPD ^۱ با رابطه زیر؛ استفاده شده است.

$$RPD = (|method\ solution - best\ solution| \times 100) / |best\ solution| \quad (۱۱-۳)$$

۳-۱-۶ تحلیل فرایند بالچینگ لوله فولادی درزدار در قالب انبساط‌دهی آزاد و بادامک

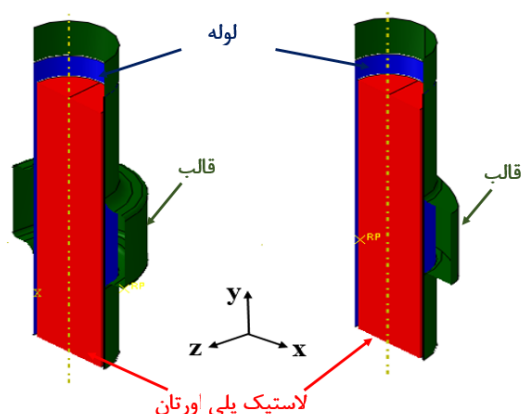
الف) ایجاد مدل هندسی

در این مرحله از پژوهش مدل‌سازی سه‌بعدی مجموعه اجرا شده است. در مدل‌سازی قطعات، فقط سطوحی از قالب که در تماس با لوله قرار می‌گیرند، مدل‌سازی شدند. مجموعه قالب و سنبه به صورت پوسته‌ای مدل شد. مدل لوله و لاستیک از نوع شکل‌پذیر و مدل سایر قطعات قالب و سنبه، از نوع صلب انتخاب شد. در ادامه به هر یک از اجزای قالب یک نقطه مرجع اختصاص داده تا به‌منظور تعریف شرایط مرزی از آن استفاده شود. در شبیه‌سازی‌ها ضخامت لوله برابر با اندازه واقعی آن یعنی ۰/۷۵ mm در نظر گرفته شد. در شکل ۳-۱۲ مدل ترسیم شده اجزای قالب و لوله‌ی اولیه نشان داده شده است. شکل ۳-۱۳ نیز چگونگی استقرار اجزای مجموعه قالب را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۲: هندسه اجزای قالب و لوله در نرم‌افزار شبیه‌سازی؛ همچنین ابعاد مقطع بادامک (برحسب میلی‌متر)

^۱ Relative Percentage Deviation (RPD)



شکل ۳-۱۳: مونتاژ اجزای قالب و لوله در شبیه‌سازی، سمت راست: قطعه بادامک، سمت چپ: انبساط‌دهی آزاد

ب) تعیین خصوصیات لوله و لاستیک

خواص مکانیکی لوله در زردار به صورت یک ماده الاستیک-پلاستیک همسانگرد و منحنی‌های تنش- کرنش عیناً مشابه بخش‌های قبل انتخاب گردید. از نتایج مدل‌سازی سری دوم، ضریب نقص f برابر 0.897 و جابه‌جایی بحرانی شکست برابر 0.05 در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که استفاده از منحنی‌های حد شکل‌دهی (FLD) بدست آمده از روش‌های شکل‌دهی سنتی که در شرایط فشار هیدروستاتیکی بسیار ناچیز حاصل شده است، در فرایند انبساط‌دهی با بالشتک کشسان معتبر نیست. لذا در این قسمت از منحنی حد شکل‌دهی اصلاح شده که در بخش نتایج تجربی انبساط‌دهی آزاد لوله بحث شده است؛ استفاده شد.

ج) تعیین تعداد مراحل و نوع حل مسئله

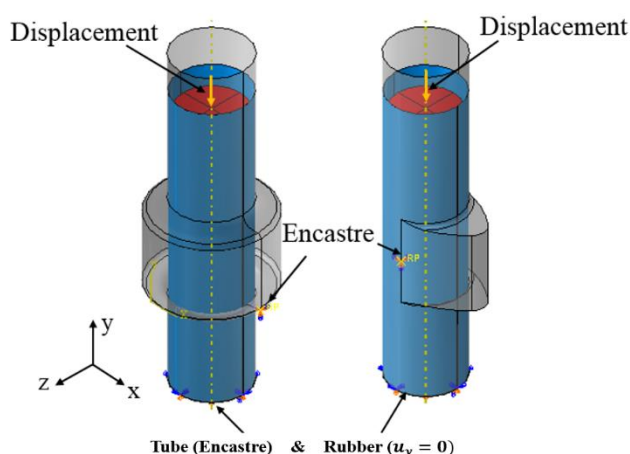
در این پژوهش انجام شبیه‌سازی فرایند در یک گام تنظیم گردید که در آن سنبه به سمت پایین حرکت کرده و لوله با افزایش فشار داخلی حاصل از لاستیک بشکه‌ای می‌شود. حرکت سنبه بر اساس سرعت سنبه ثابت و جابجایی معین تنظیم شده است. برای کاهش زمان محاسبات، در استفاده از حلگر صریح زمان تحلیل به میزان کسری از زمان واقعی فرایند، برابر 0.01 ثانیه در نظر گرفته شد.

خ) تعیین نوع تماس سطوح اجزا با هم

در این بخش همانند قبل در قسمت تعیین مشخصات سطوح از تماس سطح به سطح و همچنین از مدل اصطکاکی کولمبی استفاده شد. به منظور ایجاد شرایط روانکاری مناسب ضریب‌های اصطکاک 0.05 و 0.66 برای تماس سطح لوله با لاستیک؛ 0.3 و 0.1 برای تماس لوله و قالب به ترتیب برای حالت‌های بدون روانکار یا خشک و در حضور روانکار تعریف شده است [۲۶] و [۲۷].

د) شرایط مرزی و بارگذاری

نوع اول قیود اعمال شده در شرایط مرزی مربوط به قید تقارن است که به لبه‌ی پایینی لوله و لاستیک اعمال می‌شود. نوع دوم قید جابه‌جایی است که برای محدود کردن درجه‌های آزادی قالب اعمال می‌شود. همچنین به منظور تامین نیروی مورد نیاز فرایند از قید جابه‌جایی که به نقطه مرجع سنبه نسبت داده شده است؛ استفاده شد. در شکل ۳-۱۴ شرایط مرزی اعمال شده بر اجزای قالب و لوله را نشان می‌دهد.

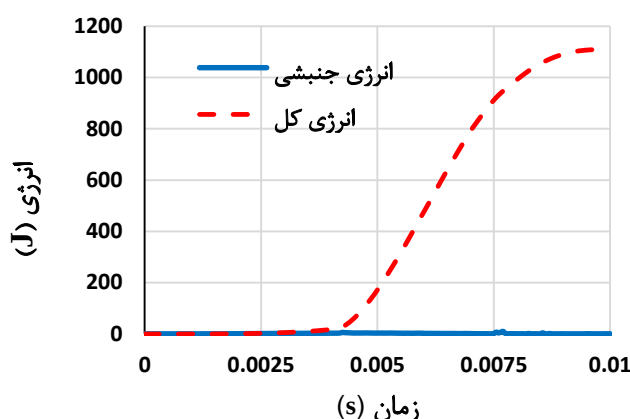


شکل ۳-۱۴: شرایط مرزی اعمال شده به ورق و قالب در شبیه‌سازی

سمت راست: قطعه بادامک، سمت چپ: انبساط‌دهی آزاد

ذ) شبکه‌بندی

المان بکار رفته در مدل لوله از نوع S4R است که یک المان پوسته‌ای چهار گره‌ای از نوع انتگرال‌گیری کاهش یافته می‌باشد. برای شبکه‌بندی لاستیک از المان نوع C3D8R (یک المان هشت گره‌ای انتگرال-گیری کاهش یافته) استفاده شد. یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در تحلیل المان محدود، اندازه المان‌ها می‌باشد. برای بدست آوردن اندازه بهینه دانه‌بندی، از آنالیز حساسیت مش براساس تابع هدف نیروی فرایند استفاده شد. بدین منظور، مدل‌هایی با اندازه دانه‌بندی مختلف شبیه‌سازی شد و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر مقدار دانه‌بندی، بر زمان تحلیل فرایند در حالت‌های مختلف مقایسه و در نهایت با بررسی نتایج، مقدار $1/5 \text{ mm}$ برای طول المان‌های لوله و 3 mm برای طول لاستیک انتخاب شد.



شکل ۳-۱۵: مقایسه انرژی جنبشی ایجاد شده با انرژی کل در شبیه‌سازی فرایند RPF

همانطور که در معرفی حلگر صریح نرم‌افزار آباکوس بیان شد، نتایج این حلگر با دو شرط قابل استناد است: کسر کوچکی از انرژی جنبشی و رفتاری غیر نوسانی و نسبتاً مرتبط با هندسه فرایند. به همین منظور شکل ۳-۱۵ منحنی انرژی کل و جنبشی ایجاد شده در شبیه‌سازی را برای بیان نتیجه منطقی انتخاب اندازه المان‌های ذکر شده در بالا، نشان می‌دهد.

(و) تحلیل فرایند

در این پژوهش، تحلیل‌ها با استفاده از یک رایانه با پردازنده سه هسته‌ای ۲/۵۳ گیگاهرتز انجام شده و زمان تقریبی حل برای هر شبیه‌سازی حدود ۱۲ ساعت بوده است.

۳-۲ روش تجربی

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

۳-۲-۱ معرفی تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور مطالعه تجربی انبساط‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ با کمک بالشتک کشسان از تجهیزات آزمایشگاهی زیر استفاده شد:

الف) پرس و قالب

شکل‌دهی لوله فرایند *RPF* به کمک یک دستگاه پرس هیدرولیکی ژاو آریا^۱ ۱۰۰ تن؛ با چهار میله راهنما انجام شد که تصویر آن در شکل ۳-۱۶ قابل مشاهده است. این دستگاه در طول انجام آزمایش‌ها متصل به یک واحد کنترل می‌باشد بطوری که امکان تنظیم سرعت حرکت رم و ثبت نیرو و جابه‌جایی پرس در هر لحظه را میسر می‌سازد. حداکثر سرعت در این پرس ۱ mm/s است.

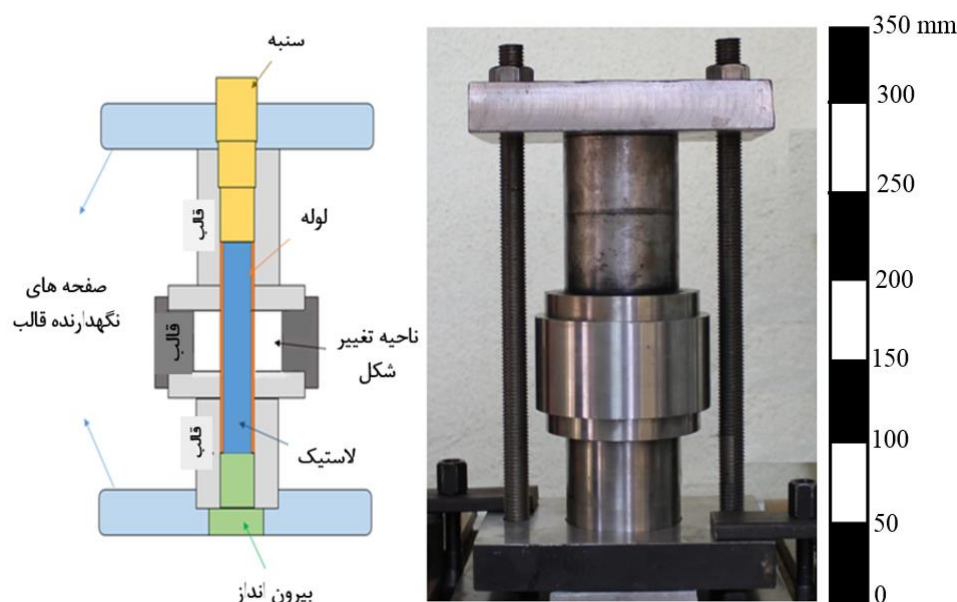
تصویر و شماتیک قالب انبساط‌دهی لوله به کمک روش *RPF* و اجزای آن در شکل ۳-۱۷ قابل مشاهده می‌باشد. به منظور سهولت در ساخت قالب‌های متعدد، بخش اصلی قالب به صورت اینسرتی و قابل تعویض طراحی شد. مشخصات دقیق جنس، ابعاد و سختی قالب در پیوست ارائه شده است.



شکل ۳-۱۶: دستگاه پرس هیدرولیکی ۱۰۰ تن ژاو آریا

اجزای مختلف قالب استفاده شده در این پژوهش در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است. قطعات قالب فوق از جنس فولاد CK۴۵ می‌باشد که با عملیات تراشکاری ساخته، سختکاری و سطح آن پرداخت شده است.

^۱ Jav Aria



شکل ۳-۱۷: مجموعه قالب، سمت چپ: شماتیک قالب، سمت راست: قالب مورد استفاده



شکل ۳-۱۸: اجزای قالب انبساط‌دهی

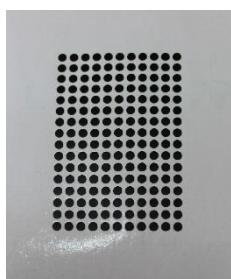
ج) آماده‌سازی نمونه‌ها

به‌منظور اندازه‌گیری کرنش‌ها پس از شکل‌دهی، لازم است که نمونه‌ها قبل از شکل‌دهی شبکه‌بندی شوند. حالت‌های مختلفی از شبکه‌بندی را می‌توان استفاده کرد که عموماً از دایره‌هایی که با فاصله کمی از هم قرار دارند، استفاده می‌شود؛ که این طرح دارای دقت خوب و همچنین ایجاد طرح و اندازه‌گیری آن نیز ساده‌تر می‌باشد. این مجموعه از دایره‌های کوچک بر روی مناطق بحرانی ورق یا لوله به کمک روش‌های 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 گلوپی شدن شناسایی می‌شوند [۲۸].

همانگونه که بیان شد به منظور اندازه‌گیری کرنش‌ها پس از شکل‌دهی، لازم است که نمونه‌ها شبکه‌بندی شوند. لوله فولادی زنگ‌زن ۳۰۴ استفاده شده در آزمون‌های تجربی دارای قطر خارجی ۳۸ mm، طول ۱۵۰ mm و ضخامت ۰/۷۵ mm است. مشخصات فیزیکی لوله فولادی شامل مدول کشسان، ضریب پواسون و چگالی و درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده لوله به ترتیب در جدول ۳-۱ و جدول ۳-۵ درج شده است.

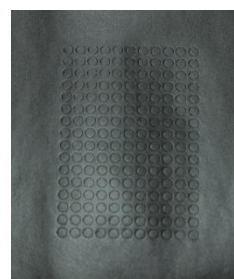
در این پژوهش براساس استاندارد ASTM E-۲۲۱۸ از دایره‌هایی به قطر ۳ mm و فاصله مرکز تا مرکز ۳/۵ mm برای شبکه‌بندی استفاده شده است. برای این منظور بر روی شبرنگ الگویی دایره‌ای در اندازه ذکر شده چاپ و برش کامپیوتری داده شد (مرحله ۱). این الگو در ناحیه تغییرشکل بر روی سطح لوله چسبانده شده و سپس رنگ روغنی مشکی بر روی آن اسپری شد (مرحله ۲). پس از خشک شدن رنگ، لایه شبرنگ را از روی لوله جدا کرده و الگوی دایره‌ای همانند مرحله ۳ توسط رنگ باقی‌مانده بر روی لوله نمایان می‌شود (شکل ۳-۱۹).



مرحله ۳



مرحله ۲



مرحله ۱

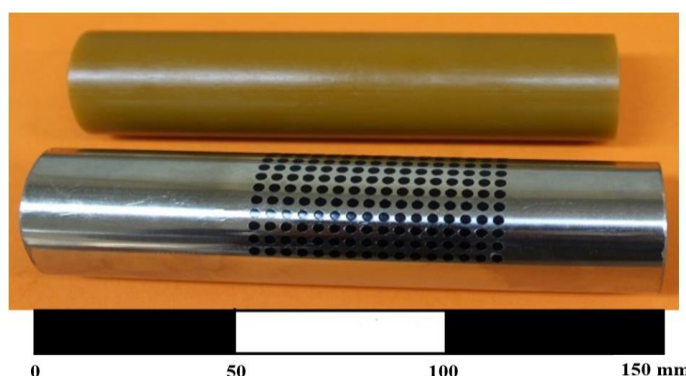
شکل ۳-۱۹: مراحل شبکه‌بندی لوله فولادی

پس از انجام آزمایش، برای اندازه‌گیری دایره‌های تغییرشکل یافته از نوار مایلر و کولیس دیجیتال استفاده شده است. نمونه‌ای از لوله شبکه‌بندی شده و لاستیک مورد استفاده در انجام آزمایش‌های تجربی در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که لاستیک مورد استفاده از جنس پلی‌اورتان، با طولی برابر ۱۴۰ mm و قطر ۳۴ mm می‌باشد؛ همچنین سختی آن در حدود ۸۵ شور A می‌باشد. آزمون فشار لاستیک براساس استاندارد ASTM D575-91 بر روی الاستومر مورد استفاده انجام شد.

همچنین در طی اجرای آزمون‌های تجربی به دلیل چگالتر شدن لاستیک در هر مرحله، از یک لاستیک برای شکل‌دهی دو عدد لوله استفاده شده است.

جدول ۳-۵: ترکیب شیمیایی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ [۲۳]

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



شکل ۳-۲۰: لوله شبکه‌بندی شده و لاستیک مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی

خ) 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:

$$e_1 = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \quad (۱۲-۳)$$

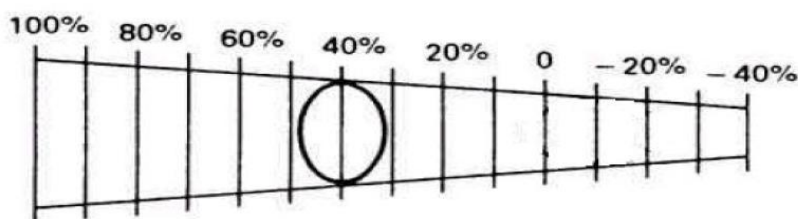
$$e_2 = \frac{D_2 - D_0}{D_0} \quad (۱۳-۳)$$

کرنش‌های حقیقی نیز از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{D_1}{D_0} \quad (۱۴-۳)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{D_2}{D_0} \quad (۱۵-۳)$$

به منظور اندازه گیری قطرهای دایره های تغییر شکل یافته، روش های مختلفی ارائه شده است. اندازه گیری دستی با کولیس، نوار مایلر و اندازه گیری با سیستم های خودکار. مزیت اندازه گیری با کولیس، سرعت بالا و عیب بزرگ آن دقت بسیار پایین است. همچنین می توان از نوار مایلر که یک نوار شفاف درجه بندی شده است برای اندازه گیری مستقیم کرنش ها به صورت درصد کرنش استفاده کرد. نکته ای که باید به آن توجه شود این است که کرنش هایی که از طریق نوار مایلر اندازه گیری می شوند، کرنش مهندسی هستند و در رسم نمودار حد شکل دهی باید به این نکته توجه شود. در شکل ۳-۲۱ نمونه ای از یک نوار مایلر نشان داده شده است [۲۹].



شکل ۳-۲۱: نوار مایلر برای اندازه گیری کرنش های حدی [۲۹]



شکل ۳-۲۲: تجهیزات اندازه گیری: (الف) ضخامت سنج مکانیکی (ب) کولیس دیجیتالی (ج) سختی سنج لاستیک

در این پژوهش برای اندازه‌گیری کرنش در لوله از کولیس دیجیتال با دقت 0.01 و نوار مایلر استفاده شد. لازم به ذکر است اندازه‌گیری فواصل شبکه‌ها بر روی کمان دایره با استفاده از کولیس به صورت مستقیم امکان‌پذیر نبوده و ایجاد خطای انحنای را موجب می‌شود میزان این خطا در حالت بیشینه مورد محاسبه قرار گرفت که برابر 0.1 درصد می‌باشد. به منظور بررسی تغییر ضخامت قطعات شکل داده شده از دستگاه ضخامت‌سنج Insize استفاده شد. یکی از فک‌های اندازه‌گیری این ضخامت‌سنج دارای نوک کرومی می‌باشد و بدین ترتیب قابلیت اندازه‌گیری ضخامت قسمت‌های مختلف قطعه‌کار را با دقت 0.01 mm فراهم می‌کند. همچنین در این تحقیق به منظور اندازه‌گیری سختی پلی‌اورتان مورد استفاده از دستگاه سختی‌سنج لاستیک Insize با دقت ± 1 شور A استفاده شد. شکل ۳-۲۲ وسایل اندازه‌گیری فوق را نشان می‌دهد.

(و) نحوه عملکرد قالب

نحوه عملکرد مجموعه قالب انبساط‌دهی لوله به این شرح است که ابتدا لوله درون قالب قرار می‌گیرد. سپس لاستیک درون لوله جایگذاری و پس از بستن قالب به صورت کامل، سنبه در درون لوله و بر روی سطح بالایی لاستیک قرار می‌گیرد. در انتها با به حرکت در آوردن رم پرس با یک سرعت ثابت، نیروی اعمالی مورد نیاز برای فشردن لاستیک توسط سنبه تامین می‌گردد. با ایجاد فشار داخلی، لوله در ناحیه شبکه‌بندی شده انبساط می‌یابد. این افزایش فشار تا حدی ادامه می‌یابد که میزان جابه‌جایی داده شده به دستگاه اتمام پذیرد.

جدول ۳-۶: شرایط آزمایش‌های تجربی انجام شده

شرایط روانکاری		مقدار تغذیه محوری سنبه (mm)
بین لوله و لاستیک	بین لوله و قالب	
خشک	خشک	۳۰
خشک	خشک	۵۰
نایلون	خشک	۳۰
نایلون	خشک	۵۰
نایلون	روغن کشش	۳۰
نایلون	روغن کشش	۵۰
نایلون	روغن کشش	۵۵

به منظور ایجاد قطعه‌های مطلوب و بدون چین خوردگی، همچنین با هدف رسیدن به پارگی در لوله مقدار تغذیه سنبه و شرایط روانکاری، تغییر داده شد. شرایط مختلف آزمایش‌های تجربی انجام شده، در جدول ۳-۶ نشان داده شده است. به منظور ایجاد شرایط روانکاری مناسب بین لوله و قالب از روغن کشش و همچنین بین لاستیک و لوله از چند لایه متوالی نایلون استفاده شد. روغن کشش روانکاری لایه مرزی با ضریب اصطکاک $0/1$ و نایلون روانکاری با فیلم جامد با ضریب اصطکاک $0/05$ ایجاد خواهد کرد [۲۶].

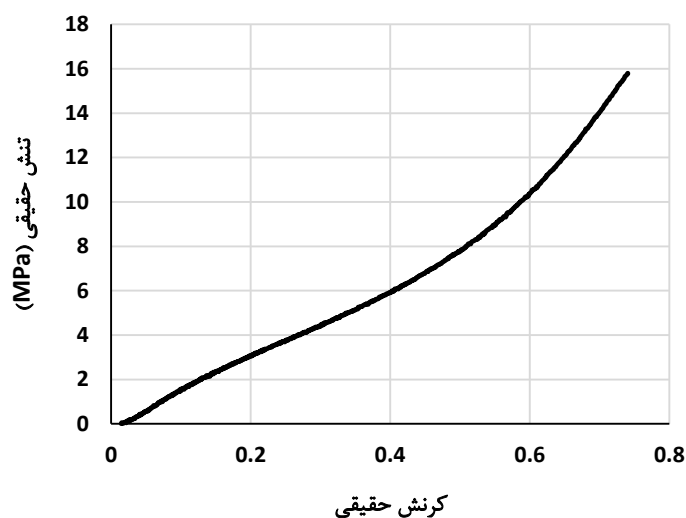
فصل ۴ ارائه نتایج و بحث

در این فصل، نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی در دو بخش بیان شده است. در بخش شبیه‌سازی؛ نخست نتایج مربوط به آزمایش‌های اولیه به منظور بدست آوردن خواص لوله و ضرایب مربوط به مدل ریاضی مونی-ریولین لاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس به ترتیب نتایج مربوط به شبیه‌سازی قالب، تحلیل ناحیه‌ی درز لوله و خواص شکست لوله، اثر پارامترهای موثر در فرایند RPF و نتایج مربوط به تحلیل فرایند بالجینگ لوله درزدار به وسیله بالشتک کشسان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش دوم نیز نتایج مربوط به آزمایش‌های تجربی ارائه شده است. لازم به ذکر است که در پایان هر بخش نتایج مربوطه با نتایج فرایند هیدروبالجینگ لوله‌ی درزدار مورد مقایسه قرار گرفته است.

۴-۱ ارائه‌ی نتایج آزمون تعیین خواص مکانیکی

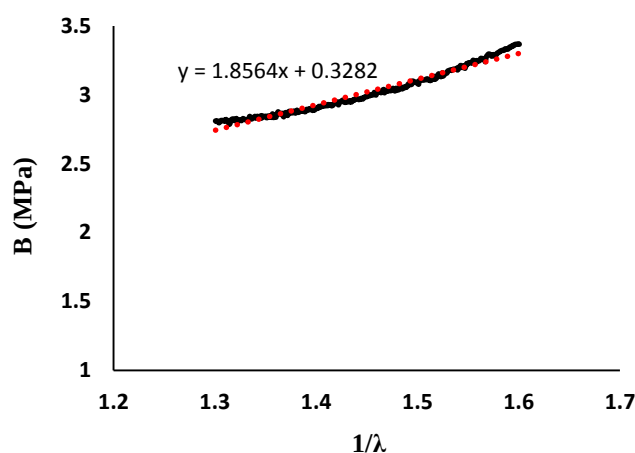
۴-۱-۱ آزمون فشار لاستیک و ثوابت جنس لاستیک

رابطه بین تنش و کرنش برای مواد هایپرالاستیک از تابع چگالی انرژی کرنش مشتق می‌شود. در این پژوهش به منظور تعیین خواص پلی‌اورتان از مدل ریاضی مونی-ریولین استفاده شده است. به همین منظور ابتدا آزمون فشار تک محوری مطابق با استاندارد ASTM D575-91 بر روی الاستومر مورد استفاده انجام شد که منحنی تنش-کرنش حقیقی حاصل شده از این آزمون در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱: منحنی تنش-کرنش فشاری لاستیک

همانگونه که در انتهای فصل دوم اشاره شد؛ اگر در رابطه ۲-۲۲، $B = \frac{\sigma}{2(\lambda^2 - \lambda^{-1})}$ فرض شود می توان دید که نمودار B بر حسب λ^{-1} در کرنش ۳۰٪ فشاری، خطی می باشد. پس ما می توانیم به آسانی، C_1 و C_2 را از طریق شیب منحنی^۱ بدست آوریم. بنابراین ضرایب C_1 و C_2 برای مدل ریاضی مونی-ریولین به ترتیب برابر $۱/۸۵۶۴$ و $۰/۳۲۸۲$ مگاپاسکال می باشد.



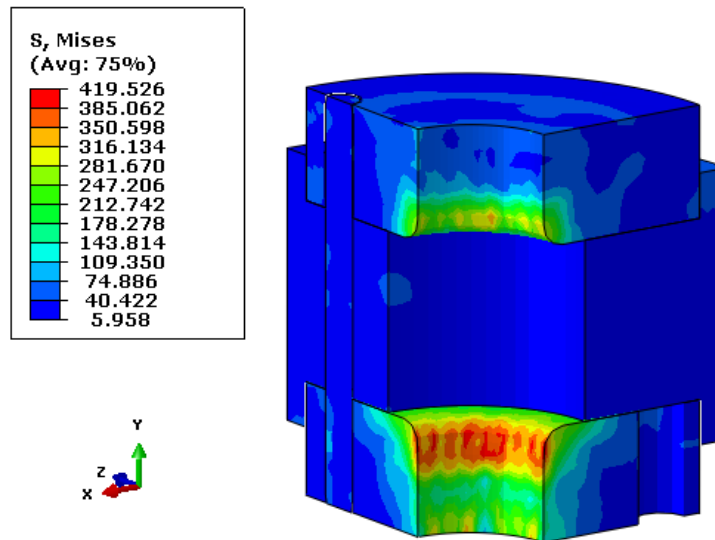
شکل ۴-۲: منحنی B بر حسب λ^{-1}

^۱ Intercept and Slope

۲-۴ نتایج تحلیل عددی

۱-۲-۴ تنش اجزای قالب در فرایند *RPF*

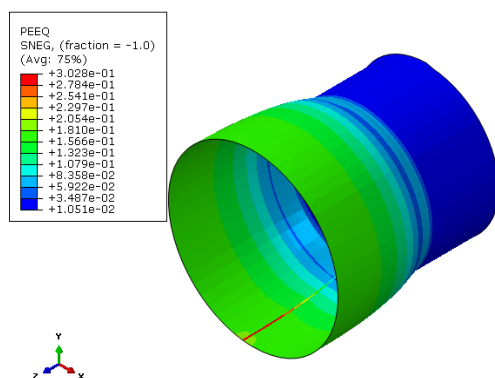
در این بخش، نتیجه حاصل از شبیه‌سازی قالب که با هدف بدست آوردن میزان تنش ایجاد شده در اجزای قالب انبساط‌دهی لوله انجام شده است؛ بیان می‌گردد. در شکل ۳-۴ توزیع تنش موثر ون-میسز در محدوده مربوط به ناحیه تغییر شکل قالب قابل مشاهده است. بر طبق این تحلیل مقدار تنش بیشینه در ناحیه گوشه قالب و به میزان ۴۲۰ مگاپاسکال ایجاد شده است. با توجه به تنش تسلیم CK_{45} و مقدار تنش ایجاد شده در اجزای قالب، ضریب اطمینان قالب طراحی شده برابر ۱/۱۶ می‌باشد. به منظور تحمل فشار فرایند و با توجه به سختی قطعه اولیه (در حدود ۲۰ راکول C)؛ اجزای قالب قبل از مرحله سنگ‌زنی تا ۳۵ راکول C سختکاری شد.



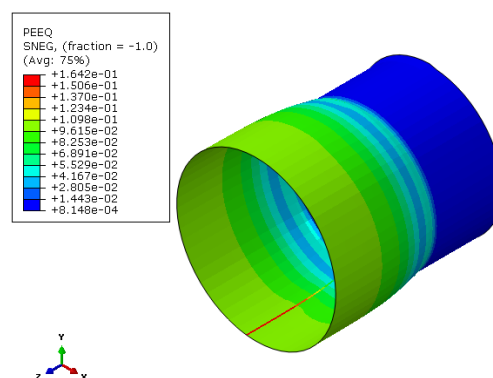
شکل ۳-۴: توزیع تنش موثر ون-میسز در اجزای قالب انبساط‌دهی بر حسب مگاپاسکال

۲-۲-۴ شکست و خواص ناحیه درز لوله در فرایند *HF*

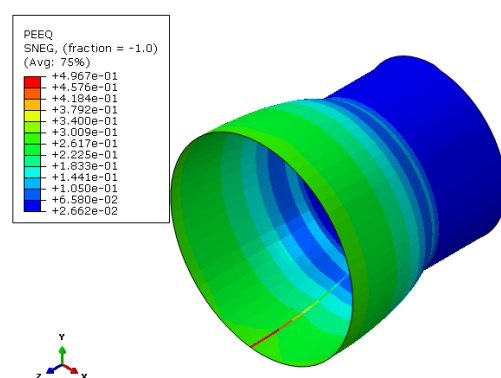
در این بخش نتایج مربوط به بررسی اثر متغیرهای شکست بر شروع ترکیدگی و نحوه رشد آن ارائه شده است. برای این منظور نتایج مربوط به اثر ضریب ناهمگنی f در قطر بحرانی لحظه شروع پارگی و فشار ترکیدگی بیان و در ادامه به بررسی پارامتر رشد آسیب $\bar{u}_f^{pl}$ پرداخته شده است.



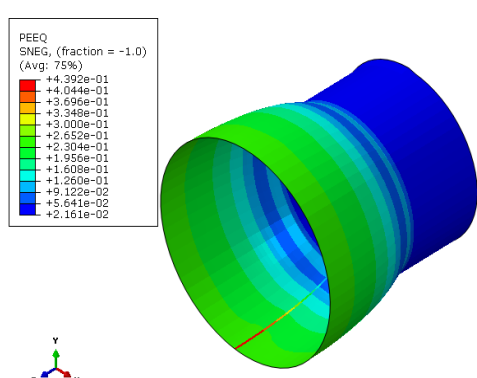
ب) $P = 24 \text{ MPa}$, $w_{FLD} = 0.8$



الف) $P = 20 \text{ MPa}$, $w_{FLD} = 0.43$



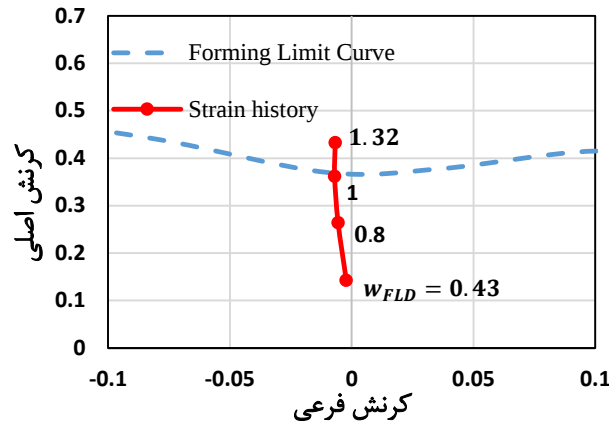
د) $P = 28 \text{ MPa}$, $w_{FLD} = 1.32$



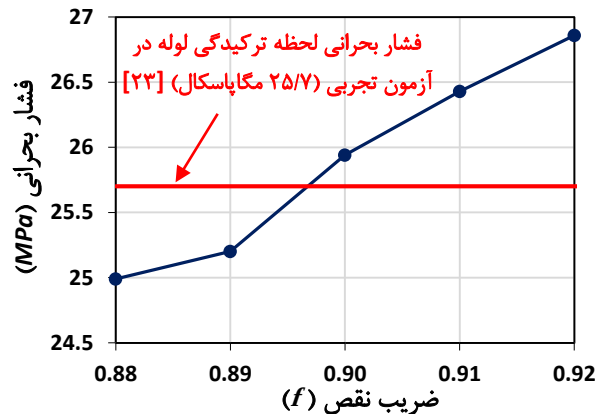
ج) $P = 25.94 \text{ MPa}$, $w_{FLD} = 1$

شکل ۴-۴: توزیع کرنش موثر پلاستیک با افزایش فشار در مدل اولیه (بدون لحاظ شدن پارامتر رشد آسیب) $f = 0.9$ در شکل ۴-۴ توزیع کرنش پلاستیک موثر^۱ در چهار مرحله با افزایش فشار سیال ارائه شده است. این نتایج به ازای ضریب ناهمگنی $f = 0.9$ و بدون لحاظ شدن پارامتر رشد آسیب حاصل شده است. مقادیر بیشینه کرنش پلاستیک و فاکتور شکل‌پذیری w_{FLD} واقع در ناحیه نقص بر روی هر شکل مشخص شده است. حالت کرنش در این چهار مرحله بر روی صفحه کرنش در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است. بر این اساس همانطور که از شکل مشخص است در مرحله سوم با برخورد تاریخچه‌ی کرنشی نقطه بحرانی با منحنی حد شکل‌دهی و به ازای $w_{FLD} = 1$ آستانه ترکیدگی لوله پیش‌بینی می‌شود. در این شرایط فشار بحرانی p^* برابر ۲۵/۹ مگاپاسکال می‌باشد. در این مدل اولیه به علت عدم تعریف پارامتر رشد آسیب، با افزایش فشار فرایند امضای کرنشی از منحنی حد شکل‌دهی فراتر رفته و w_{FLD} به صورت غیر واقعی افزایش می‌یابد (شکل ۴-۴ د).

^۱ Plastic strain equivalent

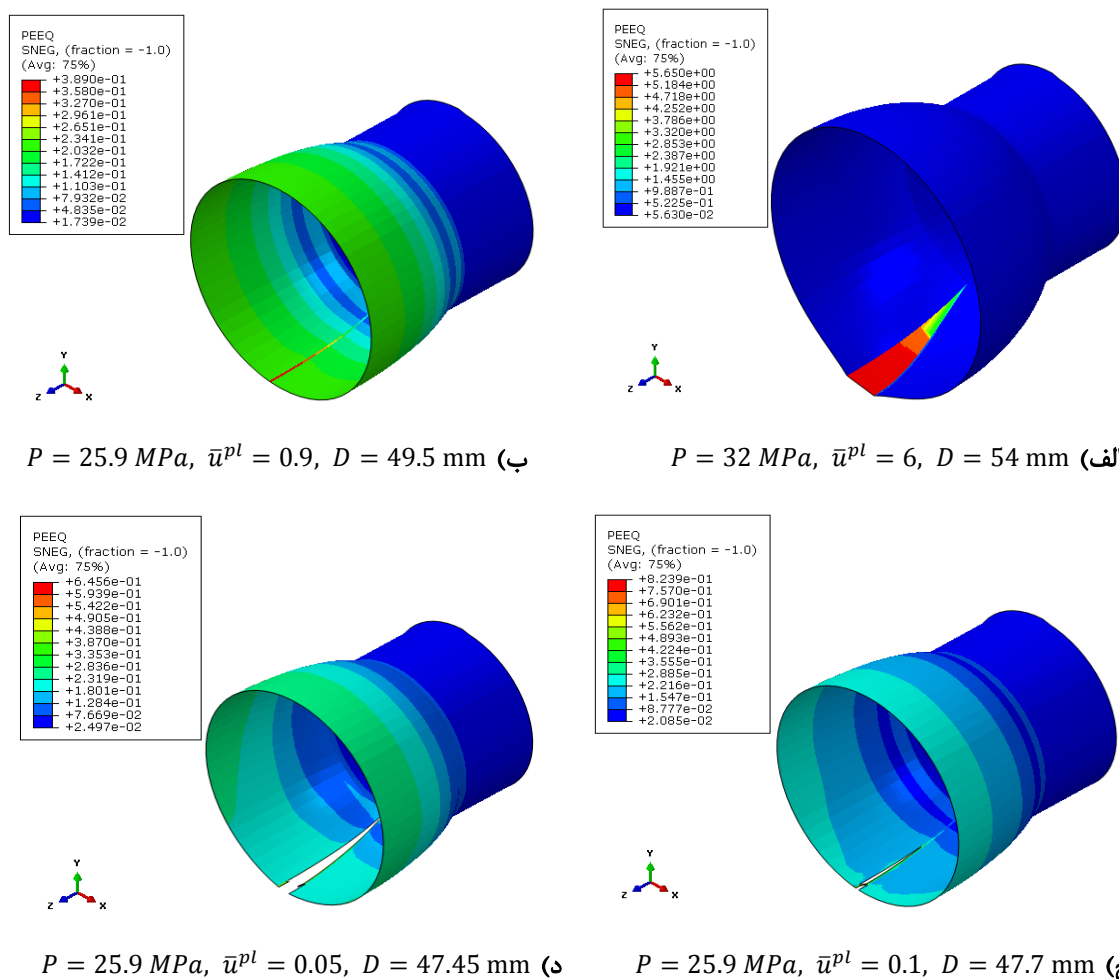


شکل ۴-۵: تاریخچه کرنش بر روی نوار درز در صفحه کرنش (در مدل اولیه بدون لحاظ شدن پارامتر رشد آسیب) به منظور تخمین مقدار بهینه‌ی ضریب نقص، مقادیر بیشینه‌ی فشار و قطر لوله در لحظه شکست ($w_{FLD} = 1$) با استفاده از شبیه‌سازی محاسبه و با مقایسه با نتایج تجربی، مقدار بهینه‌ی ضریب نقص حاصل می‌شود. شکل ۴-۶ نمودار فشار ترکیدگی لوله برای ضرایب نقص مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب نقص و نزدیک شدن استحکام ناحیه‌ی درز لوله به ناحیه سالم، فشار بحرانی افزایش می‌یابد. بر اساس این منحنی، به ازای فشار ترکیدگی ۲۵/۷ مگاپاسکال در آزمون تجربی مقدار بهینه‌ی ضریب ناهمگنی برابر ۰/۹ اختیار شد.



شکل ۴-۶: اثر ضریب ناهمگنی لوله بر فشار بحرانی

در ادامه به منظور یافتن مقدار بهینه‌ی متغیر جابه‌جایی پلاستیک موثر $\bar{u}^{pl}$ ، با توجه به مقدار ضریب نقص بهینه‌ی بدست آمده؛ شبیه‌سازی به ازای مقادیر مختلف این متغیر انجام و نتایج مطابق شکل ۴-۷ بدست آمد.

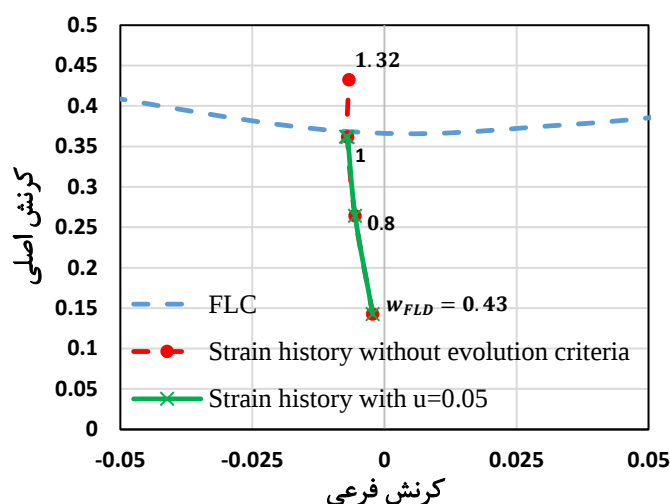


شکل ۴-۷: اثر پارامتر جابه‌جایی پلاستیک موثر بر لحظه ایجاد شکست

این شکل اثر متغیر جابه‌جایی پلاستیک موثر بر لحظه شروع پارگی را برای مقادیر مختلف مقدار جابه‌جایی پلاستیک موثر به ازای $f = 0.90$ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با وجود اینکه مقدار متغیر شکل‌پذیری برابر یک شده است؛ اما هنوز در لوله شکست اتفاق نیافتاده است. یعنی با افزایش پارامتر جابه‌جایی پلاستیک موثر به عنوان معیار رشد آسیب، حذف المان به تاخیر افتاده و در نتیجه قطر بحرانی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که در صورت عدم استفاده از معیار رشد آسیب، توزیع کرنش به صورت غیر واقعی به مقادیری فراتر از حد شکل‌دهی FLD افزایش می‌یابد؛ که این امر استفاده و تعیین دقیق پارامتر رشد آسیب را ضروری می‌نماید.

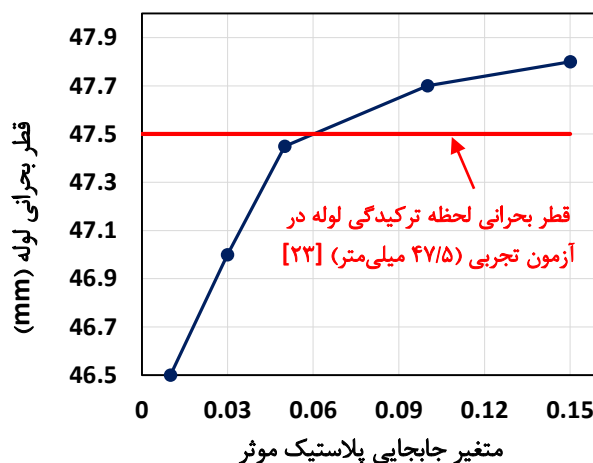
در شکل ۴-۸ حالت کرنش با در نظر گرفتن پارامتر رشد آسیب در صفحه کرنش رسم و با حالت قبل که این پارامتر در نظر گرفته نشده بود؛ مورد مقایسه قرار گرفت. بر این اساس مشاهده می‌گردد که با

استفاده از پارامتر رشد آسیب، پس از مرحله سوم که آستانه ترکیدگی لوله می‌باشد؛ با افزایش فشار فرایند تاریخچه کرنش فراتر نرفته و w_{FLD} برخلاف حالت قبل به صورت غیر واقعی افزایش نمی‌یابد.



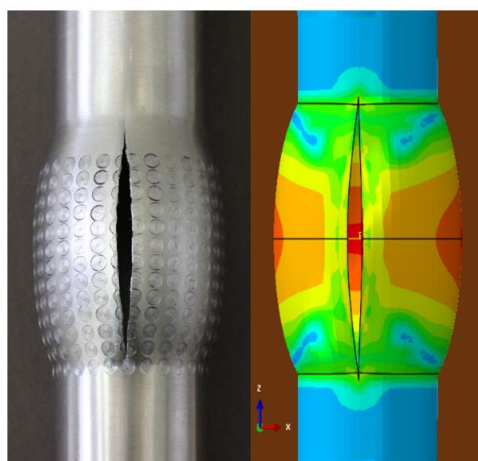
شکل ۴-۸: تاریخچه کرنش نقطه بحرانی بر روی دیاگرام کرنش

شکل ۴-۹ نمودار قطر بحرانی لوله بر حسب مقادیر مختلف متغیر جابه‌جایی پلاستیک موثر یا همان پارامتر رشد آسیب را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۹: اثر متغیر جابه‌جایی پلاستیک موثر بر قطر بیشینه بالچینگ

در شکل ۴-۱۰ ترکیدگی در لوله شبیه‌سازی شده، با مقادیر بهینه‌ی ضریب نقص و متغیر جابه‌جایی پلاستیک موثر بدست آمده با روش ارائه شده؛ در کنار تصویر حاصل از ترکیدگی لوله در آزمون تجربی آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نحوه رشد پارگی با نتایج تجربی تا حد قابل قبولی مطابقت دارد.



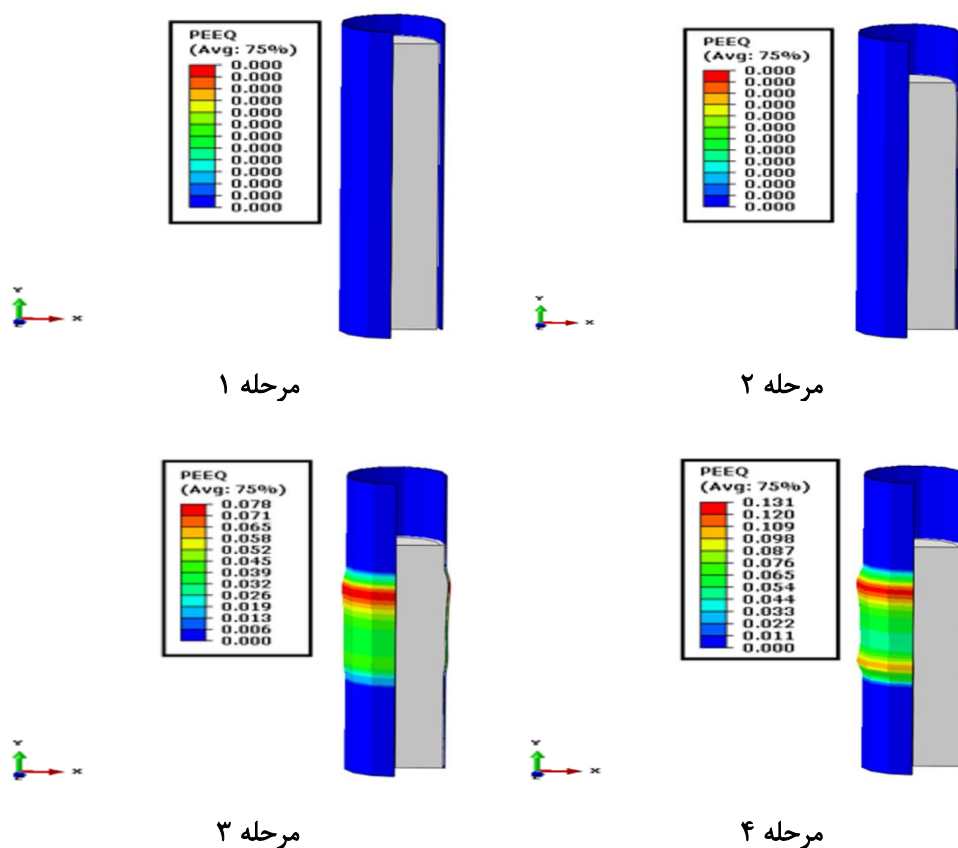
(ب)

(الف)

شکل ۴-۱۰: مقایسه ترکیدگی لوله در شبیه‌سازی و آزمون تجربی

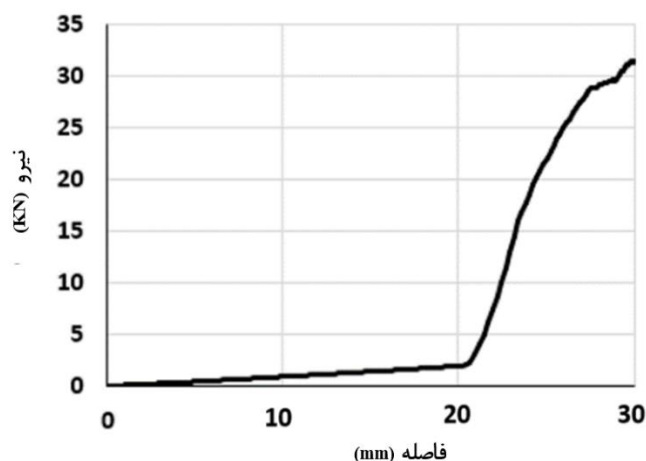
۴-۲-۳ اثر پارامترهای فرایند RPF به روش تاگوچی

در این بخش نخست به عنوان نمونه نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمون شماره‌ی نه ارائه شده، سپس گزارش مختصری از نتایج دیگر آزمون‌ها داده می‌شود.



شکل ۴-۱۱: توزیع کرنش موثر در لوله بدون درز تحت شبیه‌سازی عددی شماره‌ی ۹ از جدول ۳-۳

شکل ۴-۱۱ مراحل مختلف پیشرفت شبیه‌سازی نه را در چهار مرحله تا پایان فرایند نمایش می‌دهد. شکل ۴-۱۲ منحنی نیرو-جابه‌جایی مربوط به این فرایند را نمایش می‌دهد. همانطور که قابل پیش‌بینی است تا هنگام برخورد لاستیک با لوله تغییرات نیرو شیب کمی داشته که با برخورد لوله و لاستیک این شیب افزایش می‌یابد. نیروی بیشینه این فرایند برابر ۳۱ کیلونیوتن می‌باشد.



شکل ۴-۱۲: منحنی نیرو-جابه‌جایی شبیه‌سازی شماره ۹

در تحلیل داده‌های آزمایشگاهی، به منظور بررسی سهم هر یک از فاکتورهای متغیر بر توابع پاسخ، از روشی با عنوان اثرات اصلی^۱ استفاده می‌شود. به عنوان مثال برای بررسی اثر شعاع گوشه قالب بر تعداد چین‌خوردگی، کافی است میانگین تعداد چین‌خوردگی نمونه‌ها را در شبیه‌سازی‌هایی که شعاع گوشه قالب ۲، ۵ و ۱۰ میلی‌متر است؛ با هم مورد مقایسه قرار گیرد. مقادیر فوق به سادگی قابل محاسبه است:

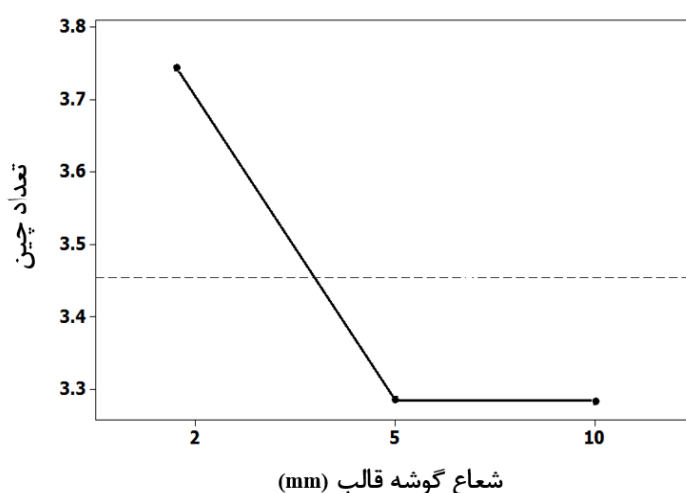
$$\text{تعداد متوسط چروکیدگی برای شعاع } 5 \text{ mm} = \frac{3 + 5 + 3 + 1 + 5 + 5 + 1 + 3 + 5 + 3 + 3 + 3}{12} = 3.33$$

$$\text{تعداد متوسط چروکیدگی برای شعاع } 10 \text{ mm} = 3.33$$

$$\text{تعداد متوسط چروکیدگی برای شعاع } 2 \text{ mm} = 3.75$$

^۱ Main Effects

بر طبق این روش می‌توان قضاوت کرد که با استفاده از شعاع گوشه قالب ۵ mm تنها در شرایطی که دیگر فاکتورها در محدوده تعیین شده، ثابت باشد در مقایسه با دیگر شعاع‌های ذکر شده، موجب ایجاد شدن تعداد چین‌خوردگی کمتر در نمونه تغییرشکل یافته خواهد شد. این سه میانگین را می‌توان در دیاگرام خطی مطابق شکل ۴-۱۳ نمایش داد. که به آن، دیاگرام اثر اصلی شعاع گوشه قالب گفته می‌شود.



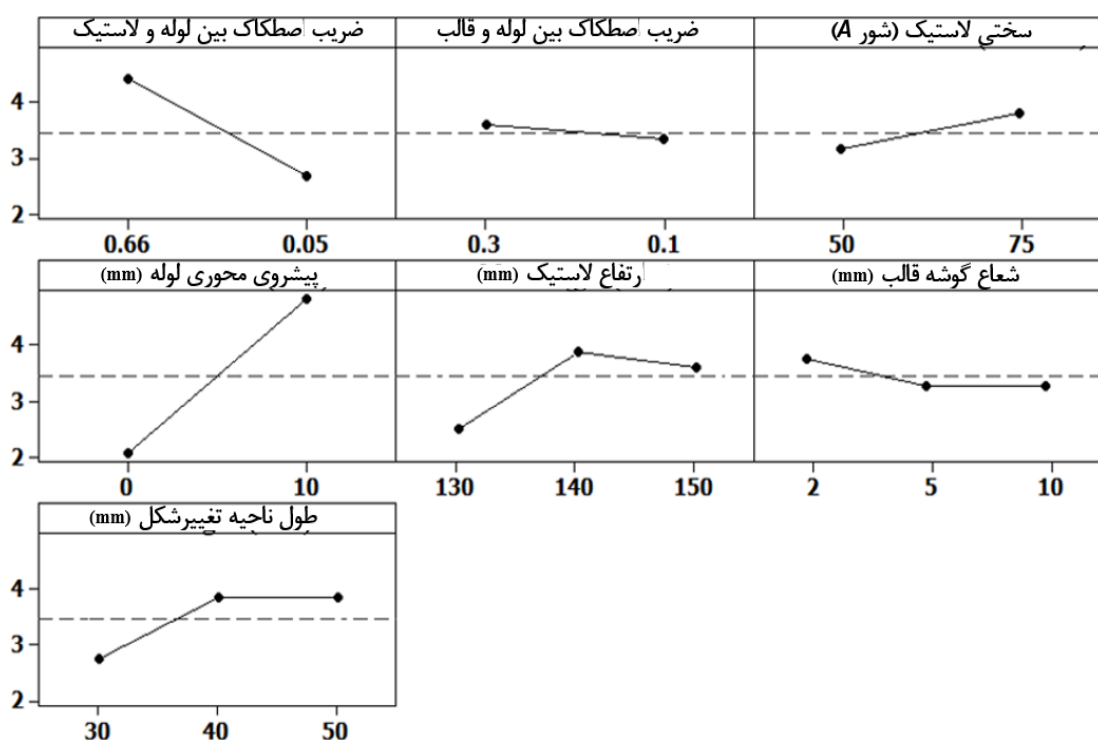
شکل ۴-۱۳: اثر اصلی شعاع گوشه قالب بر تعداد چین‌خوردگی

به صورت مشابه می‌توان چنین محاسبه‌ای را برای بررسی اثر دیگر متغیرهای مستقل بر روی تعداد چین‌خوردگی در محصول انجام داد که نتیجه در شکل ۴-۱۴ و جدول ۴-۱ گزارش شده است.

می‌توان دیگر متغیرهای پاسخ را انتخاب و نتایج مشابه را ارائه نمود که این نتایج به ترتیب برای عمق متوسط بالچینگ، اختلاف عمق بیشینه، نیروی فرایند، توزیع کرنش ضخامتی لوله و انحراف معیار ضخامتی لوله در جداول و شکل‌های بعدی نمایش داده شده است.

جدول ۴-۱: میانگین تعداد چین به ازای سطوح مختلف از عوامل هفت گانه

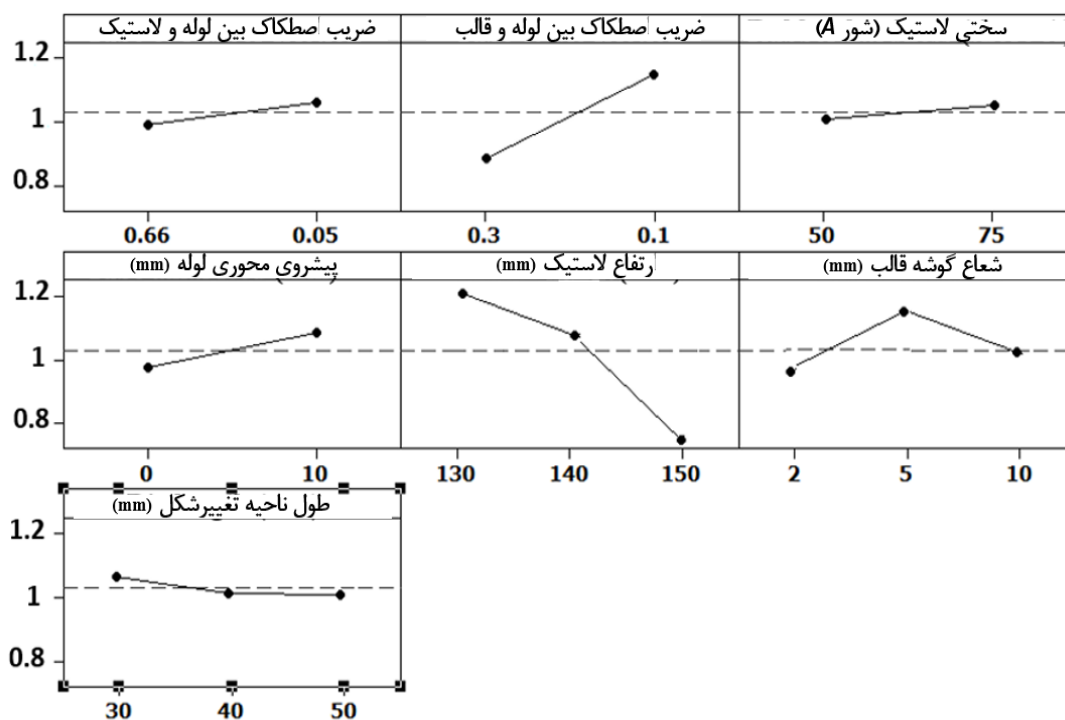
	A	B	C	D	E	F	G
تعداد میانگین چین- خوردگی	اصطکاک بین لوله و لاستیک	اصطکاک بین لوله و قالب	سختی لاستیک	پیشروی محوری لوله	ارتفاع لاستیک	شعاع گوشه قالب	طول ناحیه تغییر شکل
سطح ۱	۴/۴	۳/۶	۳/۸	۲/۰۹	۴/۱۴	۳/۳۳	۳/۸۵
سطح ۲	۲/۶۶	۳/۳۳	۳/۱۶	۴/۸۱	۳/۸۵	۳/۳۳	۳/۸۵
سطح ۳	-----	-----	-----	-----	۲/۵	۳/۷۵	۲/۷۵



شکل ۴-۱۴: اثرات اصلی عوامل مستقل بر روی تعداد چین

جدول ۴-۲: عمق متوسط بالچینگ به ازای سطوح مختلف از عوامل هفت گانه بر حسب میلی متر

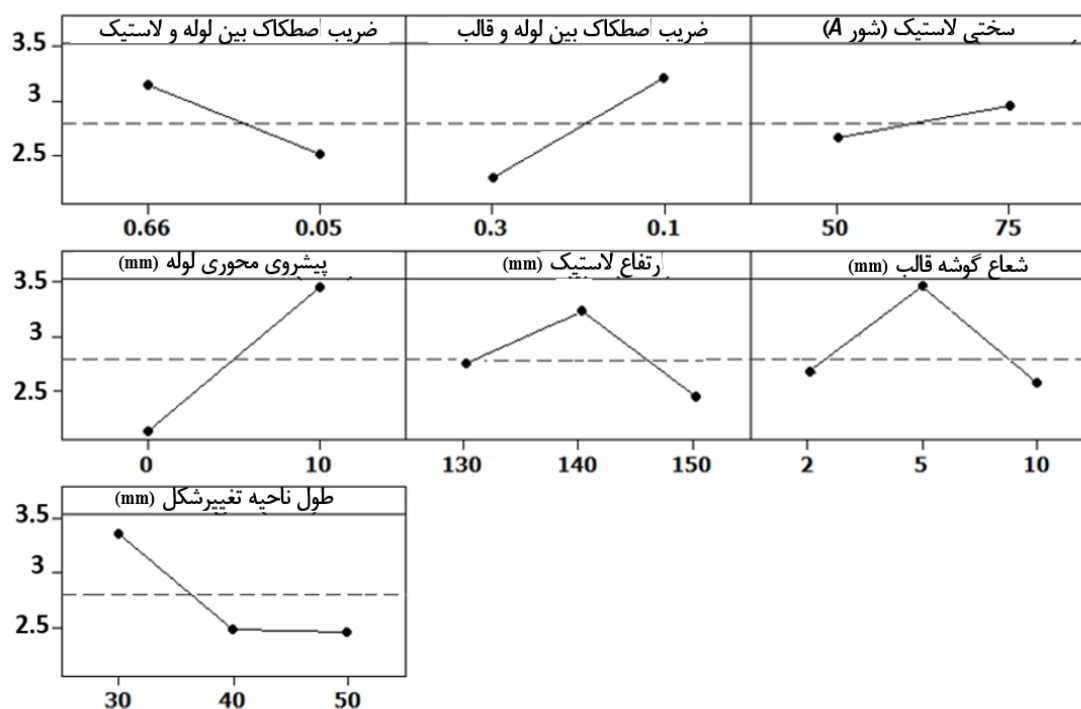
میانگین عمق متوسط بالچینگ (میلی متر)	A	B	C	D	E	F	G
	اصطکاک بین لوله و لاستیک	اصطکاک بین لوله و قالب	سختی لاستیک	پیشروی محوری لوله	ارتفاع لاستیک	شعاع گوشه قالب	طول ناحیه تغییر شکل
سطح ۱	۰/۹۹	۰/۸۸	۱/۰۵	۰/۹۷	۱/۰۸	۱/۱۵	۱
سطح ۲	۱/۰۶	۱/۱۵	۱	۱/۰۸	۰/۷۵	۱/۰۲	۱/۰۲
سطح ۳	-----	-----	-----	-----	۱/۲۲	۰/۹۲	۱/۰۶



شکل ۴-۱۵: اثرات اصلی عوامل مستقل بر روی عمق متوسط بالچینگ بر حسب میلی متر

جدول ۳-۴: میانگین اختلاف عمق بیشینه به ازای سطوح مختلف از عوامل هفت گانه بر حسب میلی متر

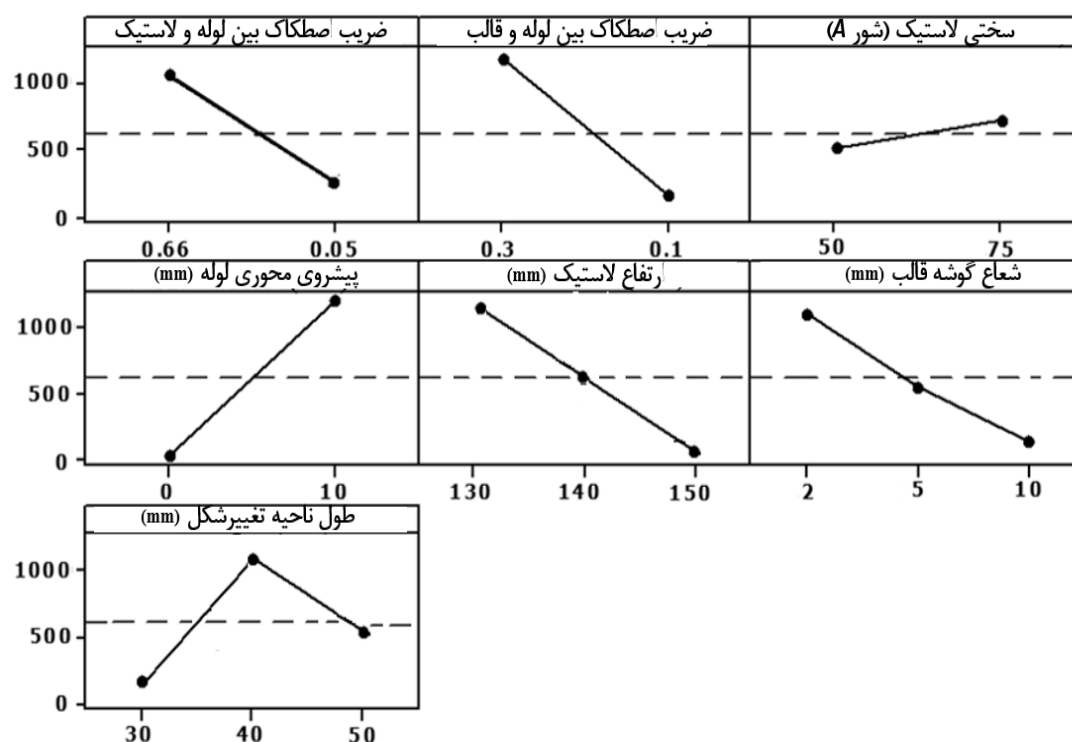
میانگین اختلاف عمق بیشینه (میلی- متر)	A	B	C	D	E	F	G
	اصطکاک بین لوله و لاستیک	اصطکاک بین لوله و قالب	سختی لاستیک	پیشروی محوری لوله	ارتفاع لاستیک	شعاع گوشه قالب	طول ناحیه تغییر شکل
سطح ۱	۳/۱۴	۲/۲۸	۲/۹۵	۲/۱۳	۳/۰۶	۳/۲۵	۲/۴۶
سطح ۲	۲/۴۹	۳/۲۱	۲/۶۶	۳/۴۵	۲/۵۹	۲/۴۶	۲/۴۷
سطح ۳	-----	-----	-----	-----	۲/۷۲	۲/۶۷	۳/۳۶



شکل ۴-۱۶: اثرات اصلی عوامل مستقل بر روی میانگین اختلاف عمق بیشینه

جدول ۴-۴: میانگین نیروی فرایند به ازای سطوح مختلف از عوامل هفت‌گانه بر حسب کیلونیوتن

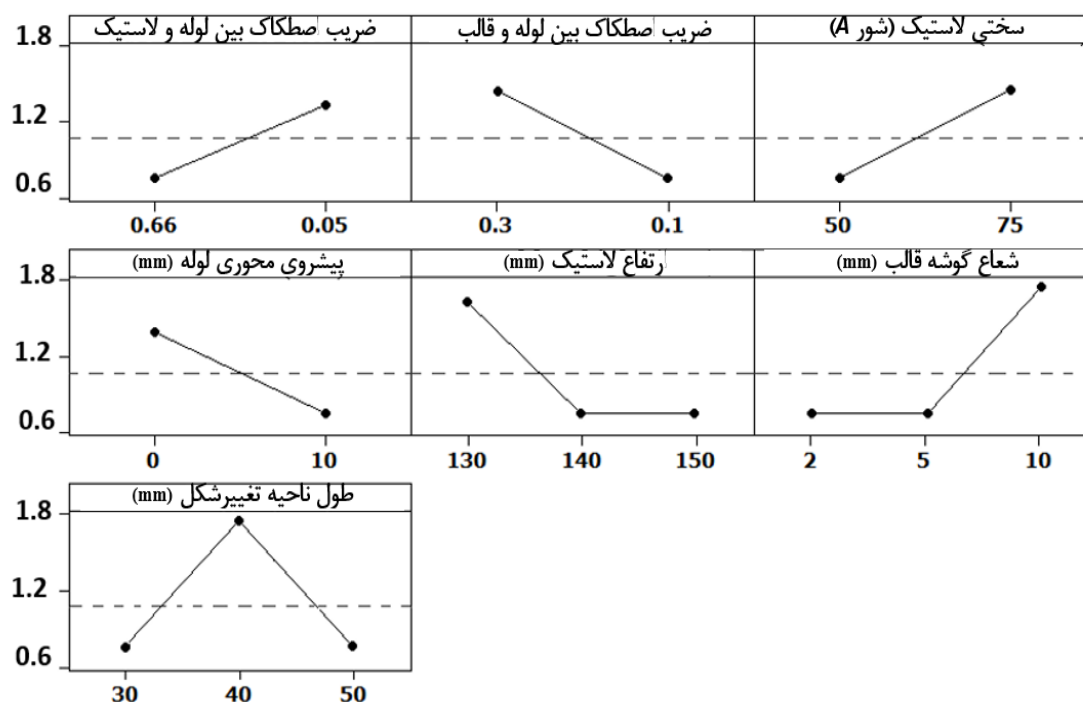
	A	B	C	D	E	F	G
میانگین نیروی فرایند (KN)	اصطکاک بین لوله و لاستیک	اصطکاک بین لوله و قالب	سختی لاستیک	پیشروی محوری لوله	ارتفاع لاستیک	شعاع گوشه قالب	طول ناحیه تغییر شکل
سطح ۱	۱۰۵۰	۱۱۷۹	۵۰۵/۷	۳۲/۳	۷۵۷	۱۴۲	۱۰۹۳
سطح ۲	۹۷/۴	۱۴۸/۷	۷۱۰	۱۲۰/۲	۴۶/۹	۵۴۵/۴	۶۴۸/۴
سطح ۳	-----	-----	-----	-----	۹۹۴	۱۰۹۶	۱۷۳/۵



شکل ۴-۱۷: اثرات اصلی عوامل مستقل بر روی میانگین نیروی فرایند بر حسب کیلو نیوتن

جدول ۴-۵: میانگین تغییر ضخامت متوسط به ازای سطوح مختلف از عوامل هفت گانه بر حسب میلی متر

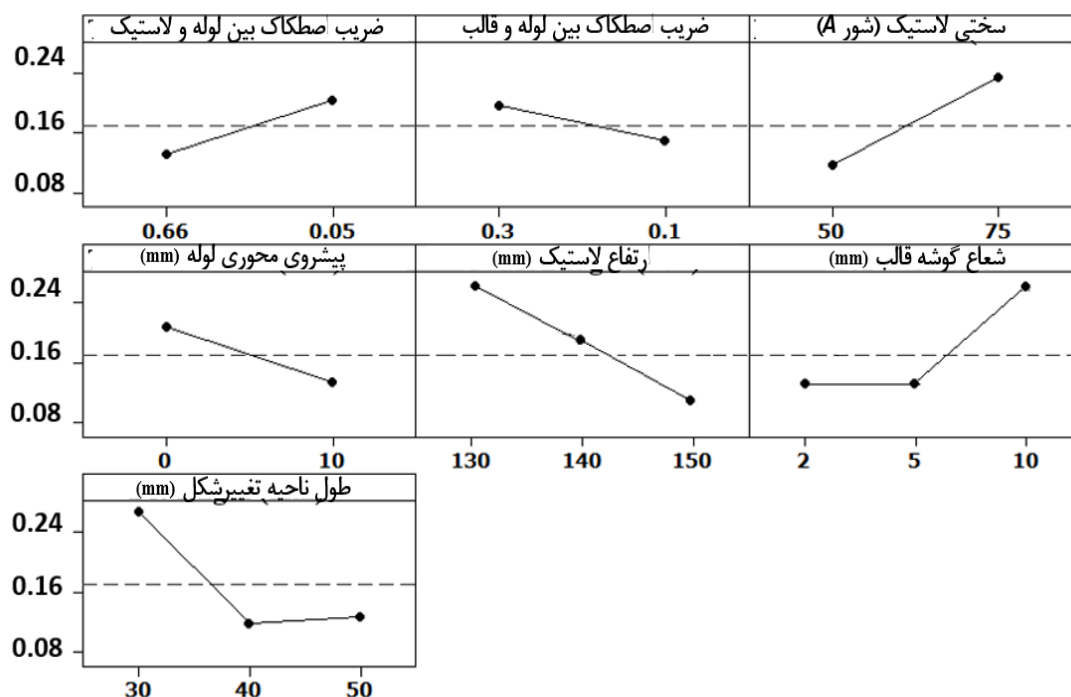
	A	B	C	D	E	F	G
میانگین ضخامت متوسط (میلی متر)	اصطکاک بین لوله و لاستیک	اصطکاک بین لوله و قالب	سختی لاستیک	پیشروی محوری لوله	ارتفاع لاستیک	شعاع گوشه قالب	طول ناحیه تغییر شکل
سطح ۱	۰/۷۵۳	۱/۴۴	۱/۴۴	۱/۳۹	۰/۷۵۴	۰/۷۵۴	۱/۷۴
سطح ۲	۱/۳۳	۰/۷۵۶	۰/۷۵۳	۰/۷۴۸	۰/۷۵۰	۱/۷۴	۰/۷۵۶
سطح ۳	-----	-----	-----	-----	۱/۶۲	۰/۷۵۴	۰/۷۵۳



شکل ۴-۱۸: اثرات اصلی عوامل مستقل بر روی میانگین تغییر ضخامت متوسط بر حسب میلی متر

جدول ۴-۶: میانگین انحراف استاندارد کرنش ضخامتی به ازای سطوح مختلف از عوامل هفت گانه

	A	B	C	D	E	F	G
انحراف معیار (10^{-4})	اصطکاک بین لوله و لاستیک	اصطکاک بین لوله و قالب	سختی لاستیک	پیشروی محوری لوله	ارتفاع لاستیک	شعاع گوشه قالب	طول ناحیه تغییر شکل
سطح ۱	۰/۱۳۱	۰/۱۹۶	۰/۲۳۳	۰/۲۰۷	۰/۱۵۵	۰/۱۳۰	۰/۲۶۹
سطح ۲	۰/۲۰۲	۰/۱۴۸	۰/۱۱۷	۰/۱۳۳	۰/۰۷۳	۰/۲۶۱	۰/۱۱۹
سطح ۳	-----	-----	-----	-----	۰/۲۶۸	۰/۱۲۵	۰/۱۲۸



شکل ۴-۱۹: اثرات اصلی عوامل مستقل بر روی میانگین انحراف استاندارد کرنش ضخامتی (10^{-4})

از منحنی‌های اثرات اصلی فوق‌الذکر که در شکل ۴-۱۵ تا شکل ۴-۱۹ ارائه شده است به سادگی می‌توان نتایج مفید و کاربردی را استخراج نمود. تنها باید به این امر توجه داشت که این نتایج در محدوده تعیین شده از متغیرهای مستقل جدول ۳-۲ برقرار بوده و در خارج از این محدوده لزوماً قابل بسط نمی‌باشد. تعدادی از مهم‌ترین این نتایج بر روی چین‌خوردگی، عمق متوسط بالجینگ، اختلاف عمق بیشینه، نیروی فرایند، توزیع کرنش ضخامتی لوله و انحراف معیار ضخامت لوله به شرح زیر می‌باشد:

- انتخاب ضریب اصطکاک پایین بین لوله و قالب، همچنین لوله و لاستیک موجب کاهش قابل توجه چین‌خوردگی در محصول می‌گردد. البته تاثیر کاهش این ضریب بین لوله و قالب بر چین‌خوردگی قابل توجه نبوده ولی موجب افزایش عمق متوسط بالجینگ می‌گردد. همچنین این کاهش ضریب اصطکاک باعث کاهش نیروی فرایند می‌شود.
- انجام شبیه‌سازی با سختی مختلف لاستیک هیچ تاثیری بر روی چین‌خوردگی، نیروی فرایند، عمق متوسط بالجینگ و اختلاف عمق بیشینه نداشته است. لکن بر روی کرنش ضخامتی و انحراف معیار آن تاثیر جزئی داشته است.
- اگر چه پیشروی محوری لوله تاثیر قابل توجهی بر روی عمق متوسط بالجینگ ندارد، اما مقادیر نیروی فرایند و چین‌خوردگی به شدت از این ترم تاثیر می‌پذیرد.
- در شرایط کاملاً یکسان استفاده از شعاع گوشه قالب کوچکتر در شکل‌دهی با بالشتک کشسان، بیشترین تاثیر را در افزایش نیروی فرایند خواهد داشت. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که کاهش شعاع گوشه قالب موجب افزایش اختلاف عمق بیشینه و بالطبع این تاثیر باعث افزایش چین‌خوردگی خواهد شد.
- قرار دادن لوله در قالب‌هایی با طول کمتر در ناحیه تغییرشکل، موجب کاهش در نیروی فرایند و مقدار چین‌خوردگی می‌گردد. از سوی دیگر شبیه‌سازی‌های انجام شده مشخص می‌کند طول ناحیه تغییرشکل تاثیر زیادی بر عمق متوسط بالجینگ نخواهد شد.
- هرچه ارتفاع لاستیک مورد استفاده افزایش یابد این امر موجب کاهش نیروی فرایند و عمق متوسط بالجینگ می‌شود، همچنین افزایش ارتفاع لاستیک باعث کمتر شدن ضخامت متوسط

خواهد شد. از طرفی در محدوده مورد بررسی، در ارتفاع لاستیک ۱۴۰ mm بیشترین تعداد چین مشاهده می‌شود.

همچنین برای تقریب ریاضی داده‌ها از روش سطح پاسخ^۱ استفاده شد. با استفاده از تقریب خطی سطح پاسخ، توابع تعداد چین خوردگی (NW)، عمق متوسط بالچینگ (U)، نیروی فرایند (RF)، اختلاف عمق بیشینه (Δu^{max})، میانگین تغییر ضخامت (Δt) و انحراف استاندارد کرنش ضخامتی ($St.Dev(t_{av})$) به ترتیب به صورت معادلات زیر بدست آمد.

$$NW = -1.73031 \times A - 0.294333 \times B - 0.736901 \times C + 2.83333 \times D - 0.369584 \times E + 0.409149 \times F - 0.288139 \times G + 3.97279 \quad (۱-۴)$$

$$U = 0.000110 \times A + 0.000287 \times B + (2.1 \times 10^{-5}) \times C + (7.1 \times 10^{-5}) \times D + (2.4 \times 10^{-5}) \times E - (1.17 \times 10^{-4}) \times F - (3.9 \times 10^{-5}) \times G + 0.000543 \quad (۲-۴)$$

$$RF = 926376 \times A - 700427 \times B + 170118 \times C + 1072021 \times D + 64526 \times E + 389107 \times F - 302980 \times G - 1934161 \quad (۳-۴)$$

$$\Delta u^{max} = (-7.01 \times 10^{-4}) \times A + 0.000573 \times B - (3.52 \times 10^{-4}) \times C + 0.00132 \times D + (2.86 \times 10^{-6}) \times E - (1.30 \times 10^{-4}) \times F + 0.000399 \times G + 0.001010 \quad (۴-۴)$$

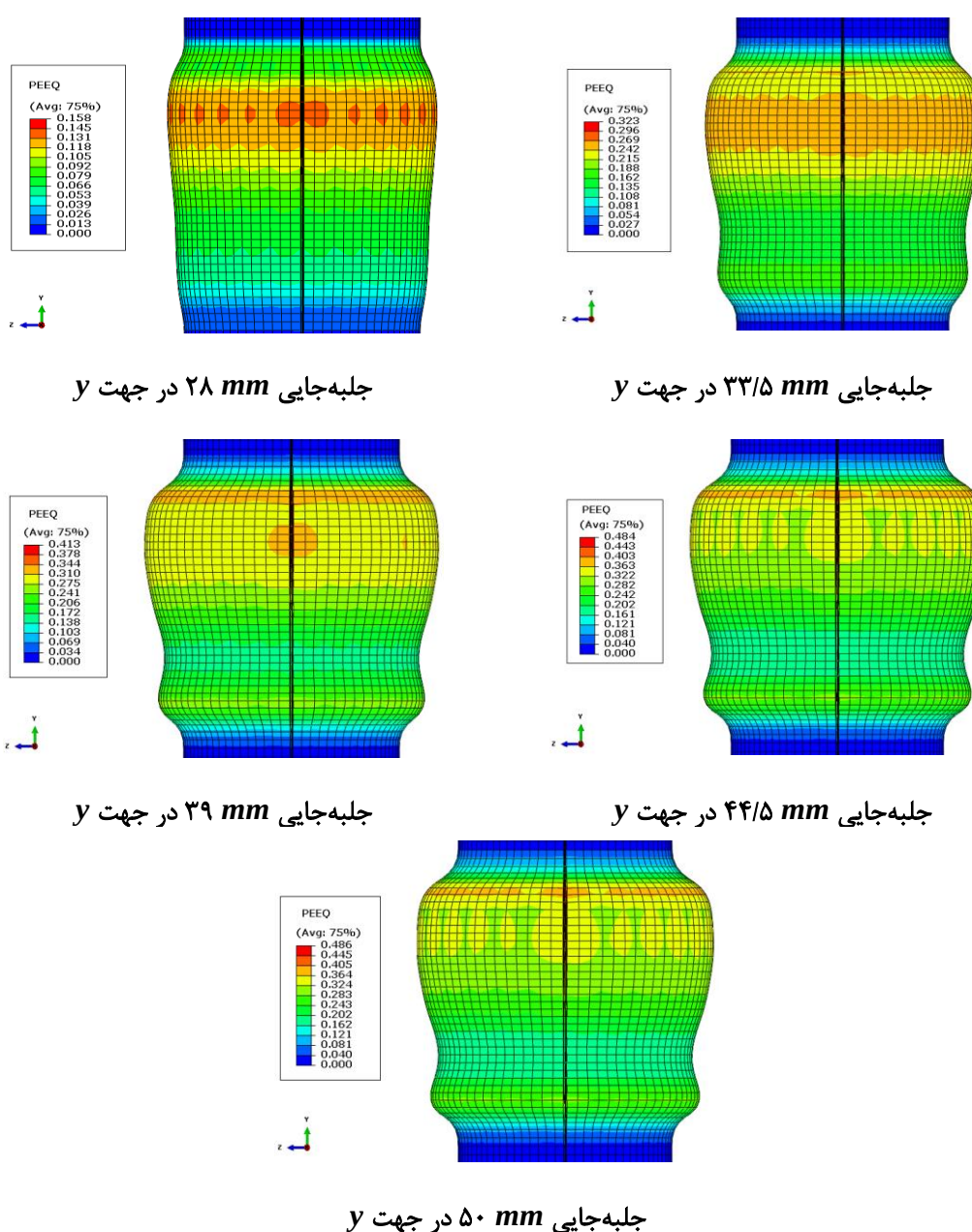
$$\Delta t = (41 \times 10^{-5}) \times A - (5.3 \times 10^{-4}) \times B - (8.48 \times 10^{-4}) \times C - (5.9 \times 10^{-4}) \times D + (5.6 \times 10^{-4}) \times E + (9.8 \times 10^{-5}) \times F - (2.65 \times 10^{-4}) \times G + 0.002583 \quad (۵-۴)$$

$$St.Dev(t_{av}) = (4.98 \times 10^{-6}) \times A - (2.7 \times 10^{-6}) \times B - (1.35 \times 10^{-5}) \times C - (6.86 \times 10^{-6}) \times D + (7.58 \times 10^{-6}) \times E + (1.20 \times 10^{-6}) \times F - (4.68 \times 10^{-6}) \times G + (3.58 \times 10^{-5}) \quad (۶-۴)$$

^۱ Response surface

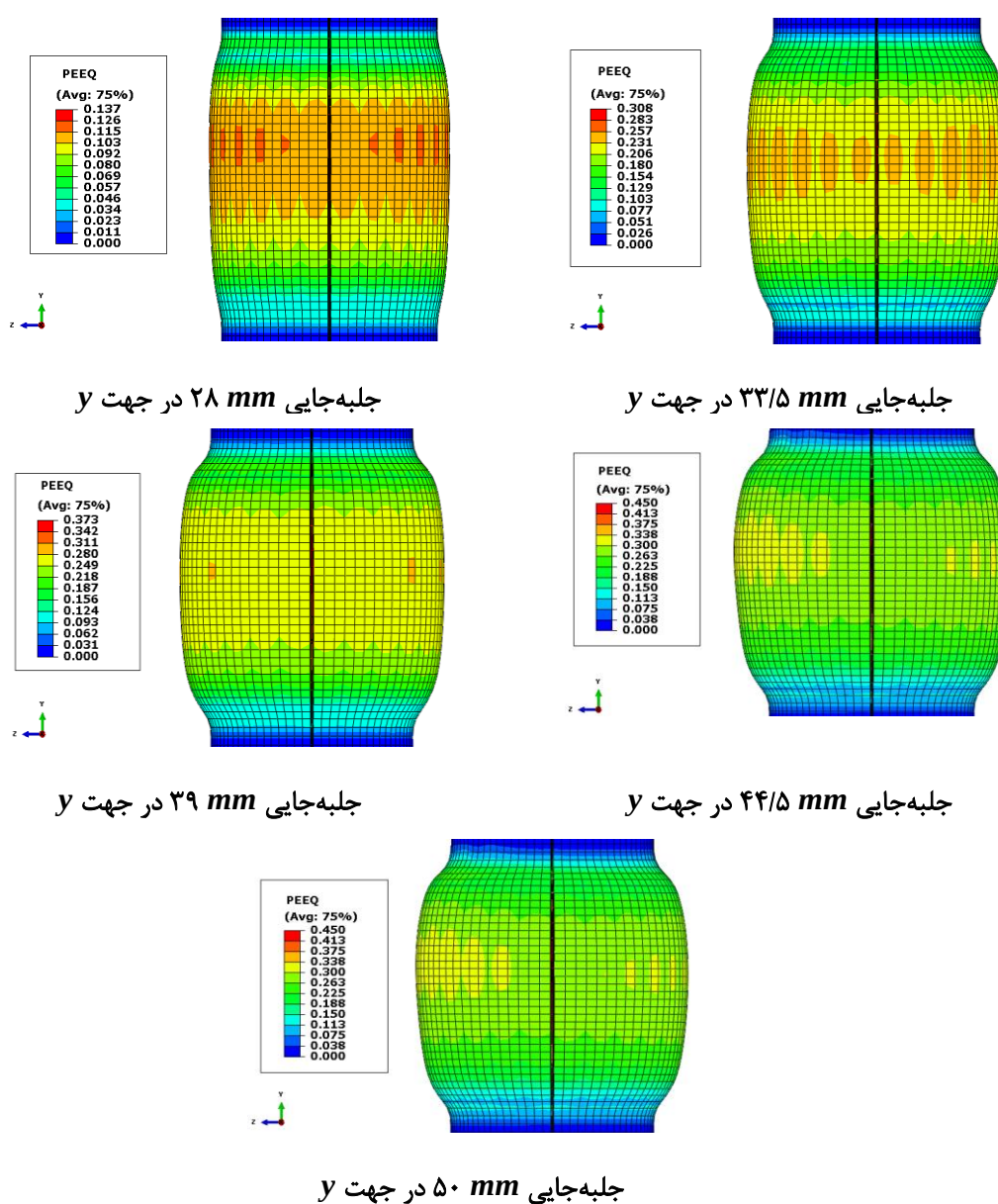
۴-۲-۴ فرایند انبساطدهی لوله فولادی درزدار با روش RPF

نتایج عددی مربوط به انبساطدهی لوله فولادی زنگ نزن درزدار ۳۰۴، در این بخش بررسی می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل پارامترهای موثر فرایند و همچنین تعداد آزمون‌های طراحی شده در بخش تجربی، ابتدا شبیه‌سازی فرایند انبساطدهی با اعمال جابه‌جایی متفاوت سنبه و در شرایط بدون روانکار مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت ضرایب اصطکاک بین لوله و قالب، لوله و لاستیک با توجه به جدول ۳-۶ در نظر گرفته شده است. شکل ۴-۲۰ توزیع کرنش پلاستیک موثر لوله را در پنج مرحله از تحلیل نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۰: توزیع کرنش پلاستیک موثر در حالت بدون روانکار در پنج مرحله (جابه‌جایی سنبه در جهت y)

ملاحظه می‌شود که در حالت بدون روانکار، افزایش قطر لوله به صورت متقارن نبوده و همچنین با افزایش میزان جابه‌جایی اعمال شده بر لاستیک، در لوله چین‌خوردگی ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که این انبساط نامتقارن و پدید آمدن چین‌خوردگی به دلیل حضور اصطکاک بالا بین اجزای قالب، بخصوص بین لوله و پلی‌اورتان می‌باشد. به منظور کنترل اصطکاک بین اجزای قالب و با هدف ایجاد افزایش قطر به صورت متقارن در لوله، شبیه‌سازی‌ها با اعمال شرایط روانکاری فیلم جامدی از نایلون بین لوله و پلی‌اورتان و شرایط بدون روانکار بین لوله و قالب تکرار شد. شکل ۴-۲۱ توزیع کرنش پلاستیک را در لوله برای این حالت در پنج مرحله از تحلیل نشان می‌دهد.

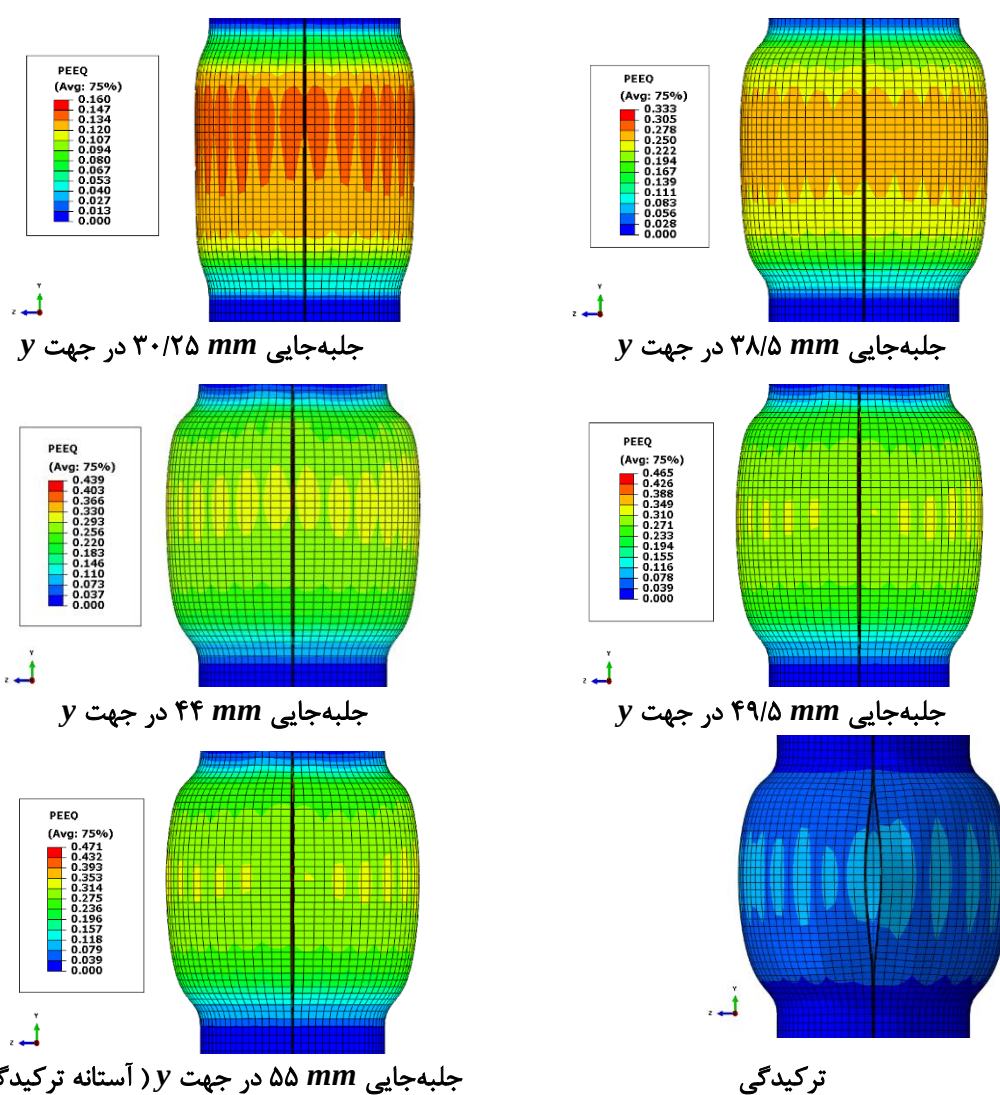


شکل ۴-۲۱: توزیع کرنش پلاستیک موثر در شرایط روانکاری فیلم جامد بین لوله و لاستیک در پنج مرحله

(جابه‌جایی سنبه در جهت y)

با در نظر گرفتن این شرایط افزایش قطر لوله به صورت متقارن و فرایند انبساطدهی بدون حضور چین خوردگی انجام گرفته است. همچنین قطر نهایی لوله برای جابه‌جایی سنبه به میزان ۵۰ mm برابر ۵۱/۵ mm می‌باشد.

با اعمال شرایط روانکاری کامل - با فیلم جامد نایلون بین لوله و پلی‌اورتان، و روانکاری با لایه مرزی روغن کشش بین لوله و قالب - با هدف رسیدن به افزایش قطر بیشتر شبیه‌سازی انجام گرفت. با استفاده از شرایط روانکاری در دو طرف لوله؛ علیرغم آنکه توزیع کرنش پلاستیک در لوله یکنواخت‌تر شده است اما افزایش قطر بحرانی نسبت به حالت قبل در لوله ملاحظه نشد.

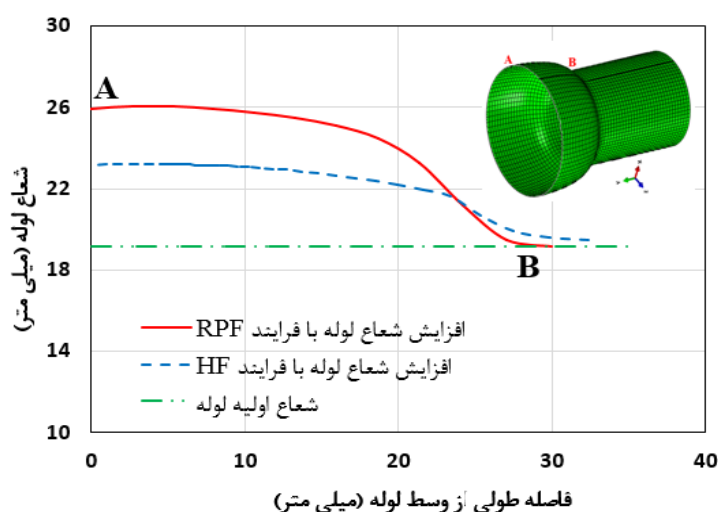


شکل ۴-۲۲: توزیع کرنش پلاستیک موثر در شرایط روانکاری کامل در شش مرحله (جابه‌جایی سنبه در جهت y) به منظور رسیدن به قطر پارگی لوله و با اعمال روانکاری در دو طرف آن، میزان جابه‌جایی سنبه را افزایش داده و شبیه‌سازی تکرار گردید. با اعمال جابه‌جایی ۵۵ mm به سنبه، پارامتر شکل‌پذیری W_{FLD}

به میزان حداکثر خود یعنی یک رسیده و لوله در آستانه ترکیدگی قرار می‌گیرد. در نتیجه با اعمال جابه‌جایی بیشتر از این مقدار پارگی در لوله رخ خواهد داد. شکل ۴-۲۲ توزیع کرنش پلاستیک موثر در لوله را برای این حالت در شش مرحله نمایش می‌دهد. قطر نهایی بالجینگ در لحظه ترکیدگی لوله ۵۵/۵ mm می‌باشد.

۴-۲-۵ مقایسه نتایج عددی فرایند انبساطدهی لوله با لاستیک با فرایند هیدروبالجینگ

لازم به ذکر است که FLD استفاده شده برای تخمین پارگی در دو فرایند مذکور با هم متفاوت بوده که شرح بیشتر در خصوص نحوه استحصال آن در بخش نتایج تجربی ذکر خواهد شد. شکل ۴-۲۳ شعاع لوله را در آستانه پارگی بر روی مسیر AB با استفاده از دو فرایند هیدروبالجینگ و انبساطدهی با بالشتک کشسان با روانکاری کامل نشان می‌دهد. می‌توان گفت که به دلیل بالا بودن فشار هیدرواستاتیکی در فرایند انبساطدهی با بالشتک کشسان میزان تغییر شکل ایجاد شده افزایش یافته است. بر طبق نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی انبساطدهی با روش RPF، در قطر ۵۵/۵ mm لوله؛ پارگی اتفاق می‌افتد در صورتی که با استفاده از روش HF، قطر ترکیدگی لوله ۴۶/۵ mm می‌باشد. لذا در فرایند انبساطدهی آزاد لوله با روش شکل‌دهی با بالشتک کشسان؛ به میزان ۱۹ درصد افزایش قطر بالجینگ نسبت به روش هیدروفرمینگ مشاهده می‌شود.

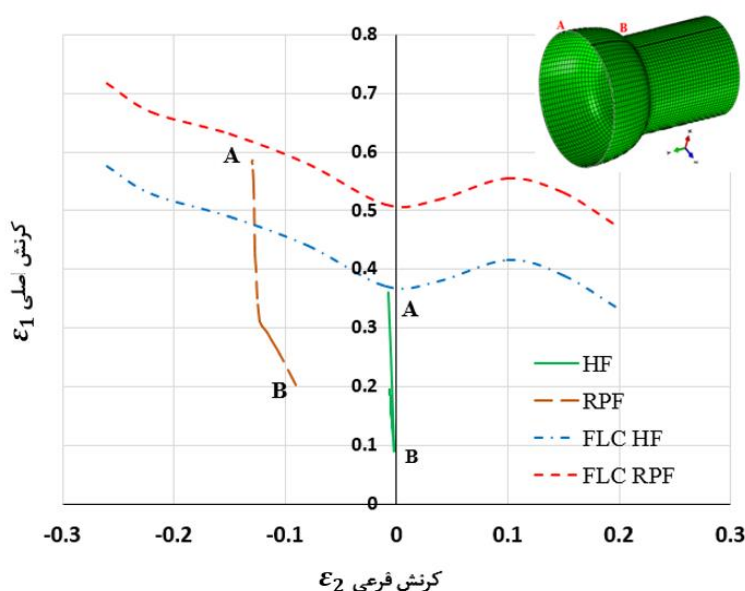


شکل ۴-۲۳: تغییرات شعاع در آستانه ترکیدگی در دو فرایند RPF و HF بر روی مسیر طولی AB به کمک روش عددی

انبساطدهی آزاد لوله در زردار فولادی به وسیله بالشتک کشسان در مقایسه با استفاده از سیال به منظور افزایش قطر لوله با توجه به نتایج شبیه سازی کارآمدتر می باشد.

شکل ۴-۲۴ امضای کرنشی دو فرایند انبساطدهی لوله با بالشتک کشسان و با استفاده از سیال را در آستانه پارگی لوله نشان می دهد. با توجه به اینکه منحنی FLD کمترین شکل پذیری را در مسیر کرنش صفحه ای ($\beta = 0$) نشان می دهد؛ لذا استفاده از فرایندهایی که امضای کرنشی آن ها بر روی این مسیر باشد دارای شکل پذیری کمتری می باشد.

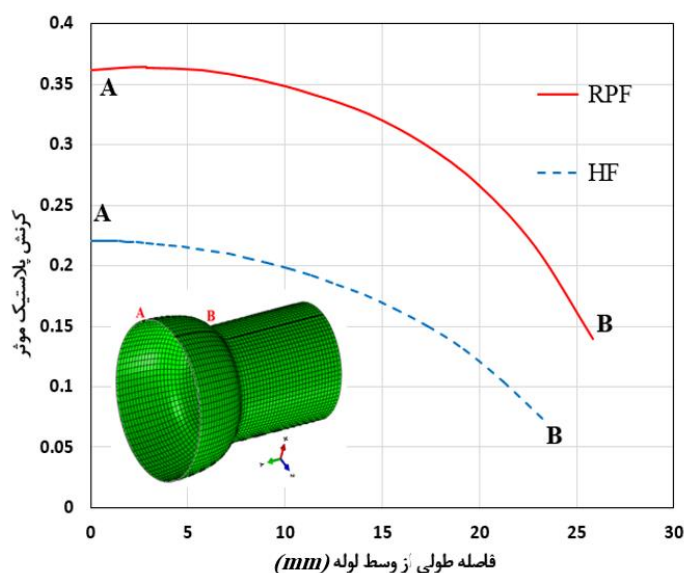
روش هایی که بتوان به کمک آن امضای کرنشی فرایند را در جهات راست و یا چپ منحنی FLD منحرف کرد، روش های بهبود شکل پذیری تلقی می شود. به عنوان مثال وجود پیشروی محوری در فرایند هیدروبالجینگ، مشروط به عدم چین خوردگی باعث منحرف ساختن امضای کرنشی به سمت چپ می شود [۲۳]. مطابق شکل نقطه برخورد امضای کرنشی و منحنی FLD در وسط لوله (نقطه A) قرار دارد که نقطه شروع پارگی لوله پیش بینی می شود. این شکل نشان می دهد که وجود اصطکاک در فرایند RPF به عنوان یک عامل پیشروی محوری لوله باعث انحراف امضای کرنش به سمت چپ باعث بهبود شکل پذیری شده است.



شکل ۴-۲۴: مقایسه امضای کرنشی دو فرایند RPF و HF در آستانه ترکیدگی لوله

بر روی مسیر AB به کمک روش عددی

در شکل ۴-۲۵ تغییرات کرنش پلاستیک موثر لوله بر روی یک مسیر طولی از مرکز لوله (AB) نمایش داده می‌شود. در مجموع مقایسه کرنش موثر دو فرایند حاکی از افزایش ۵۰ درصدی سطح کرنش موثر پلاستیک بحرانی در فرایند RPF نسبت به فرایند HF می‌باشد.



شکل ۴-۲۵: کرنش پلاستیک موثر دو فرایند RPF و HF

به طور کلی در فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله به کمک فرایند RPF نسبت به HF دو عامل موجب بهبود قابل توجه در شکل‌پذیری لوله می‌گردد. عامل اول: سطح منحنی حد شکل‌دهی به علت بالاتر بودن میزان فشار هیدرواستاتیک در فرایند RPF نسبت به HF بالاتر می‌رود. عامل دوم: انحراف امضای کرنش فرایند RPF از مسیر $\beta = 0$ به مسیر $\beta < 0$ به علت وجود اصطکاک در فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان و ایجاد تغذیه محوری که خود موجب تغییر شکل بیشتر در ناحیه ایمن از پنجره شکل‌دهی خواهد شد.

۴-۳ نتایج تجربی انبساط‌دهی لوله با روش RPF و صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت، نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی در دو بخش انبساط‌دهی آزاد و انبساط‌دهی در قالب بسته میل بادامک با روش RPF مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش اول که در بردارنده نتایج انبساط-دهی آزاد با روش RPF می‌باشد؛ نخست نتایج مربوط به شرایط عدم حضور روانکار و سپس با اعمال

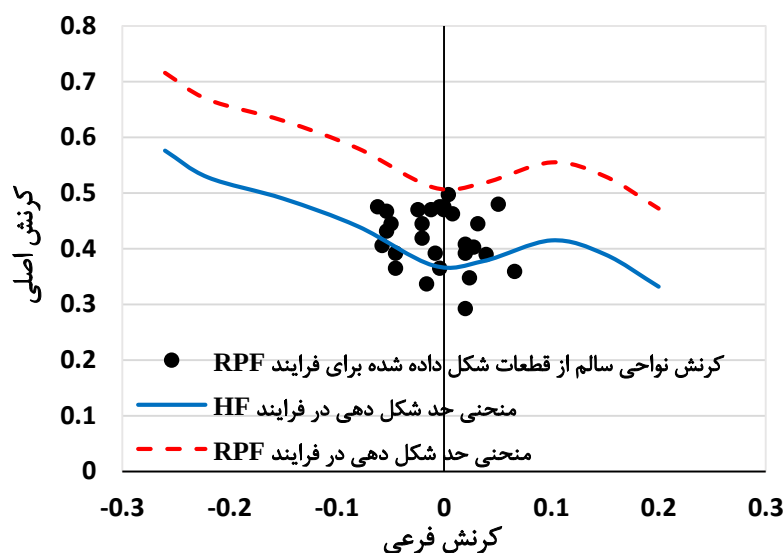
روانکاری کامل بین قطعات ارائه می‌شود. در بخش دوم نیز نتایج مربوط به آزمایش‌های تجربی انبساط-دهی لوله به منظور امکان‌سنجی تولید میل بادامک با روش RPF ارائه شده است. در پایان نیز نتایج با روش HF مورد مقایسه قرار گرفته است.

پس از انجام شبیه‌سازی و مطالعه اثر پارامترهای فرایند، قالبی با ابعاد ارائه شده در پیوست ساخته شد و آزمایش‌های تجربی با شرایط مندرج در جدول ۳-۶ انجام گردید. تعدادی از لوله‌های شکل داده شده در آزمایشگاه در شکل ۴-۲۶ مشاهده می‌گردد. به منظور صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی؛ توزیع کرنش و ضخامت در جهت محیطی و طولی، حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی، با یکدیگر مقایسه شدند.



شکل ۴-۲۶: تعدادی از لوله‌های شکل داده شده در آزمایشگاه

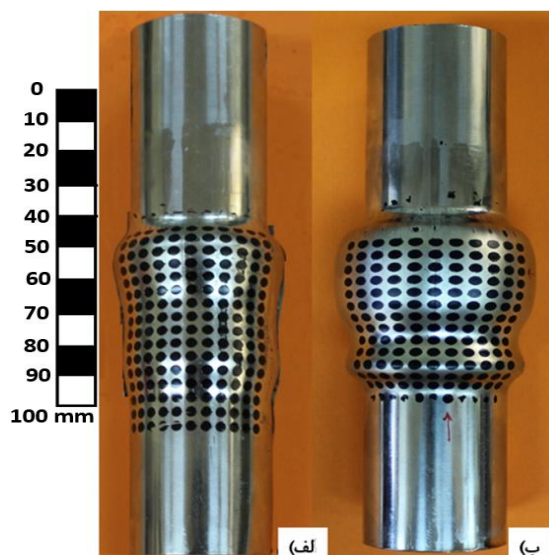
در شکل ۴-۲۷ حالت کرنش نقاط سالم از محصولات شکل داده شد بر روی صفحه کرنش نمایش داده شده است، همانطور که مشاهده می‌شود این نقاط به مقدار قابل توجهی بالاتر از منحنی FLD لوله می‌باشد که با روش هیدروفرمینگ از مرجع [۲۳] بدست آمده است. این مقایسه نشان می‌دهد که حد شکل‌دهی در فرایند RPF نسبت به HF افزایش یافته است؛ لذا به منظور تطابق هر چه بهتر نتایج عددی و تجربی در پیش‌بینی لحظه پارگی، منحنی حد شکل‌دهی HF را تا زمانیکه تمامی نقاط اندازه‌گیری شده پایین‌تر از این منحنی قرار بگیرند جابه‌جا کرده و تحلیل فرایند با منحنی اصلاح شده حاصل از نتایج تجربی انجام گرفته است. این افزایش شکل‌پذیری در فرایند RPF نسبت به HF می‌تواند از افزایش فشار تماسی در فرایند RPF نشأت گرفته باشد.



شکل ۴-۲۷: منحنی حد شکل دهی لوله فولادی زنگ نزن ۳۰۴ در فرایند RPF

۴-۳-۱ انبساط دهی آزاد لوله با روش RPF

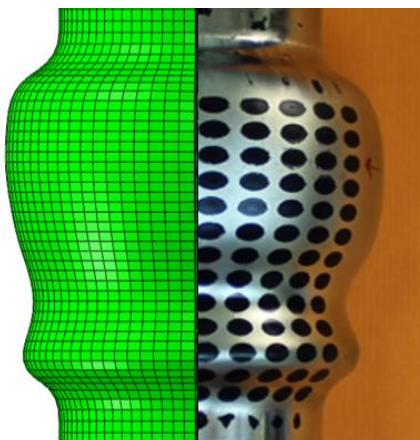
در این حالت از بارگذاری، پس از قرار دادن لوله در داخل قالب، سنبه با اعمال فشار بر روی لاستیک باعث انبساط شعاعی لاستیک در ناحیه شبکه بندی شده لوله می شود. به منظور محاسبه کرنش و رسم مسیر آن نقاط نزدیک به درز لوله مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدای آزمون های تجربی، فرایند انبساط-دهی با اعمال جابه جایی متفاوت سنبه و در شرایط بدون روانکار مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۴-۲۸: تغییر شکل لوله در شرایط بدون روانکار، (الف) جابه جایی ۳۰ mm، (ب) جابه جایی ۵۰ mm

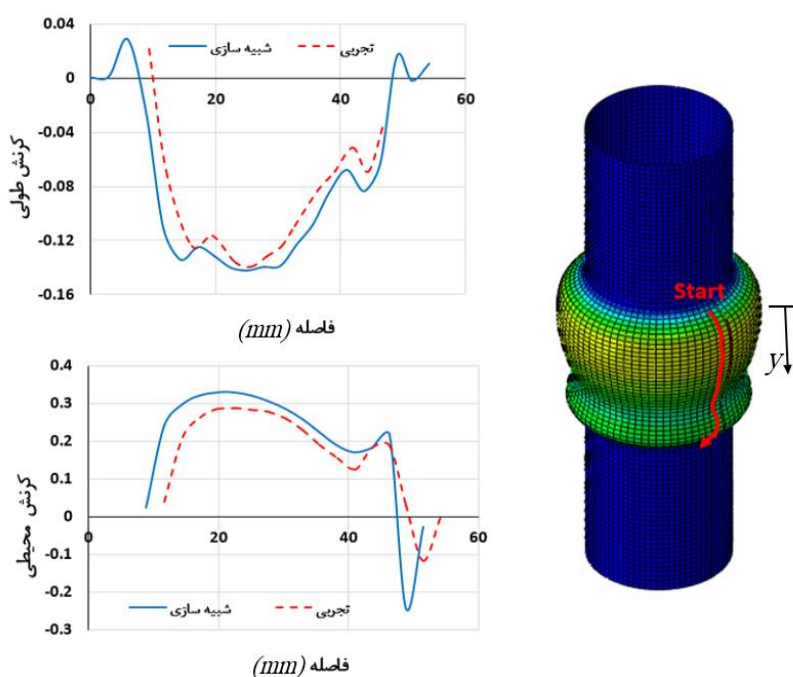
با توجه به اصطکاک بالا بین لاستیک و لوله در فرایند شکل دهی با بالشتک کشسان، همانطور که در شکل ۴-۲۸ قابل مشاهده است لاستیک لوله را در راستای حرکت خود پیش می راند و از ابتدای فرایند

روند چین خوردگی آغاز و تا انتها کامل می‌شود. به علت پیشروی یک طرفه سنبه از بالای قطعه روند چین خوردگی نسبت به صفحه وسط لوله کاملاً نامتقارن است.



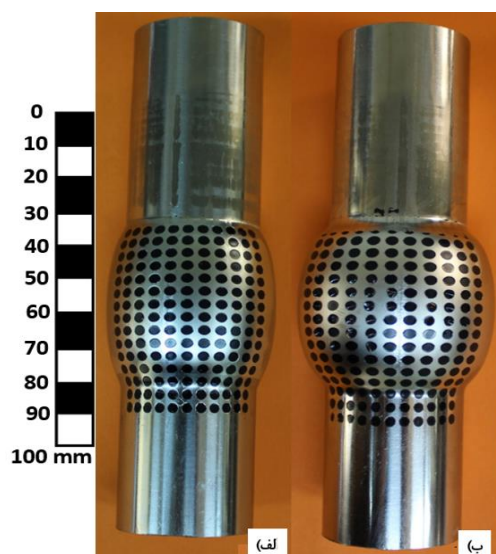
شکل ۴-۲۹: مقایسه هندسه تغییر شکل در شبیه‌سازی و آزمون تجربی

شکل ۴-۲۹ تصویر لوله تغییر شکل یافته را در آزمون تجربی و شبیه‌سازی در کنار یکدیگر نمایش می‌دهد. در شکل ۴-۳۰ توزیع کرنش در جهت محیطی و طولی لوله بر روی مسیر طولی در شرایط بدون روانکاری با جابه‌جایی ۵۰ mm سنبه قابل مشاهده است. مطابق شکل نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمون تجربی با دقت قابل توجهی بر هم انطباق دارد.



شکل ۴-۳۰: توزیع کرنش محیطی و طولی در لوله بدون حضور روانکار، با اعمال جابه‌جایی ۵۰ mm

پس از مشاهده اثر اصطکاک بر روی فرایند، با هدف دستیابی به قطعه‌ای سالم و انبساطدهی متقارن لوله؛ با اعمال شرایط روانکاری مختلف طبق جدول ۳-۶ آزمایش‌ها ادامه داده شد.



شکل ۴-۳۱: تغییر شکل لوله در شرایط روانکاری کامل، الف) جابه‌جایی ۳۰ mm، ب) جابه‌جایی ۵۰ mm

در شکل ۴-۳۱ چگونگی تغییر شکل ایجاد شده در لوله فولادی درزدار را با اعمال شرایط روانکاری کامل (استفاده از روغن کشش و نایلون در سطح برخورد لوله و لاستیک، و استفاده از روغن کشش بین سطح لوله و قالب) قابل مشاهده است. تغییر شکل لوله‌ها نشان داد که کنترل اصطکاک اصلی‌ترین عامل در حذف چروکیدگی و انبساطدهی نامتقارن ایجاد شده در مراحل قبل می‌باشد. با این شرایط اعمالی، قطر لوله برای جابه‌جایی ۳۰ و ۵۰ میلی‌متری سنبه به ترتیب $48/3$ و $56/6$ میلی‌متر می‌باشد.

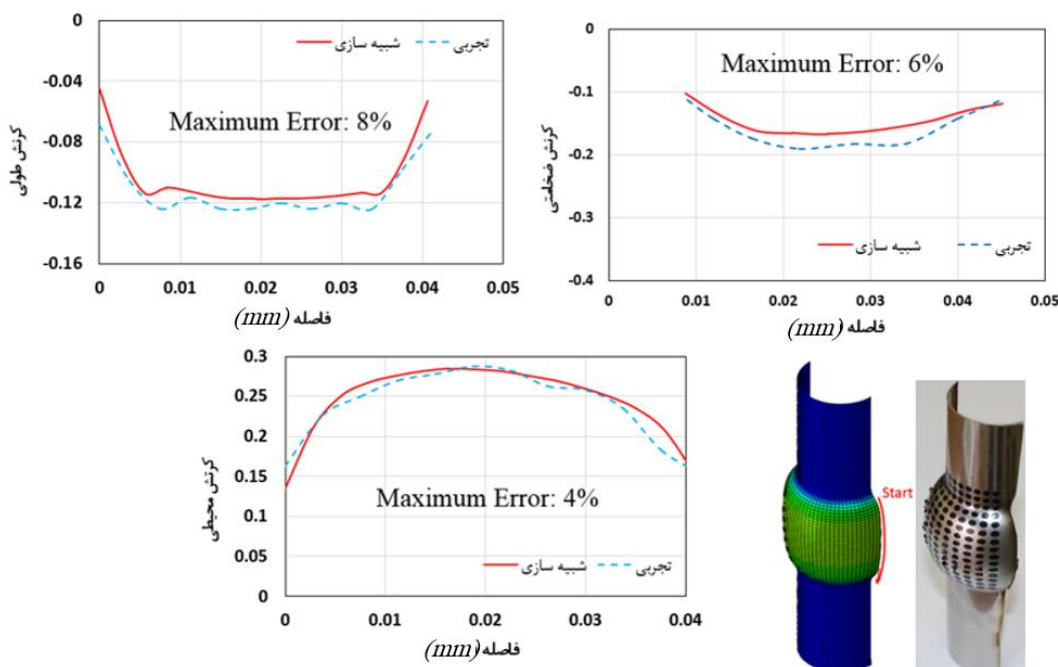


شکل ۴-۳۲: مقایسه هندسه تغییر شکل در شبیه‌سازی و آزمون تجربی

شکل ۴-۳۲ تصویر لوله تغییرشکل یافته را در آزمون تجربی و شبیه‌سازی در کنار یکدیگر نمایش می‌دهد. اعتبارسنجی نتایج، گام مهمی در تحلیل با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود می‌باشد. در این پژوهش، به‌منظور صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، ضمن مقایسه هندسه لوله تغییرشکل یافته؛ توزیع مولفه‌های کرنش یک قطعه در جهت محیطی، طولی و ضخامتی حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی، با یکدیگر مقایسه شد. در شکل ۴-۳۳ مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی مربوط به انبساط‌دهی لوله با روش با اعمال جابه‌جایی ۵۰ mm به سنبه در شرایط روانکاری کامل نشان داده شده است. میزان خطای تحلیل عددی در مقایسه با تحلیل تجربی برای کرنش طولی ۸٪، کرنش محیطی ۴٪، کرنش ضخامتی ۶٪ می‌باشد. برای محاسبه درصد خطا از رابطه ۴-۷ استفاده شد.

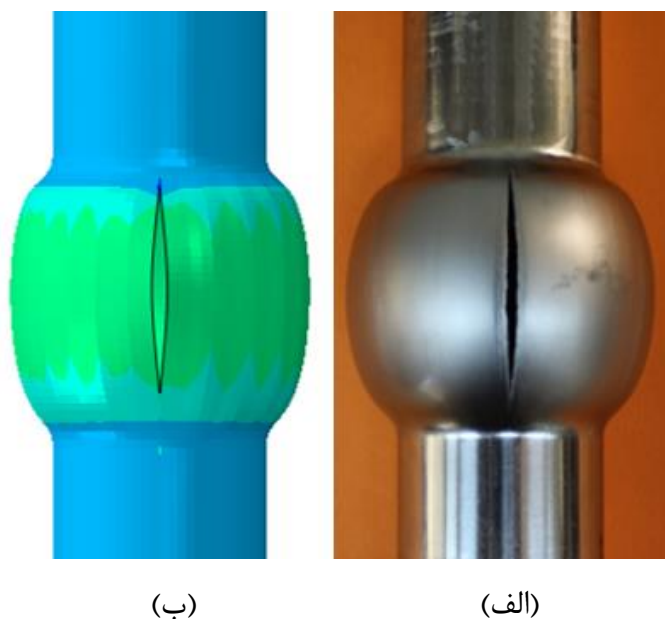
$$Error \% = \left| \frac{\varphi_{FEM} - \varphi_{Exp}}{\varphi_{Exp}} \right| \times 100 \quad (4-7)$$

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



شکل ۴-۳۳: مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی، در شرایط روانکاری کامل و جابه‌جایی ۵۰ mm سنبه طبق نتایج شبیه‌سازی با اعمال جابه‌جایی ۵۵ mm به سنبه، پارامتر شکل‌پذیری W_{FLD} به میزان حداکثر یک رسیده و لوله در آستانه ترکیدگی قرار می‌گیرد. به منظور رسیدن به قطر بحرانی لوله با اعمال روانکاری کامل، میزان جابه‌جایی سنبه تا شروع ترکیدگی افزایش داده شد. در شکل ۴-۳۴ لوله منبسط

شده با روش RPF در لحظه ترکیدگی مشخص شده است. مقایسه هندسه تغییرشکل یافته محصول، حاکی از دقت مطلوب مدل سازی شکست در نرم افزار می باشد.



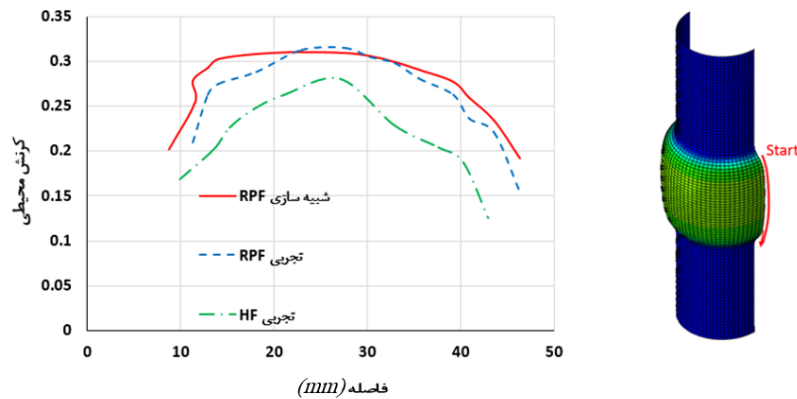
شکل ۴-۳۴: مقایسه ترکیدگی لوله با روش RPF در (الف) آزمون تجربی، (ب) شبیه سازی



شکل ۴-۳۵: تصویر ترکیدگی لوله از ناحیه درز آن، (الف) فرایند RPF ، (ب) فرایند HF

تصویر پارگی ایجاد شده در لوله با دو روش RPF و HF در شکل ۴-۳۵ مورد مقایسه قرار گرفته است. قطر نهایی بالچینگ در لحظه ترکیدگی لوله در روش تجربی دو فرایند RPF و HF به ترتیب برابر با

۵۷/۵ و ۴۷/۵ میلی‌متر می‌باشد. مقادیر فوق برای شبیه‌سازی عددی به ترتیب برابر ۵۵/۵ و ۴۶/۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین در شکل ۴-۳۶ توزیع کرنش محیطی بر روی مسیر طولی، در آستانه ترکیدگی لوله در دو فرایند نمایش داده شده است.



شکل ۴-۳۶: مقایسه توزیع کرنش محیطی دو فرایند RPF و HF در آستانه ترکیدگی لوله

۴-۳-۲ انبساط‌دهی میل‌بادامک با روش RPF و مقایسه با نتایج HF

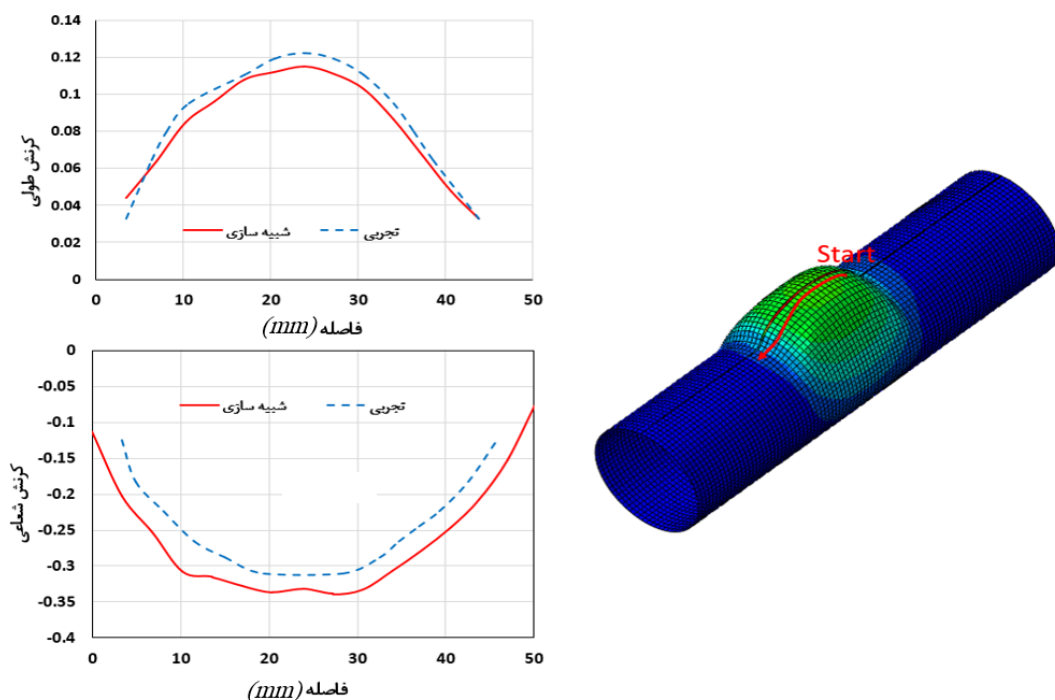
به منظور بررسی میزان کارایی و دقت روش RPF؛ در یک مطالعه موردی شکل‌دهی میل‌بادامک از لوله در قالب شکل‌دهی بسته از طریق شبیه‌سازی و آزمایش تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. قطعه صنعتی مورد بررسی و ابعاد هندسی آن مطابق شکل ۳-۱۲ می‌باشد. شکل‌دهی قطعه بادامک در آزمایشگاه با بکارگیری روانکار روغن کشش و نایلون در سطح برخورد لوله و لاستیک، و استفاده از روغن کشش بین سطح لوله و قالب بدون پیشروی عمودی در لوله به صورت آزاد صورت گرفت؛ که قطعه‌ی در آستانه ترکیدگی در شکل ۴-۳۷ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۳۷: قطعه بادامک ساخته شده با روش RPF (روانکاری کامل - جابه‌جایی سنبه برابر ۲۳/۵ mm)

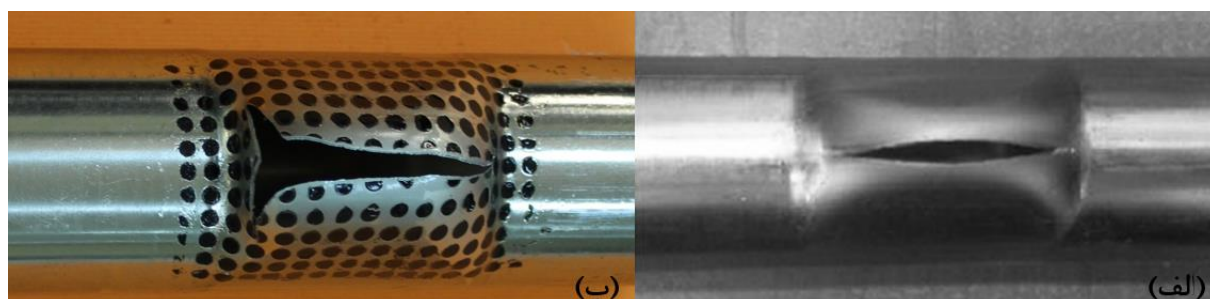
برطبق نتایج تجربی با اعمال جابه‌جایی بیشتر از ۲۳/۵ mm به سنبه ترکیدگی در لوله اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که در این شرایط قالب بادامک کاملاً پر نمی‌شود و قطر اولیه لوله که برابر ۳۸/۳ mm

است به صورت بادامکی به ۴۸ mm می‌رسد؛ لذا تا رسیدن به دیواره قالب به مقدار ۵ mm فضای پر نشده باقی می‌ماند. توزیع کرنش ایجاد شده در قطعه در آستانه ترکیدگی حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در شکل ۴-۳۸ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۳۸: تغییرات کرنش طولی و شعاعی قطعه میل‌بادامک

در روش HF برطبق نتایج مرجع [۲۳]؛ به منظور تولید میل‌بادامک سالم نیاز به اعمال تغذیه محوری لوله به میزان ۴۰ mm توسط سنبه می‌باشد. با اعمال این تغذیه محوری قالب کاملاً پر نشده و قطر لوله به قطر جدید ۵۱ mm می‌رسد. در شکل ۴-۳۹ الف محصول شکل داده شده با استفاده از روش HF در لحظه ترکیدگی نمایش داده شده است.



شکل ۴-۳۹: ترکیدگی در میل‌بادامک‌های شکل داده شده با روش الف (HF، ب) RPF

همانطور که پیشتر ذکر شد در روش *RPF* با اعمال جابه‌جایی بیش از ۲۳/۵ mm به سنبه در قطعه پارگی اتفاق خواهد افتاد. شکل ۴-۳۹- ب پارگی ایجاد شده در میل‌بادامک شکل داده شده با این روش را نشان می‌دهد. تفاوت موجود در نحوه‌ی پارگی ایجاد شده را می‌توان اینگونه توجیه کرد که در روش *HF*، به دلیل وجود سیال به عنوان ماده واسط؛ پس از ایجاد پارگی در لوله، سیال به بیرون نشت کرده و افت فشار محسوس است؛ لذا از رشد سریع پارگی خوداری می‌شود. اما در روش *RPF* لاستیک به عنوان ماده واسط جایگزین سیال شده و با ایجاد پارگی در حین فرایند؛ لاستیک همانند سیال به سهولت خارج نشده و فشار را به لبه‌های درز پاره شده در لوله منتقل کرده و باعث باز شدن ترک می‌گردد.

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تجربی و عددی انبساط‌دهی لوله‌ی فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ با استفاده از بالشتک کشسان، از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش تجربی پرداخته شد؛ و نتایج با روش شکل‌دهی با سیال مورد مقایسه قرار گرفت. اثر پارامترهای موثر فرایند RPF و همچنین تعیین خواص ناحیه درز لوله مورد بررسی و بحث قرار گرفت. بدین منظور از لوله‌هایی با طول ۱۵۰ mm؛ ضخامت ۰/۷۵ mm و لاستیکی با سختی ۸۵ شور A و طول ۱۴۰ mm استفاده شد. به‌علاوه، جهت امکان‌سنجی تولید یک قطعه صنعتی با فرایند RPF ، شکل‌دهی یک میل‌بادامک نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این پژوهش به صورت زیر طبقه‌بندی و ارائه شده است:

۵-۱-۱ نتایج فعالیت‌های اولیه

۱- منحنی تنش-کرنش حقیقی لاستیک پلی‌اورتان براساس استاندارد ASTM D575-91 بدست آمد و رفتار لاستیک به عنوان یک ماده هایپرلاستیک تراکم‌ناپذیر با کمک معادله ساختاری مونی-ریولین مدل شد؛ C_1 و C_2 ثوابت معادله مونی-ریولین برای این ماده به ترتیب برابر ۱/۸۵۶۴ و ۰/۳۲۸۲ مگاپاسکال بدست آمد.

۲- تحلیل عددی تنش اجزای قالب به صورت سه‌بعدی به کمک نرم‌افزار آباکوس اجرا و تنش بیشینه در قالب برابر ۴۲۰ مگاپاسکال محاسبه شد؛ که با توجه به تنش تسلیم فولاد بهسازی CK۴۵ که ۴۸۵ مگاپاسکال است؛ ضریب اطمینان طراحی قالب برابر ۱/۱۶ می‌باشد.

۵-۱-۲ نتایج مدل‌سازی سری دوم: تحلیل شکست لوله درزدار در فرایند هیدروفرمینگ

- ۱- نتایج نشان می‌دهد که در صورت عدم استفاده از معیار رشد آسیب، توزیع کرنش به صورت غیر واقعی به مقادیری فراتر از حد شکل‌دهی FLD افزایش می‌یابد؛ که این امر استفاده و تعیین دقیق پارامتر رشد آسیب را ضروری می‌نماید. همچنین با افزایش پارامتر جابه‌جایی پلاستیک موثر به عنوان معیار رشد آسیب، حذف المان به تاخیر افتاده و در نتیجه قطر بحرانی افزایش می‌یابد. با توجه به مقدار قطر لوله در لحظه پارگی، همچنین سرعت رشد ترک و مطابقت شکل ظاهری آن مقدار بهینه متغیر جابه‌جایی پلاستیک موثر برابر با ۰/۰۵ بدست آمد.
- ۲- با مطالعه اثر ضریب ناهمگنی لوله بر قطر بحرانی مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب نقص و نزدیک شدن استحکام ناحیه‌ی درز لوله به ناحیه سالم، فشار بحرانی افزایش می‌یابد. بر این اساس، به ازای فشار ترکیدگی ۲۵/۷ مگاپاسکال در آزمون تجربی مقدار بهینه‌ی ضریب ناهمگنی لوله برابر ۰/۸۹۷ اختیار شد.

۵-۱-۳ نتایج مدل‌سازی سری سوم: تحلیل اثر فاکتورهای فرایند RPF بر متغیرهای محصول به روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی

- ۱- انتخاب ضریب اصطکاک پایین بین لوله و قالب، همچنین لوله و لاستیک موجب کاهش قابل توجه چین‌خوردگی در محصول می‌گردد. این کاهش ضریب اصطکاک باعث کاهش نیروی فرایند و موجب افزایش عمق متوسط بالجینگ می‌شود.
- ۲- انجام شبیه‌سازی با سختی مختلف لاستیک بجز تاثیر اندکی بر روی انحراف استاندارد کرنش ضخامتی و میانگین تغییر ضخامت هیچ تاثیری بر عوامل دیگر نداشته است.
- ۳- اگر چه پیشروی محوری لوله تاثیر قابل توجهی بر روی عمق متوسط بالجینگ ندارد، اما مقادیر نیروی فرایند و چین‌خوردگی به شدت از این ترم تاثیر می‌پذیرد.

۴- در شرایط کاملاً یکسان استفاده از شعاع گوشه قالب کوچکتر در شکل‌دهی با بالشتک کشسان، بیشترین تاثیر را در افزایش نیروی فرایند خواهد داشت.

۵- قرار دادن لوله در قالب‌هایی با طول کمتر در ناحیه تغییرشکل، موجب کاهش در نیروی فرایند و مقدار چین‌خوردگی می‌گردد. از سوی دیگر شبیه‌سازی‌های انجام شده مشخص می‌کند طول ناحیه تغییرشکل تاثیر زیادی بر عمق متوسط بالجینگ نخواهد شد.

۶- هرچه ارتفاع لاستیک مورد استفاده افزایش یابد این امر موجب کاهش نیروی فرایند و عمق متوسط بالجینگ می‌شود، همچنین افزایش ارتفاع لاستیک باعث کمتر شدن ضخامت متوسط خواهد شد.

۴-۱-۵ مدل‌سازی سری چهارم: تحلیل فرایند بالجینگ لوله فولادی درزدار در قالب انبساط‌دهی آزاد و اعتبارسنجی نتایج با آزمون‌های تجربی

۱- با توجه به اصطکاک بالا بین لاستیک و لوله در فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان، لاستیک لوله را در راستای حرکت خود پیش می‌راند و از ابتدای فرایند روند چین‌خوردگی آغاز و تا انتها کامل می‌شود. به علت پیشروی یک طرفه سنبه از بالای قطعه روند چین‌خوردگی نسبت به صفحه وسط لوله کاملاً نامتقارن است.

۲- بر طبق نتایج شبیه‌سازی در شرایط روانکاری کامل با اعمال جابه‌جایی ۵۵ mm به سنبه، پارامتر شکل‌پذیری W_{FLD} به میزان حداکثر خود (برابر ۱) رسیده و لوله در آستانه ترکیدگی قرار می‌گیرد. در نتیجه با اعمال جابه‌جایی بیشتر از این مقدار پارگی در لوله رخ خواهد داد.

۳- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمون‌های تجربی انبساط‌دهی آزاد لوله با روش RPF نشان داد که نتایج عددی از دقت خوبی برخوردار بوده و میزان خطای تحلیل عددی در این مقایسه برای کرنش طولی ۸٪، کرنش محیطی ۴٪ و کرنش ضخامتی ۶٪ بدست آمد.

۴- قطر نهایی بالجینگ در لحظه ترکیدگی لوله برای شبیه‌سازی عددی در دو فرایند RPF و HF به ترتیب برابر ۵۵/۵ و ۴۶/۵ میلی‌متر می‌باشد. در فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله با روش شکل‌دهی با بالشتک کشسان؛ به میزان ۱۹ درصد افزایش قطر بالجینگ نسبت به روش

هیدروفرمینگ مشاهده می‌شود. مقادیر فوق برای روش تجربی به ترتیب برابر با ۵۷/۵ و ۴۷/۵ می‌باشد.

۵- به طور کلی میزان تغییر شکل در فرایند بالجینگ آزاد لوله به کمک فرایند RPF نسبت به فرایند HF به دلیل وجود دو عامل بیشتر است: اول؛ سطح منحنی حد شکل‌دهی به علت بالاتر بودن میزان فشار هیدرواستاتیک در فرایند RPF نسبت به HF بالاتر می‌رود. عامل دوم؛ انحراف امضای کرنش از مسیر $\beta = 0$ به مسیر $\beta < 0$ به علت وجود اصطکاک در فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان و ایجاد تغذیه محوری است که خود موجب تغییر شکل بیشتر در ناحیه ایمن از پنجره شکل‌دهی خواهد شد.

۵-۱-۵ مدل‌سازی سری پنجم: تحلیل فرایند انبساط‌دهی میل‌بادامک و اعتبارسنجی نتایج با آزمون‌های تجربی

۱- بر طبق نتایج تجربی با اعمال جابه‌جایی بیشتر از ۲۳/۵ mm به سنبه ترکیدگی در لوله اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که در این شرایط قالب بادامک کاملاً پر نمی‌شود و قطر اولیه لوله که برابر ۳۸/۳ mm است به صورت بادامکی به ۴۸ mm می‌رسد؛ لذا تا رسیدن به دیواره قالب به مقدار ۵ mm فضای پر نشده باقی می‌ماند.

۲- نتایج بدست آمده از این پایان‌نامه با دقت خوبی نشان داد که با کنترل شرایط حاکم بر فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان می‌توان به تغییر شکل مطلوب رسید؛ همچنین می‌توان قطعات صنعتی را نیز به خوبی فرایند هیدروفرمینگ تولید کرد.

۵-۱-۶ نتایج مقایسه دو فرایند RPF و HF

۱- قطر نهایی بالجینگ در لحظه ترکیدگی لوله برای شبیه‌سازی عددی در دو فرایند RPF و HF به ترتیب برابر ۵۵/۵ و ۴۶/۵ میلی‌متر می‌باشد. مقادیر فوق برای روش تجربی به ترتیب برابر با ۵۷/۵ و ۴۷/۵ می‌باشد.

۲- در فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله با روش شکل‌دهی با بالشتک کشسان؛ به میزان ۱۹ درصد افزایش قطر بالجینگ نسبت به روش هیدروفرمینگ مشاهده می‌شود. مقایسه کرنش موثر دو

فرایند حاکی از افزایش ۵۰ درصدی سطح کرنش موثر پلاستیک بحرانی در فرایند RPF نسبت به فرایند HF می‌باشد.

۳- استفاده از روش ارائه شده جهت تعیین ثوابت معیار شکست نرم به کمک فرایند هیدروبالجینگ؛ در روش RPF حاکی از انطباق مطلوب این روش جهت ایجاد و نحوه‌ی رشد شکست در شکل-دهی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ می‌باشد.

۴- در روش HF به منظور تولید میل‌بادامک سالم نیاز به اعمال تغذیه محوری لوله به میزان mm ۴۰ توسط سنبه می‌باشد. با اعمال این تغذیه محوری، قطر لوله به قطر جدید mm ۵۱ می‌رسد و mm ۲ فضای خالی در قالب باقی می‌ماند. این در حالی است که این قطر در روش RPF به mm ۴۸ رسیده و قالب کاملاً پر نشده و mm ۵ فضای پر نشده در قالب باقی می‌ماند.

۲-۵ پیشنهادها

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

۱- بررسی تجربی اثر ارتفاع و سختی لاستیک، ابعاد قالب و سرعت شکل‌دهی می‌تواند در ادامه این تحقیق صورت گیرد. همچنین به نظر می‌رسد استفاده از تغذیه دوطرفه لوله و بالشتک کشسان منجر به تولید قطعات عمیق‌تر و متقارن‌تر گردد.

۲- فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان 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 شکل‌دهی لوله در دمای بالا نیز مورد بررسی قرار گیرد.

۳- در فصل‌های قبل اشاره گردید که ماده لوله مورد استفاده در این پژوهش، همسانگرد در نظر گرفته شده است. در ادامه، پیشنهاد می‌شود شکل‌دهی لوله‌های ناهمسانگرد نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

۴- در این پژوهش شکل‌دهی لوله‌های درزدار فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ در یک مرحله بررسی شده است. پیشنهاد می‌شود که نتایج این تحقیق با شکل‌دهی لوله‌ی بدون درز از همین جنس مقایسه شود.

۵- به منظور کنترل شرایط اصطکاکی که نقش مهمی در موفقیت این فرایند دارد می‌توان از تلفیق دو فرایند HF و RPF استفاده کرد. همچنین تغذیه رفت و برگشتی بالشتک می‌تواند در این راستا مورد آزمایش قرار گیرد.

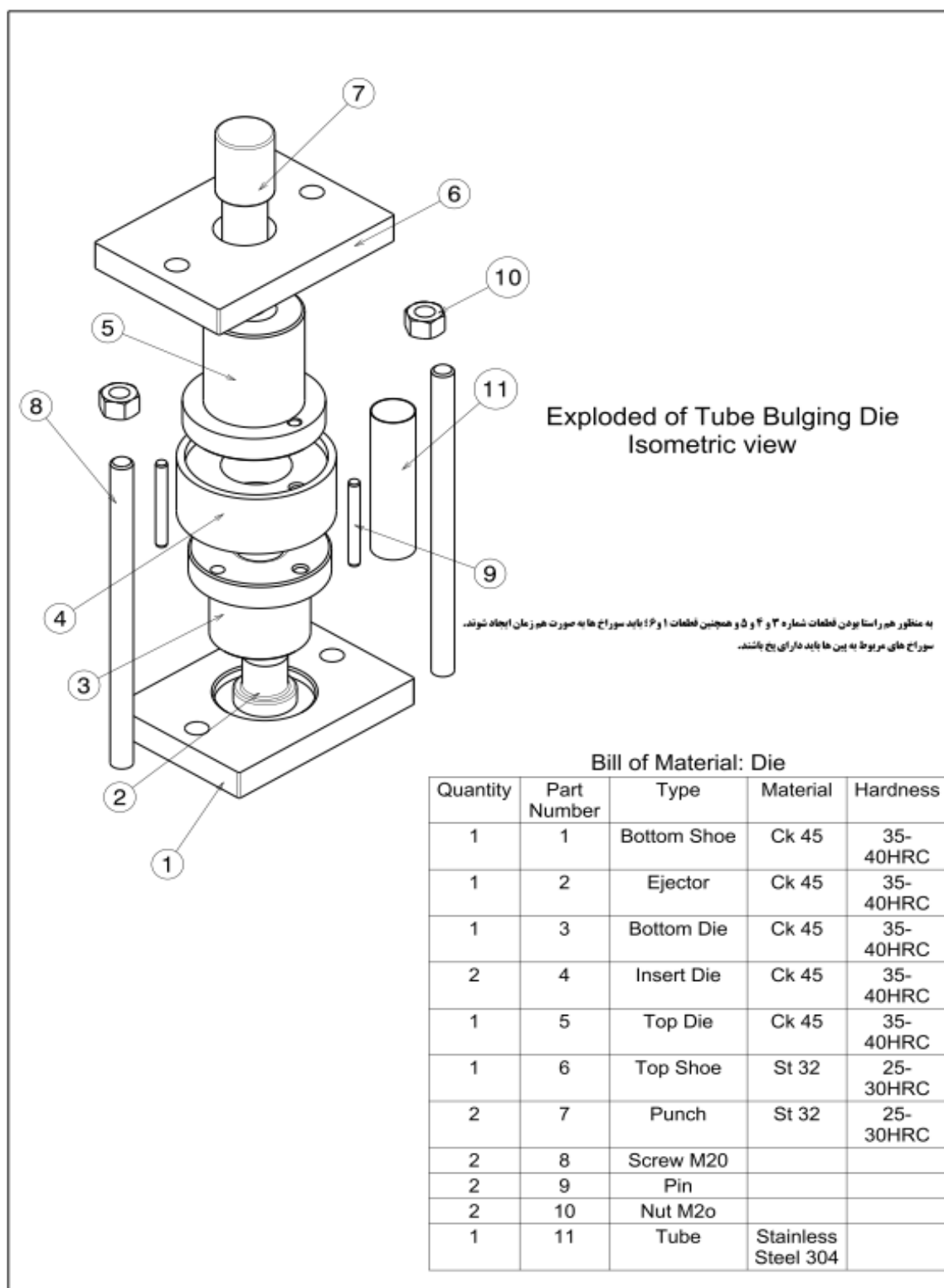
منبع‌ها

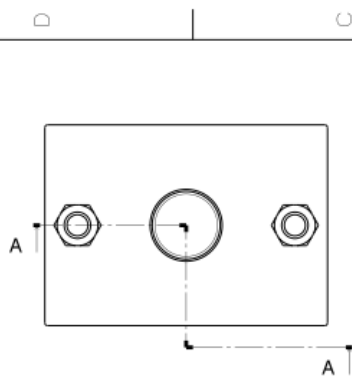
- [۱] زبرجد، س. م.، (۱۳۸۵)، شکل‌دهی فلزات، انتشارات دانشگاه فردوسی، مشهد، ص: ۴۲۵.
- [2] GmbH., S., *Metal Forming Handbook*. 1998: Springer-Verlag.
- [3] Committee, A.H., *Metals Handbook: Forming and forging*. 1978: American Society for Metals.
- [4] Ramezani, M. and Z.M. Ripin, *Rubber-pad Forming Processes: Technology and Applications*. 2012: Woodhead Publishing.
- [5] L.H. Lang, et al., *Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming*. Journal of Materials Processing Technology, 2004. 151: p. 165-177.
- [6] Lundqvist, J., *Numerical simulation of tube hydroforming: Adaptive loading paths*. 2004.
- [7] Banabic, D., *Formability of Metallic Materials: Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits*. 2000: Springer.
- [۸] کدل ر.، هاسفورد و.، (۱۳۷۷)، شکل‌دادن فلزات (متالورژی و مکانیک)، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.
- [۹] دیلمی عضدی ح.، (۱۳۸۱)، تجزیه و تحلیل تئوری و تجربی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی با استفاده از معیار تسلیم غیر درجه دوم هیل، دانشکده مهندسی مکانیک؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۱۰] قاسمی س. غ.، (۱۳۸۵)، شبیه‌سازی و مقایسه دیاگرام‌های حد شکل‌دهی کرنش و تنش به کمک روش اجزای محدود، دانشکده مهندسی مکانیک؛ دانشگاه مازندران.
- [۱۱] کلانتری دهقی م.، (۱۳۸۸)، تحلیل عددی و تجربی اثر هندسه قالب و قطعه بر روی فرایند بالچ‌فرمینگ لوله‌های تی‌شکل، دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران: انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.
- [۱۲] کلانتری دهقی م.، (۱۳۸۸)، بررسی اثر اصطکاک بر روی فرایند بالچ‌فرمینگ لوله‌های تی‌شکل به کمک تحلیل‌های عددی و تجربی، دهمین کنفرانس ساخت و تولید ایران: انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.
- [۱۳] درویشی حسینی م.، (۱۳۸۹)، بکارگیری روش شکل‌دهی با لاستیک در انقباض موضعی لوله به منظور مونتاژ لوله‌ها در سازه خودرو، فرایندهای نوین ساخت و تولید.
- [۱۴] باقری ف.، (۱۳۹۰)، بررسی تاثیر طول خم‌کاری و شعاع قالب بر برگشت فنری در خم‌کاری ۱۳۵ درجه با استفاده از بالشتک لاستیکی، پنجمین کنفرانس شکل‌دهی فلزات و مواد ایران، دانشگاه صنعتی شریف.
- [15] Dirikolu, M.H. and E. Akdemir, *Computer aided modelling of flexible forming process*. Journal of Materials Processing Technology, 2004. 148(3): p. 376-381.
- [16] Ramezani, M., Z.M. Ripin, and R. Ahmad, *Computer aided modelling of friction in rubber-pad forming process*. Journal of Materials Processing Technology, 2009. 209(10): p. 4925-4934.

- [17] Liu, Y. and L. Hua, *Fabrication of metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells by rubber pad forming*. Journal of Power Sources, 2010. 195(11): p. 3529-3535.
- [18] Ramezani, M., Z.M. Ripin, and R. Ahmad, *Sheet metal forming with the aid of flexible punch, numerical approach and experimental validation*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010. 3(3): p. 196-203.
- [19] Mahshidifar A., V.A., *Numerical and Experimental Study of Parameters Affecting Metal Forming Using Rubber Pads, on Parts with Radius of Curvature*. Int. J. Advanced Design and Manufacturing Technology, 2013.
- [20] De, S.K. and J.R. White, *Rubber Technologist's Handbook*. 2001: Rapra Technology Limited.
- [21] Khan, A.S. and S. Huang, *Continuum Theory of Plasticity*. 1995: Wiley.
- [22] Yu, Y.-S. and Y.-P. Zhao, *Deformation of PDMS membrane and microcantilever by a water droplet: Comparison between Mooney–Rivlin and linear elastic constitutive models*. Journal of Colloid and Interface Science, 2009. 332(2): p. 467-476.
- [۲۳] فلاحتی نقیعی م.، (۱۳۹۲)، پایان‌نامه ارشد: "بررسی تجربی و عددی حد شکل‌دهی در فرایند هیدروفرمینگ لوله‌های فلزی"، دانشکده مهندسی مکانیک؛ دانشگاه شاهرود.
- [24] *Abaqus Reference Manual*.
- [25] Makkouk, R., et al., *Experimental and theoretical analysis of the limits to ductility of type 304 stainless steel sheet*. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2008. 27(2): p. 181-194.
- [26] Lange, K. and K. Pöhlandt, *Handbook of metal forming*. 1985: McGraw-Hill.
- [27] Ngaile, G., S. Jaeger, and 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, 2004. 146(1): p. 108-115.
- [28] S. Kalpakjian and S.R. Schmid, *Manufacturing engineering and technology*. Prentice Hall, 2006. 5.
- [29] V.M. Nandedkar and K. Narasimhan, *Measurement of strain history during the stretching of forming-grade steel sheets*. Journal of Materials Processing Technology, 1999: p. 24–29.

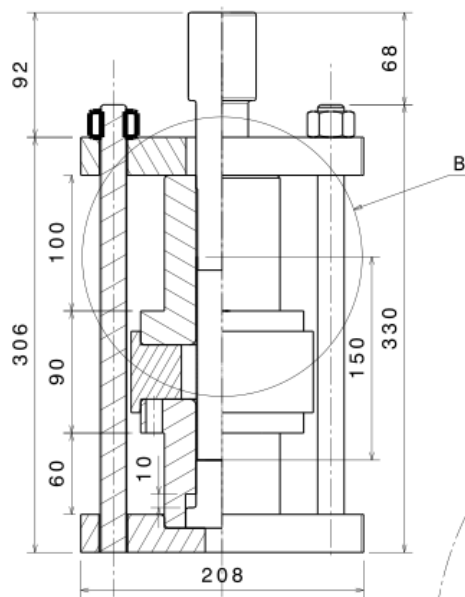
پیوست

(۱) نقشه قالب انبساط دهی لوله و اجزای تشکیل دهنده آن

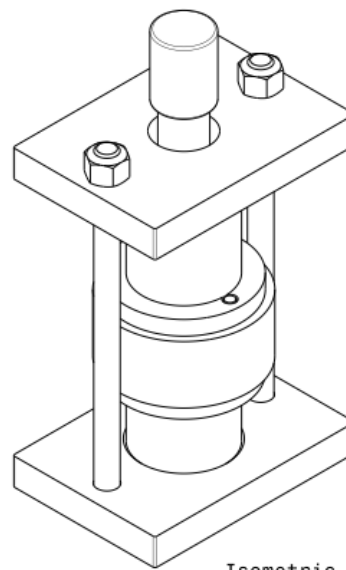




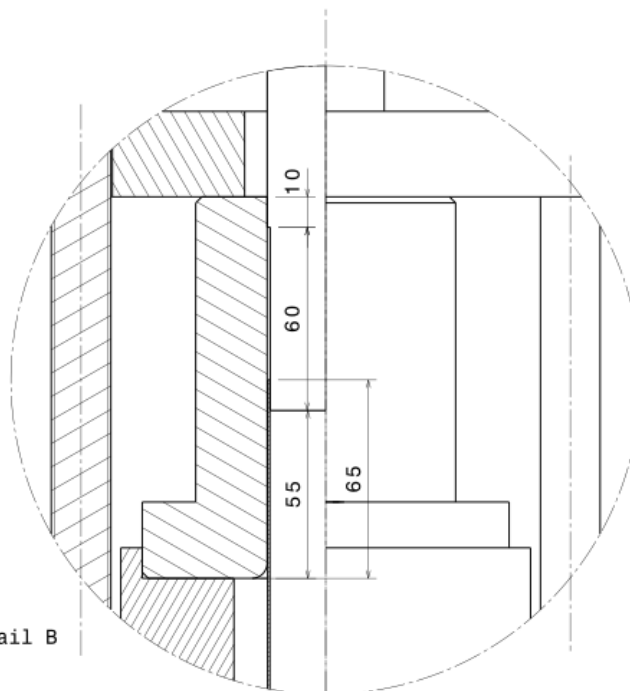
Top view



Section view A-A



Isometric view



Detail B

DESIGNED BY: Ghaforiyan		Undefined Tolerances: DIN 7168-m	I	-
DATE: 1392/10/19			H	-
CHECKED BY: Dr.Gerdooei			G	-
DATE: 1392/10/23		Project Name Tube Bulging Die	F	-
SIZE A3			E	-
Hardness	Weight (kg)	Part Name (No.) Die	D	-
	30		C	-
			B	-
			A	-

Abstract

In recent years, increasing the competition in the automotive, aerospace and military industries has caused to industry centers led to the production of light equipment, with purpose of high strength to weight ratio especially in reduction of fuel consumption. In this case, producting of hollow parts with complex geometry from sheet and tube, by using flexible die forming have been focused by researchers. Rubber pad forming and hydroforming process are the most important methods by advantages of high flexibility in the production of complex parts, good surface quality and lower manufacturing costs, altered as alternative methods to the conventional forming proceses.

In present research, numerical and experimental investigation of bulging 304 stainless steel seamed tube, using a polyurethane elastic pad has been studied. In the first, stress analysis of die sets under the rubber pad forming process conducted using 3D deformable parts and after some numerical trials on the material, geometry and die hardness; finally the die parts were designed. Then, to calculate the damage property and plastic instability factors, free bulging of the seamed tube simulated and forming limit diagram criterion was used as a damage initiation criterion. Results compared with experiments of others references. Also, with the aim of determining the effects of intrinsic and extrinsic parameters of rubber pad forming process by combining finite element and Taguchi design of experiments methods has been performed. In this section effect of seven factors such as, friction between tube and die, friction between tube and rubber, rubber height and hardness, die corner radius, length of deformation zone and tube axial feed has been studied. The response factors were average of bulging depth, maximum difference between depths, wrinkles numbers, thickness strain and standard deviation of strain was studied. At the end of numerical activity, 3D simulation of seamed tube bulging by using rubber pad forming under several lubrications has been performed. Results of numerical method showed that friction, especially between rubber and tube play the main rule in success of rubber pad forming process.

In the experiment section, compression test of rubber was carried out according to ASTM D575-91 standard and compressive stress-strain curve and the Mooney-Rivlin constants was determined. Meshed tubes forming by using elastic pad with different lubricating systems have been conducted up to bursting onset in the seam weld observed and longitudinal, hoop and thickness strains were measured. Comparison of the strains obtained from the safe regions with the forming limit curve obtained from hydroforming process, showed increasing the formability in the rubber pad forming process. The experimental results showed that the intact parts without any wrinkles formed by using

nylon lubricant between tube and rubber and drawing oil between tubes and die. Comparison between free bulging of tube using fluid and elastic pad showed that in rubber forming by increasing the hydrostatic pressure as more as unwanted axial feeding due to the friction between rubber and tube, distracting the strain path to the left side of FLD and formability increasing occur. It results to more depth of bulging.

Finally, in order to investigate the efficiency and accuracy of rubber pad forming, in a case study, numerical simulation and experimental tests was used to forming of a tube cam type profile. This product formed successfully and the results were compared with hydroforming process.

Keywords: FEM simulation, Rubber Pad Forming, Hydro-Bulging, Forming limit diagram, seamed tube bulging.



Shahrood University
Department of Mechanical Engineering

Thesis for Master of Science in Mechanical Engineering

Title

**Experimental and Numerical Study of Metallic Tubes Bulging
Using Elastic Pad in Comparison with Tubes Hydro-Bulging**

Written by

Hasan Ghaforian Nosrati

Supervisor

Dr. Mahdi Gerdooei

September 2014