



دانشگاه صنعتی شاهرود دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایاننامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

عنوان بهینهسازی متغیرهای فرایند شکلدهی اتصالات لوله با استفاده از ابزار الاستومری

> نگارنده میر صادق اکبریان کوهخیلی

> > استاد راهنما دکتر مهدی گردویی

استاد مشاور دکتر سید وحید حسینی

تیر ۱۳۹۶

#### تعهد نامه

اینجانب میر صادق اکبریان کوه خیلی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکدهی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایاننامه تحت راهنمائی 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 محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- 🔹 مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا
  «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایح اصلی پایان نامه تأثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری،
  ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاريخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
  - استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

#### چکیدہ

از ابزار الاستومري به علت انعطاف پذيري بالا، كيفيت سطح مطلوب و كاهش هزينهها به طور وسيعي در صنايع هوایی و خودروسازی استفاده میشود. در این پایاننامه یک روش جدید در تولید اتصال تی شکل شامل اعمال فشار دوطرفه از داخل و بیرون لوله به وسیله محیط واسط کشسان ارائه شده است. تحلیل عددی فرایند در نرمافزار آباکوس، با فرض ماده هایپرالاستیک تراکمناپذیر با مدل رفتاری مونی-ریولین برای ابزار کشسان انجام شد. برای لوله مدل کشسان-مومسان با ناهمسانگردی نرمال و معیار آسیب FLD استفاده شد. به منظور تشخیص پارامترهای مؤثر ذاتی و فرایندی بر ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت، از روش طراحی آزمون تاگوچی استفاده شد. تحلیل آماری این طراحی نشان داد که عوامل سختی لاستیک، فاصله زبانه سنبه از لبه لوله، شعاع قالب و ضخامت لوله بیشترین اثر را بر موفقیت فرایند دارد. در مرحله بعد، به منظور دستیابی به مقادیر بهینه عوامل مؤثر، از روش سطح پاسخ با مدل رگرسیونی غیرخطی استفاده شد. در بخش تجربی آزمونهای استاندارد برای استخراج خواص مکانیکی سه لوله مسی، برنجی و آلومینیومی و دو نوع ابزار کشسان پلیاورتان و پیویسی انجام شد. ساخت قالب، پس از اطمینان خاطر از طراحی بهینه آن به کمک روش اجزاء محدود سهبعدی، انجام شد. نمونه سالم از سه لوله مسی، برنجی و آلومینیومی پس از انجام آزمونهای اولیه با موفقیت تولید شد. برای صحتسنجی نتایج تجربی و عددی، توزیع کرنش و ضخامت لوله در مسیرهای طولی و محیطی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که اولاً ایده استفاده از فشار ثانوی ابزار کشسان برای تولید شاخه تی شکل مناسب است، ثانیاً نتایج شبیه سازی از دقت قابل قبولی برخوردار است.

واژگان کلیدی: بهینهسازی، ابزار الاستومری، طراحی آزمایش تاگوچی، متدولوژی سطح پاسخ، لوله مسی، شکلدهی شاخه تی مقاله مستخرج از پایاننامه

اکبریان کوهخیلی، م. ص.؛ گردویی، م.؛ حسینی، س. و.؛ بررسی عوامل مؤثر بر فرایند تولید اتصال تی شکل با اعمال فشار دو طرفه به کمک ابزار انعطاف پذیر؛ چهارمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بینالمللی پژوهش های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک؛ تهران؛ ۱۳۹۵

#### تقديمنامه

ماحصل أموختههایم را تقدیم می کنم به آنان که مهر أسمانی شان أرام بخش ألام زمینی ام است:

به استوارترین تکیه کاہم، دستان پر مهریدرم

به سنرترین تکاه زندی ام، چثمان سنرمادرم

که هر چه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هر چه بکوشم قطرهای از دریای بی کران مهربانی تان را سپاس نتوانم بگویم.

٥

### سپاسگزاری

با سپاس و ستایش پروردگار بلندمرتبه که در سایه عنایت و الطاف بی کرانش، این پایاننامه به سرانجام رسید و بر اساس حدیث ارزشمند امام رضا (ع) که فرمودند: «مَنْ لَمْ يَشْکُرِ الْمُنْعِمَ مِنَ الْمَخْلُوقِینَ لَمْ يَشْکُرِ اللَّهَ عَزَّ وَ جَل»، بر خود واجب میدانم از تمامی افرادی که در این مسیر مرا یاری نمودند تشکر و قدردانی نمایم. از پدر و مادر عزیزم که همواره با کمکهای مادی و معنوی خود پشتیبانم بودهاند بینهایت سپاس گزارم. از استاد گرامی ام جناب آقای دکتر گردویی که راهنمای علمی و اخلاقی من بودند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم. از آقای دکتر سید وحید حسینی که مشاور بنده در انجام این پایاننامه بودند؛ سپاس گزارم. همچنین از جناب آقای دکتر محمدباقر نظری، دکتر مجتبی قطعی، مهندس شهاب مرادی، مهندس آرش پولادسنج، مهندس نوید رضایی، مهندس امیرسامان سلیمی و تمامی دوستان و عزیزانی که در راستای انجام این پژوهش اینجانب را صمیمانه همراهی و یاری نمودند؛ کمال سپاس گزاری را دارم.

## فهرست عنوانها

چ	چکیدہ
٥	تقديمنامه
9	سپاسگزاری
ز	فهرست عنوانها
	فهرست شکلها
نن	فهرست جدولها
س	فهرست نشانهها
1	فصل ۱ مقدمه
۱	۱–۱– مقدمه
۲	۱–۲– شکلدهی با قالب انعطافپذیر
۳	۱–۲–۱ شکلدهی با بالشتک کشسان
۵	۱-۲-۱ هیدروفرمینگ ورق و لوله
Υ	۱–۲–۳ دمش گاز در دمای بالا
λ	۱-۲-۱ شکلدهی با فشار ویسکوز
۱۰	۱-۳- پیشینه تحقیق
۱۳	۱-۴- اهداف و ویژگیهای پایاننامه
1۴	۱-۵- معرفی فصول آتی پایاننامه
۱۵	فصل ۲ طراحی و اجرای آزمونهای تجربی
۱۵	۲-۱- مواد اولیه لوله و لاستیک
۱۵	۲-۲- تعیین خواص مکانیکی لوله و لاستیک
١۶	۲-۲-۱ آزمون کشش لوله
، مونی-ریولین۸	۲-۲-۲ آزمون فشار لاستیک و محاسبه ثوابت
۱۹	۲-۲-۳ عملیات حرارتی بازپخت
۲۰	۲-۳- آمادەسازى نمونەھا
۲۳	۲-۴- قالب و سیستم تأمین فشار

۲۵	۲-۵- اجرای آزمونهای تجربی
۲٩	فصل ۳ شبیهسازی عددی و روش بهینهسازی
۲۹	۳-۱- روش اجزاء محدود
۳۰	۳-۱-۱ معرفی نرمافزار آباکوس و حلگر صریح
۳۲	۳–۲– شرح مدلسازی عددی
۳۲	۳-۲-۱ تحلیل تنش سهبعدی قالب شکلدهی
۳۵	۳-۲-۲ مدلسازی شکلدهی اتصال تیشکل با اعمال فشار دوطرفه به کمک ابزار الاستومری
FF	۳-۳- طراحی آزمایش
49	۳–۳–۱ فلسفه تاگوچی
۴۷	۳-۳-۲ کیفیت و تابع زیان
۵۱	۳-۳-۳ نسبت سیگنال به نویز
۵۲	۳–۳–۴ طراحی آزمایش تاگوچی در پژوهش حاضر
۵۵	۳-۴- روش سطح پاسخ
۵۷	۳-۴-۱ طراحی آزمایش با روش سطح پاسخ در پژوهش حاضر
۵۹	فصل ۴ نتایج و بحث
۵۹	۴-۱- نتایج آزمون تعیین خواص مکانیکی
۵۹	۴-۱-۱ آزمون کشش تکمحوری
۶۵	۴–۱–۲ ضرایب ناهمسانگردی
۶۵	۴-۱-۴ آزمون فشار لاستیک
۶۷	۴-۲- نتایج تحلیل عددی
۶۷	۴–۲–۱ تحلیل تنش اجزای قالب
۶۸	۴-۲-۴ اثر پارامترهای فرایند RPF به روش تاگوچی
۷۸	۴-۲-۴ اثر پارامترهای فرایند RPF به روش سطح پاسخ
۹۳	۴-۳- نتایج تجربی شکلدهی قطعه سهراهی و صحتسنجی نتایج شبیهسازی
۹۳	۴-۳-۴ تعیین منحنی FLD و امضای کرنشی فرایند
۹۵	۴–۳–۲ شکلدهی قطعه اتصال تیشکل
۱۰۳	فصل ۵ نتیجه گیری و ارائهی پیشنهادها
۱۰۳	۵–۱– نتیجه گیری
۱۰۵	۵–۲– ارائهی پیشنهادها
۱۰۷	منبع ها

بوست	پي
------	----

# فهرست شكلها

۵	شکل ۱-۱- طرحواره فرایند تولید قطعه تیشکل با استفاده از ابزار انعطافپذیر [۶]
۶	شکل ۱-۲ فرایند هیدروفرمینگ، الف) ورق، ب) اتصال تی شکل، ج) تغییر مقطع [۸]
۸	شکل ۱-۳ فرایند دمش گاز در دمای بالا با کنترل عوامل، الف) دما، ب) دما و فشار [۱۴]
۵) قالب،	شکل ۱-۴ طرحواره VPF، ۱) سیلندر بالایی، ۲) محفظه واسط، ۳) ورق فلزی، ۴) واسط ویسکوز،
۹	۶) سیلندر پایینی، ۲) سیلندر ورقگیر [۱۷]
متر) و	شکل ۲-۱ الف) ابعاد نمونه آزمون کشش از لوله بر اساس استاندارد ASTM A370 (ابعاد به میلی
۱۷	موقعیت برش نمونهها نسبت به مقطع لوله، ب) نمونههای ماشین کاریشده
۱۷	شکل ۲-۲ دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ بههمراه سیستم کنترل رایانهای
۱۸	شکل ۲-۳ الف) نمونههای آزمون فشار لاستیک، ب) فکهای فشاری دستگاه
۲۰	شکل ۲-۴ کوره استفاده شده جهت انجام عملیات حرارتی بازپخت کامل
۲۰	شکل ۲-۵ نمونههای آزمون کشش از لولههای آلومینیومی و مسی بازپختشده
۲۱	شکل ۲-۶ سمت راست: پخ ایجاد شده بر لوله، سمت چپ: هندسه پخ
۲۲	شکل ۲-۷ الف) دستگاه حکاکی الکتروشیمیایی، ب) نمونه برنجی شبکهبندی شده
۲۳	شکل ۲-۸ الف) طرحواره قالب، ب) قالب طراحی شده
۲۴	شکل ۲-۹ اجزای قالب شکلدهی
۲۵	شكل ۲-۱۰ منبع تأمين قدرت هيدروليكي
۲۶	شکل ۲-۱۱ مجموعه قالب، جکهای هیدرولیک و قاب نگهدارندهی جکها
۲۷	شکل ۲-۱۲ طرحواره فرایند RPF
۳۳	شکل ۳-۱ نحوه مونتاژ اجزای قالب
۳۶	شکل ۳-۲ منحنی تنش-کرنش مومسان لوله مسی استفاده شده در شبیهسازی
۳۸ n=	شکل ۳-۳ منحنی حد شکلدهی با معیار هیل-سوئیفت برای لوله مسی بازپخت شده به ازای 0.4=
۴۱	شکل ۳-۴ مونتاژ اجزای قالب و لوله در شبیهسازی

۴۱	شکل ۳-۵ منحنی نسبت انرژی جنبشی به انرژی درونی در شبیهسازی فرایند RPF
۴۲	شکل ۳-۶ شرایط مرزی اعمالشده در شبیهسازی
۴۳	شکل ۳-۷ منحنی استقلال نتایج از شبکهبندی
۴۴	شکل ۳-۸ منحنی نیروی فرایند بر حسب زمان برای تعداد المانهای متفاوت
¥9	شکل ۳-۹ طرح کلی یک فرایند یا سیستم
۴۸	شکل ۳-۱۰ طرحواره تابع زیان سنتی و روش تاگوچی
۴٩	شکل ۳-۱۱ تابع زیان تاگوچی برای حالت اسمی-بهتر
۵۰	شکل ۳-۱۲ تابع زیان تاگوچی برای حالت کوچکتر-بهتر
۵۱	شکل ۳-۱۳ تابع زیان تاگوچی برای حالت بزرگتر-بهتر
۵۳	شکل ۳-۱۴ طرحواره فرایند شکلدهی با ابزار الاستومری بههمراه فشار ثانوی
۵۶	شکل ۳-۱۵ سطح پاسخ، الف) سەبعدى، ب) نماى دوبعدى [۴۷]
۶۰	شکل ۴-۱ منحنی تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم (قبل از بازپخت)
۶۰	شکل ۴-۲ منحنی تنش-کرنش حقیقی برنج
۶۱	شکل ۴-۳ منحنی تنش-کرنش حقیقی مس (قبل از بازپخت)
۶۱	شکل ۴-۴ نمونههای حاصل از انجام آزمون کشش تکمحوری (قبل از بازپخت)
۶۲	شکل ۴-۵ منحنی تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم (بعد از بازپخت)
۶۲	شکل ۴-۶ منحنی تنش-کرنش حقیقی مس (بعد از بازپخت)
۶۲	شکل ۴-۷ نمونههای بازپختشده پس از انجام آزمون کشش
۶۳	شکل ۴-۸ مقایسه منحنیهای تنش-کرنش آلومینیوم قبل و بعد از بازپخت
۶۳	شکل ۴-۹ مقایسه منحنیهای تنش-کرنش مس قبل و بعد از بازپخت
۶۵	شکل ۴-۱۰ نقاط مشخص شده برای اندازه گیری کرنشهای طولی و عرضی
<i>99</i>	شكل ۴-۱۱ منحنى تنش-كرنش فشارى پلىاورتان

99	شکل ۴-۱۲ منحنی تنش-کرنش فشاری PVC
۶۷	شکل ۴-۱۳ منحنی C بر حسب λ
۶٨	شکل ۴-۱۴ توزیع تنش مؤثر ون-میسز در اجزای قالب طراحی شده بر حسب مگاپاسکال
	شکل ۴-۱۵ توزیع فشار (بر حسب MPa) در مراحل مختلف شبیهسازی آزمون بیستم از طراحی آزمایش
۶٩	تاگوچى
	شکل ۴-۱۶ نتایج توزیع ضخامت (بر حسب mm) حاصل از شبیهسازی آزمایش بیستم، الف) نتیجه شبیه
γ۰	سازی، ب) بعد از حذف المانهای اضافی
۷١	شکل ۴-۱۷ نمودار احتمال نرمال باقیمانده برای ارتفاع شاخه (بر اساس روش تاگوچی)
۷۲	شکل ۴-۱۸ نمودار مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش برای ارتفاع شاخه (بر اساس روش تاگوچی)
۷۲	شکل ۴-۱۹ نمودار احتمال نرمال باقیمانده برای درصد کاهش ضخامت (بر اساس روش تاگوچی)
	شکل ۴-۲۰ نمودار مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش برای درصد کاهش ضخامت (بر اساس روش
۷٣	تاگوچى)
۷٣	شکل ۴-۲۱ اثر متغیرهای فرایند بر ارتفاع شاخه
۷۴	شکل ۴-۲۲ نمودارهای نسبت سیگنال به نویز برای ارتفاع شاخه
۷۴	شکل ۴-۲۳ اثر متغیرهای فرایند بر درصد کاهش ضخامت
۷۵	شکل ۴-۲۴ نمودارهای نسبت سیگنال به نویز برای درصد کاهش ضخامت
٨٠	شکل ۴-۲۵ نمودار احتمال نرمال باقیمانده برای ارتفاع شاخه (بر اساس روش سطح پاسخ)
٨٠	شکل ۴-۲۶ نمودار مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش برای ارتفاع شاخه (بر اساس روش سطح پاسخ)
٨١	شکل ۴-۲۷ نمودار احتمال نرمال باقیمانده برای درصد کاهش ضخامت (بر اساس روش سطح پاسخ)
ĉ	شکل ۴-۲۸ نمودار مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش برای درصد کاهش ضخامت (بر اساس روش سطح
٨١	پاسخ)
٨۶	شکل ۴-۲۹ اثر متقابل پارامترها بر ارتفاع شاخه
٨۶	شکل ۴-۳۰ اثر متقابل پارامترها بر درصد کاهش ضخامت

٨٨	شکل ۴-۳۱ نمودارهای سطح پاسخ برای ارتفاع شاخه
٩٠	شکل ۴-۳۲ نمودارهای سطح پاسخ برای درصد کاهش ضخامت
صورت توأم۹۲	شکل ۴-۳۳ محدودههای مناسب متغیرهای فرایند بر هر دو تابع پاسخ به
۹۳	شکل ۴-۳۴ مقادیر بهینه و توابع پاسخ
٩۴	شکل ۴-۳۵ منحنی حد شکلدهی اصلاحشده لوله مسی برای فرایند RPF
ولی و محیطی با روش عددی و	شکل ۴-۳۶ امضای کرنشی فرایند RPF قبل از پارگی لوله در دو مسیر طو
۹۵	تجربى
۹۵	شکل ۴-۳۷ پارگی لوله، الف) شبیهسازی، ب) نمونههای C2 و C4
٩۶	شکل ۴-۳۸ نمونههای مسی شکلدهی شده تحت شرایط مختلف
٩۶	شکل ۴-۳۹ مقایسه هندسه تغییر شکل در آزمون تجربی و شبیهسازی
٩٧	شکل ۴-۴۰ توزیع کرنش محیطی و طولی در مسیر A
٩٧	شکل ۴-۴۱ توزیع کرنش محیطی و طولی در مسیر B
٩٨	شکل ۴-۴۲ برش نمونه مسی در دو مسیر A و B
٩٨	شکل ۴-۴۳ توزیع ضخامت در مسیر A
٩٩	شکل ۴-۴۴ توزیع ضخامت در مسیر B
٩٩	شکل ۴-۴۵ منحنی نیرو-جابهجایی در شبیهسازی
۱۰۰	شکل ۴-۴۶ نمونههای برنجی شکلدهی شده تحت شرایط مختلف
۱۰۰	شکل ۴-۴۷ نمونههای آلومینیومی شکلدهی شده تحت شرایط مختلف
نوی	شکل ۴-۴۸ نمونههای سالم شکلدهی شده با روش RPF بههمراه فشار ثا

## فهرست جدولها

١٨	جدول ۲-۱ مشخصات ابعادی نمونههای لاستیک آزمون فشار
۲۷.	جدول ۲-۲ آزمایشهای تجربی طراحی شده برروی لوله مسی
۲۸	جدول ۲-۳ شرایط آزمایشهای تجربی انجام شده بر روی لولههای آلومینیومی و برنجی
۳۵	جدول ۳-۱ خواص مکانیکی لوله مسی [۲۴, ۴۰]
۳۸ .	جدول ۳-۲ خواص مکانیکی لاستیک پلیاورتان با سختیهای متفاوت [۴۴]
۵۳	جدول ۳-۳ متغیرهای کنترلی بههمراه سطوح آنها
۵۴.	جدول ۳-۴ ماتریس متعامد L27 طراحی آزمایش تاگوچی
۵۷	جدول ۳-۵ عوامل کنترلی و سطوح آنها در روش سطح پاسخ
۵٨	جدول ۳-۶ آزمایشهای طراحی شده به روش سطح پاسخ
۶۴.	جدول ۴-۱ خواص مکانیکی لوله آلومینیومی (قبل و بعد از بازپخت)
۶۴.	جدول ۴-۲ خواص مکانیکی لوله مسی (قبل و بعد از بازپخت)
۶۴.	جدول ۴-۳ خواص مکانیکی لوله برنجی
۶۵.	جدول ۴-۴ دادههای آزمون کشش و تعیین ضریب ناهمسانگردی
۷۰.	جدول ۴-۵ نتایج حاصل از طراحی آزمایش تاگوچی
VV.	جدول ۴-۶ جدول تحلیل واریانس برای ارتفاع شاخه
٧٧	جدول ۴-۷ جدول تحلیل واریانس برای درصد کاهش ضخامت
Υ٩	جدول ۴-۸ نتایج طراحی آزمایش سطح پاسخ
٨٢	جدول ۴-۹ تحلیل واریانس بر اساس روش سطح پاسخ برای ارتفاع شاخه
٨٣	جدول ۴-۱۰ تحلیل واریانس بر اساس روش سطح پاسخ برای درصد کاهش ضخامت
٨۴	جدول ۴-۱۱ تحلیل واریانس تصحیح شده بر اساس روش سطح پاسخ برای ارتفاع شاخه
٨۴	جدول ۴-۱۲ تحلیل واریانس بر اساس روش سطح پاسخ برای درصد کاهش ضخامت

# فهرست نشانهها

R <sub>c</sub>	شعاع گوشه قالب	A <sub>0</sub>	سطح مقطع اوليه
2 <i>R</i> <sub>h</sub>	قطر سوراخ كنترل فشار ثانوي	В	تانسور کوشی-گرین چپ
کوس) r <sub>ij</sub>	ثوابت پتانسیل ناهمسانگری (آبا)	D <sub>0</sub>	قطر اوليه
S	تنش مهندسی	E	مدول کشسان
t	ضخامت	е	کرنش مهندسی
W	تابع انرژی کرنشی	Н	ارتفاع شاخه
ε	كرنش حقيقي	I <sub>1</sub>	ثابت اول تانسور تغيير شكل
Ee	كرنش كشسان	I <sub>2</sub>	ثابت دوم تانسور تغيير شكل
$\varepsilon_p$	كرنش مومسان	I <sub>3</sub>	ثابت سوم تانسور تغيير شكل
$\varepsilon_l$	كرنش طولى	K	ضریب کار سختی
E <sub>t</sub>	كرنش ضخامتي	L	تابع زیان
$\mathcal{E}_W$	كرنش عرضي	L <sub>1</sub>	فاصله زبانه سنبه از لبه لوله
σ	تنش حقيقى	L <sub>2</sub>	ارتفاع لاستيك اصلى
λ	نسبت کشش	L <sub>3</sub>	ارتفاع لاستيك ثانوى
ρ	نسبت کرنش	m	پارامتر هدف
μ	ضريب اصطكاك	n	توان کرنش سختی
		Р	نیروی محوری
		R	ناھمسانگردی مومسان

| س

#### فصل ۱ مقدمه

۱–۱– مقدمه

در جهان صنعتی امروز، به تولید به عنوان یک سلاح رقابتی نگریسته میشود و سازمانهای تولیدی در محیطی قرار گرفتهاند که از ویژگیهای آن میتوان به افزایش فشارهای رقابتی، تنوع در محصولات، تغییر در انتظارات اجتماعی و افزایش سطح توقع مشتریان اشاره کرد. محصولات در حالی که باید بسیار کیفی باشند، تنها زمان کوتاهی در بازار میمانند و باید جای خود را به محصولاتی بدهند که با آخرین ذائقه، سلیقه و یا نیاز مشتریان سازگار هستند. شرایط فوق سبب گردیده تا بهرهگیری از روشهای نوین تولید برای سازمانهای تولیدی از اهمیت زیادی برخوردار شود. در دهههای اخیر به کارگیری ابزارهای نوین در فرایندهای شکل دهی فلزات توسعه یافت که سبب پیشرفتهایی در ارتباط با انواع روشهای تولید گردید. از جمله روشهای نوین تولید در ساخت محصولات ورق و لوله میتوان به شکل دهی به کمک ابزار انعطاف پذیر <sup>۱</sup> اشاره کرد که به طور وسیعی در صنایع هوایی و خودروسازی استفاده میشود. این روشها خود به سه گروه کلی ابزار جامد (الاستومری)، مایع (سیال روغن یا آب) و گاز (هوا) طبقهبندی میشود که به عنوان واسط اعمال فشار مورد استفاده قرار میگیرد. در سالهای اخیر از این ابزارهای انعطاف پذیر به سبب کاهش هزینههای مرتبط با ابزارسازی و همچنین کیفیت

١

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Flexible die forming

قابل قبول محصولات نهایی به طور گستردهای در طراحی ابزارهای شکلدهی فلزات استفاده میشود. از طرفی شناخت متغیرهای فرایند و میزان تأثیرگذاری هر یک از این عوامل میتواند نتایج مطلوبی را در طراحی یک فرایند داشته باشد.

در این فصل، نخست فرایندهای شکلدهی به کمک ابزار انعطاف پذیر به همراه مزایا و کاربردهای آن معرفی شده و سپس توضیح مختصری پیرامون فرایندهای شکلدهی به کمک ابزار الاستومری، هیدروفرمینگ<sup>۱</sup>، دمش گاز و شکلدهی با فشار ویسکوز ارائه خواهد شد. پس از آن مروری بر پژوهشهای مرتبط با پایاننامه ارائه شده و در پایان اهداف و ویژگیهای پایاننامه ذکر خواهد شد.

#### ۲-۱- شکلدهی با قالب انعطاف پذیر

امروزه برای پایداری در صنایع تولیدی، به حداقل رساندن زمان پاسخگویی و هزینه بههمراه کیفیت و بازده حداکثری در ساخت قطعات، امری ضروری است. شکلدهی ورق و لوله به عنوان یک فرایند تولید پرهزینه که به طور گستردهای مورد استفاده قرار میگیرد، نیاز به بررسی دقیق دارد. در سالهای اخیر بسیاری از شرکتهای صنعتی نیازمند تولید تعداد زیادی از قطعات دارای شکل منحنی کوچک هستند که ضمن افزایش هزینه برای هر قطعه، نیاز به ابزارهای متعددی نیز میباشد. یک روش شکلدهی قابل اجرا که میتوان هزینههای این قبیل تولیدات صنعتی را کاهش داد، فرایند شکل دهی انعطاف پذیر میباشد [۱]. شکلدهی با قالب انعطاف پذیر یکی از روشهای شکلدهی ورق و لوله میباشد که در آن یک قالب انعطاف پذیر جایگزین سنبه یا قالب صلب سنتی میشود. قالب انعطاف پذیر یک واسط اعمال فشار<sup>۲</sup> مانند مایع (آب یا روغن)، میله فشار مختلف، میتوان از قالب انعطاف پذیر برای تولید قطعات پیچیده با تعداد کم و تنوع زیاد بههمراه تغییر فشار مختلف، میتوان از قالب انعطاف پذیر برای تولید قطعات پیچیده با تعداد کم و تنوع زیاد بههمراه تغییر شکل مومسان<sup>۵</sup> بزرگ در بسیاری از گروههای صنعتی، به خصوص صنایع هوافضا استفاده کرد. فناوری شکل دهی

<sup>5</sup> Plastic

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Hydroforming

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Pressure-carrying medium

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Elastic

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Polyurethane (PU)

با قالب انعطاف پذیر با منعطف نمودن بیشتر فرایند شکل دهی فلزات سبب کاهش هزینهها، دقت ابعادی و کیفیت سطح خوب، سایش کمتر قالب و افزایش قابلیت کشش و شکل پذیری<sup>۲</sup> خواهد شد [۲]. در ادامه برخی از فرایندهای شکل دهی با قالب انعطاف پذیر معرفی می شود.

<sup>۳</sup>–۲–۱ شکلدهی با بالشتک کشسان

در اواخر قرن نوزدهم فرایند شکل دهی با لاستیک به عنوان یک روش کشش عمیق که در آن یک بالشتک کشسان جایگزین بخشی از ابزار شد، معرفی گردید. این روش عمدتاً در صنایع هوایی و ساخت نمونهها<sup>۴</sup> استفاده می شود [۳]. در این فرایند اساس شکل دهی بر پایه قرار گیری ابزار لاستیکی در یک محفظه صلب به انجام می رسد. این لاستیک رفتاری تراکمناپذیر از خود نشان می دهد و شکل دهی با استفاده از نیروی ایجاد شده توسط یک پرس به انجام می رسد که به دلیل خاصیت ارتجاعی لاستیک و بالا رفتن کیفیت سطح، همواره مورد توجه بوده است. برخی از لاستیکها دارای خواص مکانیکی مناسبی هستند که آنها را به یک ابزار انعطاف پذیر تبدیل کرده است که در این میان می توان به لاستیک های الاستومری اشاره کرد. الاستومرها پلیمرهای صنعتی با رفتار مکانیکی ویسکوالاستیک می باشند که دارای نیروی بین مولکولی بسیار ضعیف بوده و در مقایسه با مواد دیگر دارای مدول کشسان پایین و کرنش شکست بالا می باشند. از الاستومرهای مورد استفاده در شکل دهی فلزات می توان به پلی اورتان، لاستیک طبیعی<sup>۵</sup>، سیلیکون<sup>3</sup>، پلاستی پرن<sup>۷</sup> و ننوپرن<sup>۸</sup> اشاره کرد. از مزایای فرایند شکل دهی با ابزار الاستومری نسبت به فرایندهای سنتی می توان به موارد زیر اشاره کرد.

- تنها به یک نیمه صلب قالب نیاز است.
- یک بالشتک کشسان یا دیافراگم برای شکل دهی انواع مختلف قطعه استفاده می شود. بالشتک کشسان پس از برداشتن فشار از روی آن به حالت اولیه خود برمی گردد.

- <sup>3</sup> Rubber Pad Forming (RPF)
- <sup>4</sup> Fabrication of prototype
- <sup>5</sup> Natural rubber
- <sup>6</sup> Silicon
- <sup>7</sup> Plastiprene
  <sup>8</sup> Neoprene

٣

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Drawability

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Formability

- هزینه ساخت ابزار در مقایسه با روشهای سنتی و هزینه تجهیزات در مقایسه با هیدروفرمینگ کاهش می یابد.
- شعاع شکلدهی در طی فرایند به طور تدریجی کاهش مییابد، در حالی که در اغلب قالبهای سنتی تغییرات شعاع سریع رخ میدهد. مثلاً در فرایند کشش عمیق، ورق به سرعت بر روی شعاع ماتریس شکل می گیرد.
  - ناز کشدگی قطعه که در فرایند کشش عمیق رخ میدهد به طور قابل ملاحظهای کاهش مییابد.
    - فلزات مختلف با ضخامتهای متفاوت را با یک ابزار می توان شکل داد.
- قطعات با کیفیت سطح نهایی عالی میتوان تولید کرد که همچنین خراشیدگی ابزار بر روی قطعه رخ نمیدهد.
- مدت زمان آمادهسازی قالب به طور قابل توجهی کاهش می یابد؛ زیرا تنظیم نمودن ابزار ضروری نیست.
  - آببندی محیط انتقال فشار در مقایسه با روشهای شکلدهی با روغن و گاز آسان تر است.

همچنین با استفاده از ابزار الاستومری نیروهای اصطکاکی بین لوله و ابزار گسترش مییابد که یک فشار جانبی بر لوله تولید می کند. این اصطکاک سودمند، بر میزان انبساط لوله تأثیر گذاشته و همچنین ناپایداری کششی را به تأخیر می اندازد [۵]. شکل ۱-۱ طرحواره فرایند تولید قطعه تی شکل با استفاده از ابزار انعطاف پذیر را نشان می دهد.



شکل ۱-۱- طرحواره فرایند تولید قطعه تی شکل با استفاده از ابزار انعطاف پذیر [۶]

#### ۱-۲-۱ هیدروفرمینگ ورق و لوله

هیدروفرمینگ یا شکلدهی هیدرولیکی که برای زمان طولانی به عنوان یکی از فرایندهای اساسی در شکلدهی ورق به کار میرود، قبل از جنگ جهانی دوم توسعه یافت. کاربرد آن به دلیل نقاط ضعف، تحقیقات تئوری و پژوهشهای عملی نسبتاً کم، در برخی از زمینههای خاص صنعت هواپیمایی آلمان محدود شد. اما از سال ۱۹۹۰ در بسیاری از زمینههای صنعتی به ویژه صنایع خودروسازی مورد توجه قرار گرفت [۷]. در هیدروفرمینگ یا شکلدهی با فشار سیال، ورق فلزی در قالب توسط فشار سیال شکل می یابد. در بسیاری از موارد یک دیافراگم انعطاف پذیر روی ورق قرار گرفته و سپس در داخل حفرهی قالب مادگی شکل داده می شود. همچنین از فرایند هیدروفرمینگ برای شکل دهی قطعات لوله ای مانند قابهای دوچرخه و اتصالات لوله استفاده می شود. نیروی محوری ممکن است همراه فشار داخلی اعمال شود که تنش فشاري در يک جهت ايجاد ميكند و در نتيجه نازكشدگي و پارگي المانهاي لوله به تأخير ميافتد. با طراحی ماشینهای شکلدهی مخصوص میتوان تعداد زیادی از قطعات را با این روش و هزینه کم شکل داد. كاربرد ديگر اين فرايند، شكلدهي قطعات لولهاي مانند اجزاي قاب وسيله نقليه است. در اين روش یک لولهی گرد که خم شده است در داخل قالب قرار می گیرد و تحت فشار داخلی به مقطع مربعی تبدیل می شود [۸]. طرحواره این فرایندها در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. از مزایای بسیار مهم هیدروفرمینگ لوله می توان به موارد زیر اشاره کرد [۹].

توليد اجزاى پيچيده كه قبلاً تنها با چندين قالب جدا از هم قابل توليد بودند.

- توليد قطعات با شكل و اندازه بسيار دقيق
  - افزایش استحکام به دلیل کار سختی
    - وزن كم به همراه استحكام مطلوب
      - صلبيت بالا
      - استحكام خستگى بالا
- اجزای جوشی کمتر برای قطعات پیچیده



شکل ۱-۲ فرایند هیدروفرمینگ، الف) ورق، ب) اتصال تی شکل، ج) تغییر مقطع [۸] هیدروفرمینگ لوله دارای برخی معایب از جمله زمان تولید آهسته، تجهیزات گرانقیمت و عدم گستردگی دانش بنیادی برای فرایند و طراحی ابزار میباشد. همچنین قطعات هیدروفرم شده به روشهای جوشکاری پیشرفته تری برای مونتاژ نیاز دارند [۱۰].

۲−۲−۱ دمش گاز در دمای بالا<sup>۱</sup>

فرایندهای شکلدهی گرم و داغ برای بهبود شکلپذیری قطعههایی با چقرمگی<sup>۲</sup> کم در دمای محیط مناسب میباشد. با این وجود در هیدروفرمینگ گرم لوله محدودیتهایی وجود دارد؛ زیرا واسط فشار مانند روغن و آب به طور کلی در دمایی زیر C<sup>o</sup> ۳۰۰ قابلیت بهکارگیری دارند [۱۱]. در این فرایند ابتدا لوله درون قالب قرار میگیرد و پس از آنکه گاز در آن دمیده شد، به لوله تا رسیدن به دمای مورد نظر حرارت داده میشود. سپس حرکت سنبه به همراه فشار داخلی ناشی از گاز سبب میگردد لوله به شکل حفره قالب در این فرایند میتوان دما بههمراه فشار داخلی ناشی از گاز سبب میگردد لوله به شکل حفره قالب در آید. در این فرایند میتوان دما بههمراه فشار و یا تنها دما را به عنوان عوامل قابل کنترل در نظر گرفت. دلیل گرم کردن لوله در فرایند دمش گاز این است که تنش تسلیم ماده با افزایش دما کاهش مییابد. در نتیجه میتوان لوله را با استفاده از فشار گاز داخلی کمتری نسبت به حالت سرد، شکل داد و تناژ پرس نیز کاهش مییابد. همچنین ازدیاد طول بیشینه<sup>۲</sup> نسبت به کارکرد در دمای محیط میتواند بیشتر باشد [۱۲]. گرچه این فرایند شبیه به هیدروفرمینگ است که در آن محدودیت درجه حرارت با استفاده از گاز حذف گردید اما کنترل فرایند دمش گاز آسان نیست، زیرا که درجه حرارت به عنوان یک عامل کنترلی به فشار داخلی و تغذیه محوری اضافه شده

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Hot gas forming

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Ductility

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Maximum elongation



شکل ۱-۳ فرایند دمش گاز در دمای بالا با کنترل عوامل، الف) دما، ب) دما و فشار [۱۴]

۱-۲-۱ شکلدهی با فشار ویسکوز

در هیدروفرمینگ سنتی ورق از آب بههمراه مواد افزودنی به عنوان واسط فشار استفاده میشود، با این حال شکلدهی با فشار ویسکوز با به کارگیری یک ماده ویسکوز میتواند در فرایند هیدروفرمینگ استفاده گردد که مزیت آن بهبود آببندی بهدلیل کاهش نشتی و تولید آسان تر نمونه اولیه با تعداد کم است [۱۵]. شکلدهی با فشار ویسکوز در سال ۱۹۹۲ ابداع گردید و تفاوت آن با فناوری شکلدهی ورق انعطاف پذیر سنتی در به کارگیری از یک نوع ماده نیمه جامد، جریان پذیر و ویسکوز به عنوان واسط انتقال فشار است. در VPF از واسط ویسکوز به عنوان سنبه نرم زمانی که به یک طرف و یا سنبه نرم و فشار پشتی هنگامی که به دو طرف ورق فلزی اعمال شود، استفاده می گردد. در طی تزریق واسط ویسکوز، فشار در محفظه قالب توزیع شده و ورق

<sup>&</sup>lt;u>λ</u>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Viscous Pressure Forming (VPF)

فلزی تحت فشار ناشی از واسط ویسکوز شکل مییابد. طرحواره VPF در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. در مقایسه با فرایند شکل دهی ورق سنتی، واسط ویسکوز میتواند سطحی با شکل پیچیده را خیلی خوب پر کند. قطعات شکل دهی شده توسط VPF کیفیت سطح خوب و دقت ابعادی بالایی دارند [۱۶]. گرانروی واسط تأثیر زیادی بر روی فرایند شکل دهی دارد. گرانروی کم سبب میشود که فرایند شباهت بیشتری به هیدروفرمینگ داشته باشد در حالی که گرانرویی بالاتر بیشتر شبیه به فرایند با سنبه صلب میشود [۵].



شکل ۱-۴ طرحواره VPF، ۱) سیلندر بالایی، ۲) محفظه واسط، ۳) ورق فلزی، ۴) واسط ویسکوز، ۵) قالب، ۶) سیلندر پایینی، ۷) سیلندر ورقگیر [۱۷]

شکلدهی با فشار ویسکوز کاربرد وسیعی در تولید قطعات قابل کشش در حجم کم و متوسط از موادی با قابلیت شکلدهی کم دارد. ویژگیهای اساسی این فرایند عبارتند از:

- ابزار با شکلی یکسان که موجب صرفهجویی در زمان و هزینه تولید ابزار می شود.
- توزیع فشار قابل کنترل بر سطح در طی شکلدهی که میتوان برای کنترل ضخامت ورق استفاده شود
  و گلویی موضعی ' را به تعویق اندازد.
  - فشار هیدرواستاتیک شکلدهی، شکلپذیری ورق را بهبود میبخشد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Local necking

VPF توانایی قابل قبولی در شکل دهی مواد با شکل پذیری سخت مانند آلیاژهای آلومینیوم، فولاد استحکام بالا، آلیاژهای تیتانیوم و نیکل و ورقهای چند لایه دارد. با این حال VPF فرایندی ناشناخته است و اطلاعات اندکی در مورد پارامترهای مؤثر بر فرایند در دسترس میباشد [۱۸].

در ادامه به مهم ترین تحقیقات انجام شده در خصوص فرایند شکل دهی با بالشتک کشسان اشاره می شود.

#### ۱–۳– پیشینه تحقیق

از نخستين تحقيقات ارائه شده در زمينه انبساطدهي لوله بهكمك ابزار الاستومري، مي توان به تحقيق ارائه شده توسط القرشی اشاره کرد که به شکلدهی لولههای با ضخامت کم، نظیر فولاد ضدزنگ، برنج، مس و الومينيوم با استفاده از پلياورتان پرداخته و اثرات عواملي چون جنس، طول و ضخامت لوله، هندسه ابزار و روانکار را بر توزیع کرنش قطعه محصول بررسی نمود [۱۹]. چلوان و تراویس ٔ ضمن معرفی مزایای شکلدهی با ابزار الاستومری نسبت به روش هیدروفرمینگ، روابطی برای شروع گلویی و کمانش در لوله بهدست آوردند و آزمایش تجربی خود را بر روی لوله مسی آنیل شده، با سه طول مختلف میله اورتان با سختیهای ۸۰، ۹۰ و AShore-A و همچنین تحت سه شرایط اصطکاکی متفاوت انجام دادند. در این تحقیق نتایج حاصل از ازمایشها با پیشبینی تئوری برای فشار اولیه و نهایی تطابق خوبی را نشان داد [۲۰]. جیرارد<sup>۳</sup> و همکاران از کد المان محدود LS-DYNA برای شبیه سازی انبساط متقارن محوری استفاده کردند. نتایج تحلیل عددی با آزمونهای تجربی برای تولید قطعه مخروطی از لوله مسی آنیل شده با استفاده از میله اورتان با سختی A Shore-A مقایسه شد [11]. غفوریان و گردویی با استفاده از نرمافزار المان محدود آباکوس به شبیهسازی فرایند انبساطدهی آزاد لوله فولادی زنگنزن ۳۰۴ پرداختند و در آزمایشهای تجربی خود با استفاده از ابزار الاستومري از جنس پلياورتان با سختي ۸۵ Shore-A شرايط اصطكاكي متفاوت را مورد بررسي قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایشهای ایشان نشان داد سیستم روانکاری مورد استفاده بهویژه بین لاستیک و لوله نقش بهسزایی در کنترل چروکیدگی، افزایش عمق بالج، کاهش نیروی شکل دهی و انرژی تلف شده ی اصطکاکی

<sup>3</sup> Girard

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Al-Qureshi

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Thiruvarudchelvan and Travis

فرايند خواهد داشت [٢٢]. فيلهو و القرشي يک تحليل تئوري جهت تعيين نيروي کل شکل دهي براي توليد قطعه صلیبیشکل ارائه کردند که آزمایش تجربی با استفاده از اورتان با سختی Shore-A و لوله مسی آنیل شده تطابق قابل قبولي را با روابط به دست آمده نشان داد [٢٣]. مکدونالد و هشمی ۲ شبیهسازی المان محدود سه بعدی برای تولید قطعه صلیبیشکل با استفاده از نرم افزار LS-DYNA3D ارائه دادند. سپس نتایج حاصل را با شبیهسازی فرایند هیدروفرمینگ مقایسه نموده و دریافتند که استفاده از واسط جامد سبب تولید قطعهای با ارتفاع شاخه بلندتر، نازکشدگی کمتر در رأس شاخه و تنش کمتر در قطعه نهایی میشود [۲۴]. فیلهو و همکاران در شکلدهی لوله فلزی برای ساخت اتصال تی شکل نیروی فرایند را با استفاده از تحلیل قاچی بهدست آوردند. مقادیر نیروی شکلدهی بهدست آمده از این روش برای میله الاستومری اورتان با سختی A Shore-A و بر روی لولههایی از جنس آلومینیوم، مس و برنج به کمک آزمونهای تجربی راستی آزمایی شد [۲۵]. شنگ و تونقای<sup>۳</sup> ضمن استفاده از روش کران بالا برای پیشبینی نیروی شکلدهی، روش جدیدی برای تولید قطعات تی شکل با استفاده از اورتان معرفی کردند. در این روش علاوه بر فشار اعمالی بر ابزار الاستومري و انتهاي لوله، از يک فشار مخالف در ناحيه شاخهي بالجشده استفاده شده است. استفاده از اين روش در آزمایشهای تجربی بر روی تعدادی از لولههای فولادی کمکربن با قطرهای متفاوت، حالت تنش را بهبود بخشید و سبب افزایش حد شکل دهی گردید [۲۶]. شان<sup>۴</sup> و همکاران کد المان محدود سهبعدی را برای شبیهسازی فرایند شکلدهی لوله تی شکل تهیه نمودند و آزمایش های خود را با استفاده از ابزار پارافین و آلیاژی با نقطه ذوب پایین به عنوان ابزار جامد بر روی لوله فولادی کم کربن به انجام رساندند. آنها دریافتند اصطکاک بین ابزار و دیواره داخلی لوله سبب هدایت بهتر لوله به سمت حفره قالب شده و شکل پذیری را بهبود می بخشد [۲۷]. بیسادی و کلانتری به شبیهسازی فرایند شکل دهی لوله های تی شکل توسط نرم افزار المان محدود آباکوس و همچنین آزمایشهای تجربی بر روی لوله مسی آنیل شده با استفاده از میله پلی اورتان پرداختند و تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج شبیهسازی و تجربی مشاهده نمودند. سپس با بررسی اثرات شعاع قالب، ضخامت لوله و اصطکاک توسط شبیهسازی دریافتند که با انتخاب لوله با ضخامت اولیه بیشتر، افزایش شعاع قالب و

<sup>1</sup> Filho

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Mac Donald and Hashmi

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Sheng and Tonghai

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Shan

کاهش ضریب اصطکاک بین قالب و لوله می توان به طول شاخه بلندتری دست یافت. درحالی که ضریب اصطکاک بین لوله و میله اثر چندانی بر روی متغیرهای شکلدهی ندارد [۲۹, ۲۹]. فولی و همکاران ضمن ارائه رابطهای جهت تعیین نیروی شکلدهی با استفاده از روش کران بالا برای اتصال تی شکل، با انجام آزمایشهای تجربی مقادیر متوسط ضریب اصطکاک در این فرایند را برای لولههایی از جنس آلومینیوم، برنج و مس تعیین نمودند [۳۰]. غفوریان و همکاران به صورت تجربی و عددی شکل پذیری در فرایند انبساطدهی لوله با دو روش هیدروفرمینگ و ابزار الاستومری را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که انبساطدهی با ابزار الاستومري نسبت به هيدروفرمينگ سبب افزايش كرنش حدى، عمق انبساطدهي و ميزان كروي بودن ناحيه تغییر شکل یافته به ترتیب برابر با ۶۶٪، ۱۲٪ و ۶۳٪ میشود [۳۱]. این نویسنده در تحقیقی دیگر به بررسی اثر عوامل انبساطدهی آزاد لوله فولادی زنگنزن ۳۰۴ با استفاده از ابزار الاستومری بر ضخامت و متوسط ارتفاع انبساطدهی پرداختند. سپس با بهره گیری از روش طراحی آزمایش<sup>۲</sup> با روش عاملی کامل<sup>۳</sup> و پیش بینی مدل رگرسیونی بر اساس متغیرهای شکلدهی، مقدار بهینه عوامل مؤثر در فرایند را تعیین نمودند. ایشان دریافتند که اصطکاک (بین لوله و لاستیک)، ارتفاع لاستیک، میزان پیشروی سنبه و تغذیه محوری لوله تأثیر بیشتری نسبت به سایر عوامل بر روی فرایند دارند [۳۲]. چن و لیو<sup>۴</sup> به منظور تعیین پارامترهای بهینه در شکلدهی لوله تی شکل از نرمافزار ANSYS/LS-DYNA استفاده کردند و مقادیر بهینهای برای طول اولیه لوله، ضخامت اولیه لوله، شعاع ورودی قالب، ضریب اصطکاک بین لوله و قالب و نیز بین لوله و ابزار الاستومری ارائه نمودند. ایشان همچنین مقادیر بهینهای برای ارتفاع زبانه سنبه و سرعت شکلدهی تعیین نمودند [۳۳].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Foli

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Design of Experiment (DOE)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Full factorial

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Chen and Liu

#### ۱-۴-۱ اهداف و ویژگیهای پایاننامه

در این پژوهش به منظور شکل دهی قطعهی اتصال تیشکل، علاوه بر فشار داخلی لوله، از یک فشار ثانوی بر روی سطح خارجی در ناحیهی شاخهی اتصال استفاده شد. در ابتدا با استفاده از روش عددی و با شبیه سازی به کمک نرمافزار آباکوس<sup>(</sup>، مدل سازی فرایند انجام گرفت. از مدل مونی – ریولین<sup>۲</sup> برای رفتار ابزار الاستومری و مدل کشسان – مومسان برای لولهی فلزی استفاده گردید. اثر پارامترهای مربوط به هندسه قالب، جنس لاستیک، شرایط اصطکاکی و نوع بارگذاری بر روی عمق نهایی شاخهی اتصال مورد بررسی قرار گرفت. از معیار شکست شرایط اصطکاکی و نوع بارگذاری بر روی عمق نهایی شاخهی اتصال مورد بررسی قرار گرفت. از معیار شکست تعداد متغیرهای مؤثر در فرایند، از روش تحلیل آزمایشهای تاگوچی<sup>7</sup> برای طراحی آزمایشهای شبیه سازی استفاده شد. سپس با شناسایی میزان حساسیت پارامترهای مؤثر، در بهینه سازی دقیق تر مقادیر بهینه پارامترهای طراحی این فرایند با کمک روش سطح پاسخ<sup>4</sup> بدست آمد. در بخش تجربی، تهیه مواد مناسب و آزمون های لولیه خواص مکانیکی بر روی لاستیک و لوله انجام شد. این آزمون ها شامل فشار لاستیک بر طبق آزمون های لولیه خواص مکانیکی بر روی لاستیک و لوله انجام شد. این آزمون ها شامل فشار لاستیک بر طبق استاندارد ASTM D575-0 و کشش لوله بر طبق استاندارد ASTM A370 می باشد. سپس تحلیل تنش سویا بدی قرایند انجام گرفت. اجرای

بررسی اثر فشار ثانوی بر ارتفاع شاخه اتصال و توزیع ضخامت لوله و همچنین بهینهسازی پارامترهای فرایند شکلدهی اتصال لوله با استفاده از محیط واسط الاستومری و در نظر گرفتن ناهمسانگردی مومسان<sup>۵</sup> لوله از برجستهترین نوآوریهای این پژوهش میباشد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Abaqus

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Mooney-Rivlin

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Taguchi

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Response Surface Methodology (RSM)

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Plastic anisotropy

1-۵- معرفی فصول آتی پایاننامه

در انجام پایاننامه حاضر، در ابتدا مطالعهای پیرامون فرایندهای شکلدهی با ابزار انعطاف پذیر، مزایا و معایب هر یک از روشهای لاستیکی، سیال، گاز و ماده ویسکوز، و همچنین مطالعهای پیرامون پژوهشهای انجام شده توسط سایر محققان صورت گرفت که در فصل اول بیان شد. در فصل دوم تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده در انجام آزمونهای تجربی، نحوه بدست آوردن خواص مکانیکی لوله و لاستیک، و روند انجام آزمایشها ذکر گردید. بهمنظور بررسی عوامل کنترلی فرایند و تأثیر هر یک از این متغیرها بر روی قطعه محصول از روشهای طراحی آزمایش و شبیه سازی استفاده شد. از این رو مراحل انجام شبیه سازی در نرمافزار آباکوس، چهارم نتایج بدست آمده مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. در نهایت، نتیجه گیریهای کلی از پایان نامه و چند پیشنهاد به منظور بررسی کامل تر این تحقیق در فصل پنجم ارائه خواهد شد.

# فصل ۲ طراحی و اجرای آزمونهای تجربی

در این فصل ابتدا آزمونهای تجربی انجام شده شامل تعیین خواص مکانیکی لوله و لاستیک، و عملیات حرارتی جهت بهبود خواص لوله، شرح داده می شود. سپس تجهیزات مورد استفاده از جمله قالب، پرسها و دستگاه آزمون کشش و نحوه عملکرد آنها معرفی می شود. در نهایت آزمایش های تجربی تعیین شده برای تولید قطعه اتصال تی شکل و نحوه آماده سازی نمونه ها بیان شده است.

### ۲-۱- مواد اولیه لوله و لاستیک

برای تولید اتصال تی شکل، لوله های بدون درز از جنس برنج، مس (تولیدی صنایع مس شهید باهنر) و آلومینیوم با قطر خارجی ۳۵ mm، ۳۵ و ضخامت بهترتیب ۱ mm ۱ mm ۱ و ۳۲ انتخاب گردید. همچنین لاستیک هایی از جنس پلی اورتان با سختی ۸۵ Shore-A و PVC با سختی Shore-A، با قطر ۳۵ mm ۳۵ به عنوان ابزار الاستومری تهیه گردید.

## ۲-۲- تعیین خواص مکانیکی لوله و لاستیک

مواد مورد استفاده در کاربردهای مهندسی بهعنوان اجزای ساختاری که تحت بارگذاری قرار دارند، با توجه به هدف کاربرد تعیین میشوند. خواص مکانیکی مواد، پاسخ یک ماده به بارگذاری توصیف میشود [۳۴]. به منظور تعیین خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در این پژوهش، آزمون کشش و فشار بهترتیب بر روی لوله و لاستیک اجرا گردید که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

## ۲-۲-۱ آزمون کشش لوله

آزمون کشش تکمحوری مهمترین آزمون تعیین خواص مواد برای اهداف تحلیلی و دقیق است. این آزمون بهخوبی تنش تسلیم، کار سختی، استحکام کششی نهایی، چقرمگی و ناهمسانگردی را معین می کند و همچنین برای اندازه گیری وابستگی دما و حساسیت نرخ کرنش به کمیتهای بیان شده، استفاده میشود. بهعبارتی آزمون کشش پارامترهای مهم برای پیشبینی رفتار شکل دهی را در اختیار قرار می دهد. آزمون کشش برروی یک میله، صفحه و یا نواری از ماده که دارای یک ناحیه با کاهش مقطع (قسمت گیج) است، انجام میشود. ناحیه کاهش مقطع در فک دستگاه مهار می گردد [۳۴].

برای تعیین خواص مکانیکی، آزمون کشش تکمحوری مطابق با استاندارد ASTM A370 بر روی نمونههای تهیه شده از لوله انجام شد. برای اطمینان از صحت نتایج، سه نمونه آزمون کشش از هر جنس آماده گردید که نمونههای اول و دوم تا نقطه شکست و نمونه سوم تا یک سوم کرنش گلویی شدن بارگذاری شد. نمونههای استاندارد آزمون کشش و همچنین مشخصات ابعادی آن در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. ابعاد اینچی استاندارد در پیوست ارائه شده است. این آزمون به کمک دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ که در شکل ۲-۲ قابل مشاهده است، با نرخ کرنش <sup>1-</sup>s



شکل ۲-۱ الف) ابعاد نمونه آزمون کشش از لوله بر اساس استاندارد ASTM A370 (ابعاد به میلیمتر) و موقعیت برش نمونهها نسبت به مقطع لوله، ب) نمونههای ماشین کاریشده



شکل ۲-۲ دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ بههمراه سیستم کنترل رایانهای

۲-۲-۲ آزمون فشار لاستیک و محاسبه ثوابت مونی-ریولین این آزمون نوعی از اندازه گیری سفتی فشاری ( لاستیک است که در آن نمونه تحت نیروی فشاری قرار گرفته و تغییر شکل در نمونه به صورت کاهش ارتفاع رخ میدهد. این آزمون برای مقایسه سفتی موادی که در فن آوری های لاستیکی استفاده می شود مفید بوده و به پیشرفت این مواد کمک خواهد کرد [۳۵]. برای تعیین منحنی تنش-کرنش فشاری لاستیک، نمونهها بر اساس استاندارد ASTM D575-91 آماده گردید که مشخصات ابعادی آن در جدول ۲-۱ مشاهده می شود. آزمون فشار با نرخ کرنش <sup>۱</sup>-۲ ۰/۰۰۵ و توسط دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ انجام شد. شکل ۲-۳ نمونههای تهیه شده را بههمراه فکهای فشار دستگاه نشان میدهد.

ارتفاع h (mm)	قطر (mm) d)	جنس	شماره نمونه
۱۵	344/8	PU	N1
١٢/٧	۲۸/۶	PU	N2
17/4	۲۸/۷	PU	N3
14/8	۳۵	PVC	N4
14	۳۵	PVC	N5

جدول ۲-۱ مشخصات ابعادی نمونههای لاستیک آزمون فشار





(الف)

شکل ۲-۳ الف) نمونههای آزمون فشار لاستیک، ب) فکهای فشاری دستگاه

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Compression stiffness
۲-۲-۳ عملیات حرارتی بازیخت'

عملیات حرارتی فلزات و آلیاژهای فلزی در مفهوم کلی به فرایندی گفته میشود که در آن طی گرم و سرد کردن کنترل شده در حالت جامد و بدون ایجاد تغییر شکل در قطعه، با هدف دستیابی به خواص مطلوب فیزیکی و مکانیکی انجام میشود. معمولاً عملیات حرارتی بهمنظور تنشزدایی، ریز کردن دانهبندی، افزایش مقاومت به سایش با ایجاد لایه سخت بر سطح و در عین حال افزایش مقاومت به ضربه با ایجاد مرکز نرمتر در داخل قطعه، افزایش جذب انرژی ضربه، بهبود خواص الکتریکی و مغناطیسی به کار گرفته میشود.

بازپخت به هر نوع عملیات حرارتی که منجر به تشکیل ساختاری بهجز مارتنزیت و با سختی کم و انعطاف پذیری زیاد شود، اطلاق میشود. بازپخت کامل<sup>۲</sup> به فرایندی گفته میشود که موجب تغییر خواصی مانند سختی و شکل پذیری قطعه میشود. این فرایند شامل گرم کردن ماده تا دمایی مناسب، نگهداری در آن دما با زمان مشخص و کافی، و سپس سرد کردن آن با سرعت مناسب تا دمای محیط (عموماً در کوره) میباشد. این عملیات عموماً برای نرم کردن مواد فلزی انجام میشود و در نتیجه آن خواصی مانند قابلیت ماشین کاری، خواص الکتریکی، قابلیت کار سرد<sup>۳</sup>، پایداری ابعاد آن و ساختار آلیاژ تغییر قابل توجهای میکند.

در این پژوهش با هدف بهبود شکل پذیری، کاهش تنش تسلیم و افزایش محدوده تغییر شکل مومسان، لولههای آلومینیومی و مسی تحت عملیات حرارتی بازپخت کامل قرار گرفتند. بدین منظور به لولههای مسی در دمای °C ۵۵۰ به مدت ۹۰ دقیقه [۳۶] و لولههای آلومینیومی در دمای °C ۳۷۰ برای ۲ ساعت [۳۷] حرارت داده شد و سپس در کوره خنک گردید. پس از خارج کردن لولهها از کوره، اکسید ایجاد شده بر روی سطح در طی عملیات حرارتی، توسط کاغذ سنباده برداشته شد و شستوشو توسط اتانول انجام گرفت. از کوره الکتریکی Paragon مدل S1132 نشان داده شده در شکل ۲-۴ برای عملیات حرارتی بازپخت کامل استفاده شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Annealing heat treatment

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Full annealing

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Cold working



شکل ۲-۴ کوره استفاده شده جهت انجام عملیات حرارتی بازپخت کامل

پس از اجرای عملیات حرارتی بازپخت کامل بر روی لولههای آلومینیومی و مسی، پنج نمونه آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM A370 تهیه گردید. نمونههای اول و دوم آلومینیومی، و اول مسی تا نقطه شکست و نمونههای سوم آلومینیومی و دوم مسی تا یک سوم کرنش گلویی شدن بارگذاری شد. این نمونههای استاندارد در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵ نمونههای آزمون کشش از لولههای آلومینیومی و مسی بازپختشده

## ۲-۳- آمادهسازی نمونهها

با توجه به عدم تقارن محوری هندسه محصول (لوله با شاخه تی)، برای جلوگیری از چینخوردگی در محصول و کاهش نیروی فرایند، لبههای لوله اولیه از طرفین پخ زده شد. پخ لوله باید به گونهای تعیین شود که ضمن اینکه از چروکیدگی قطعه نهایی جلوگیری کند، در انتهای فرایند باقی نماند. پخ ایجاد شده در دو انتهای لوله با دو مؤلفه x و y مطابق شکل ۲-۶ مشخص گردید.



شکل ۲-۶ سمت راست: پخ ایجاد شده بر لوله، سمت چپ: هندسه پخ

به منظور اندازه گیری و تعیین کرنشهای نمونههای شکلدهی شده، باید بر سطح لوله شبکهبندی با طرح مناسب ایجاد شود. طرح شبکهبندی استفاده شده در این پایاننامه به صورت دایرههایی با قطر mm ۳ و فاصله مرکز تا مرکز تا مرکز تا مرکز مع به بر روی ورق موسوم به استنسیل ایجاد گردید. پس از آنکه سطح لوله به دقت با محلول استون تمیز گردید، استنسیل مورد نظر بر روی سطح لوله قرار گرفته و از دستگاه حک الکتروشیمیایی (مدل AT-MA 3000 (AT-MA) برای شبکهبندی بر روی سطح لوله قارا گرفته و از دستگاه حک الکتروشیمیایی از طریق عبور جریان ضعیف الکتریسیته از فلز با واسطه الکترولیت مخصوص آن فلز، طرح استنسیل بر روی فلز حک میشود که از مزایای این روش میتوان به سرعت بالا، هزینه بسیار کم و ماندگاری طولانی اشاره کرد. دستگاه حکاکی الکتروشیمیایی بههمراه الکترولیت مخصوص آن فلز، طرح استنسیل بر روی فلز حک میشود که از مزایای این روش میتوان به سرعت بالا، هزینه بسیار کم و ماندگاری طولانی اشاره کرد. دستگاه حکاکی الکتروشیمیایی بههمراه الکترولیت مخصوص و استنسیل مورد استفاده و همچنین نمونه شبکهبندی شده در شکل ۲-۷ قابل مشاهده است. برای ایجاد شبکهبندی با وضوح مناسب کلید قدرت برای مس و برنج در وضعیت ۲ و برای آلومینیوم در وضعیت ۵ قرار داده شد.



شکل ۲-۷ الف) دستگاه حکاکی الکتروشیمیایی، ب) نمونه برنجی شبکهبندی شده

پس از انجام فرایند، دایرههای شبکهبندی که در ابتدا دارای قطر  $D_0$  بودند، در اثر کرنشهای کششی و فشاری به بیضی با قطر بزرگ  $D_1$  و قطر کوچک  $D_2$  تبدیل شدند که با فرض متناسب بودن تغییر شکل، جهات اصلی کرنش بر قطرهای بیخی منطبق بوده و در نتیجه کرنشهای اصلی متناسب با قطرهای این بیخی می اشند. در این صورت کرنشهای حقیقی از روابط ۲-۱ و ۲-۲ محاسبه می شود.

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{D_1}{D_0} \tag{1-7}$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{D_2}{D_0} \tag{1-1}$$

برای اندازه گیری قطرهای بیضی از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ mm ۱۰/۰ استفاده شده است. همچنین در نواحی دارای انحنا به علت دقت پایین کولیس از نوار مایلر<sup>۱</sup> استفاده گردید.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Mylar tape

۲-۴- قالب و سیستم تأمین فشار

بهمنظور اجرای آزمونهای تجربی، قالب مناسب فرایند RPF مطابق با ابعاد ارائه شده در پیوست با استفاده از نرمافزار CATIA طراحی گردید. در این طراحی، سهولت کار با قالب، قابلیت تعویض قطعات اینسرتی، گیر نکردن قطعه، لاستیک و سنبه، مونتاژ شدن دقیق و آسان، امکان استفاده از قالب برای دیگر فرایندهای شکل دهی لوله در کنار توجه به استحکام مکانیکی اجزاء آن لحاظ شد. تصویر و طرحواره قالب طراحی شده در شکل ۲-۸ نشان داده شده است.





شکل ۲-۸ الف) طرحواره قالب، ب) قالب طراحی شده

قالب طراحی شده از جنس VCN150 توسط دستگاه CNC ساخته و پس از آنکه عملیات سختکاری بر روی اجزای قالب انجام شد، برای رعایت توازی سطوح مورد عملیات سنگزنی قرار گرفت. از دو عدد پین موقعیتدهنده بهمنظور دقت در مونتاژ قالب پایین و بالا استفاده شد. شکل ۲-۹ اجزای مختلف قالب طراحی و استفاده شده در این پژوهش را نشان میدهد. مشخصات دقیق جنس، ابعاد و سختی قالب در پیوست ارائه

شده است.



## شکل ۲-۹ اجزای قالب شکلدهی

برای ایجاد نیروی شکلدهی لازم، از یک منبع تأمین قدرت هیدرولیکی با ظرفیت ۳۵۰ بار استفاده شده است. فشار ایجاد شده توسط منبع قدرت از طریق یک سیستم هیدرولیکی ثانویه که وظیفه توزیع یکسان دبی روغن را دارد به دو جک هیدرولیکی دوطرفه ۱۰ تن ارسال میشود و جکها با به حرکت درآوردن سنبهها، نیروی لازم جهت شکلدهی فرایند را فراهم میسازد. شکل ۲-۱۰ منبع تأمین قدرت هیدرولیکی به کار گرفته شده را نشان میدهد.



شكل ۲-۱۰ منبع تأمين قدرت هيدروليكي

# ۲-۵- اجرای آزمونهای تجربی

نحوه اجرای فرایند شکلدهی به این صورت است که ابتدا لوله داخل قالب گرفته و سپس لاستیک درون لوله جایگذاری می شود. پس از آن لاستیک کمکی در جای خود قرار گرفته و قالب توسط پیچ بسته می شود و به همراه سنبه ها در جای مناسب خود در داخل قاب نگه دارنده جک های هیدرولیکی قرار می گیرد. باید توجه شود که قالب در مرکز دو جک مقید شود و حرکت دو جک از نظر زمانی کاملاً با هم منطبق<sup>۱</sup> باشد تا قطعه ای متقارن تولید شود. با اعمال فشار هیدرولیک پشت جک ها، سنبه به حرکت درمی آید و با فشرده ساختن لاستیک و همچنین ایجاد نیروی محوری با برخورد به لبه لوله، فشار لازم جهت شکل دهی فراهم می شود. در نتیجه لوله در مسیری که کمترین مقاومت را دارد –که در واقع همان حفره شاخه اتصال می باشد – جریان می باید. شکل ۲–۱۱ موقعیت مجموعه قالب را در میان جک های هیدرولیک و قاب نگه دارنده ی جک ها نشان

<sup>1</sup> Synchron



## شکل ۲-۱۱ مجموعه قالب، جکهای هیدرولیک و قاب نگهدارندهی جکها

به منظور دستیابی به قطعهای سالم و همچنین ارتفاع شاخه بلندتر، آزمایشهایی تحت شرایط مختلف بر روی لوله مسی طراحی و اجرا گردید. شکل ۲-۱۲ طرحواره فرایند و جدول ۲-۲ شرایط آزمایشهای تجربی انجام شده را نشان میدهد. در تمامی آزمایشها طول لوله برابر با ۱۵۰ mm ۱۵۰ بوده و در داخل لوله از لاستیک پلیاورتان با سختی Ad Shore-A استفاده شد.

اصطکاک کم بین لوله و قالب به جریان یافتن آسان لوله کمک کرده و ضمن کاهش نیروی شکلدهی، شکلپذیری را افزایش میدهد. به همین منظور در آزمایشهای انجام شده از نایلون و روغن کشش به صورت توأم برای روانکاری بین لوله و قالب استفاده شد. روغن کشش روانکاری لایه مرزی با ضریب اصطکاک ۰/۱ و نایلون روانکاری با فیلم جامد با ضریب اصطکاک ۰/۰۵ ایجاد خواهد کرد [۳۸].



شکل ۲-۲۲ طرحواره فرایند RPF

پخ		حنس لاستیک ثانوی	فاصله S	فاصله زبانه سنبه از لبه لوله	ارتفاع لاستيك اصلى	شماره	
x (mm)	y (mm)		(mm)	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)	آزمون	
۱۸	٨	PVC	۱۳	۵	14.	C1	
۱۸	٨	PVC	۱۶/۵	۵	14.	C2	
۱۸	۱۳	PVC	١٢/٧	۵	14.	C3	
۱۸	٨	PVC	۱۲/۵	١.	۱۳۰	C4	
۱۸	٨	PU	١٣	۵	14.	C5	
۱۸	٨	PVC	۱۵	•	18.	C6	

جدول ۲-۲ آزمایشهای تجربی طراحی شده برروی لوله مسی

آزمایشهای تجربی روی لولههای آلومینیومی و برنجی با طول ۱۵۰ mm او L<sub>2</sub> و L<sub>1</sub> به ترتیب برابر با ۱۴۰ mm مطابق با جدول ۲–۳ انجام شد. در این آزمایشها از PVC به عنوان لاستیک ثانوی استفاده شده است.

پخ		فاماله					
x (mm)	y (mm)	(mm)	جنس لوله	شماره آزمون			
١٨	٨	١.	آلومينيوم	A1			
۱۸	٨	٨/۵	آلومينيوم	A2			
١٨	۵	٣	آلومينيوم	A3			
١٨	٨	۱ • /۷	برنج	B1			
١٨	١٠	14/8	برنج	B2			
١٨	١٠	18/0	برنج	B3			
١٨	١.	18	برنج	B4			
١٨	١٢	۱۵/۵	برنج	В5			

جدول ۲-۳ شرایط آزمایشهای تجربی انجام شده بر روی لولههای آلومینیومی و برنجی

فصل ۳ شبیه سازی عددی و روش بهینه سازی

در این فصل پس از بیان مقدمهای بر روش اجزاء محدود و نرمافزار آباکوس، مدلسازیهای انجام شده بهمنظور تحلیل قالب و فرایند تولید اتصال تی شکل به همراه فشار ثانوی با استفاده از ابزار الاستومری شرح داده می شود. در نهایت روش های طراحی آزمایش به کار گرفته شده در جهت تعیین اثر گذاری هر یک از متغیرهای فرایند معرفی می گردد.

۳-۱- روش اجزاء محدود

روش اجزاء محدود یک روش عددی برای حل مسائل مهندسی و ریاضی فیزیک شامل تجزیه و تحلیل ساختاری، انتقال حرارت و جرم، جریان سیال و پتانسیل الکترومغناطیسی میباشد. به طور کلی حل ریاضی تحلیلی برای مسائلی که دارای خواص مواد، نیروها و هندسه پیچیده باشد، امکان پذیر نیست. حل تحلیلی یک رابطه ریاضی برای تعیین مقادیر مجهول کل ساختار یا مجموعه فیزیکی ارائه میدهد و سپس پاسخ بهدست آمده را برای تعداد نامحدود در ساختار می پذیرد. به طور کلی حلهای تحلیلی به معادلات دیفرانسیل جزئی<sup>7</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Finite Element Method (FEM)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Partial Differential Equation (PDE)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Ordinary

درنتیجه روشهای عددی مانند اجزاء محدود برای پاسخهای قابل قبول مورد نیاز است. روش اجزاء محدود در مسائل عددی، ساختاری و غیرساختاری استفاده می شود. این روش مزایایی دارد که سبب محبوبیت آن شده است از جمله توانایی:

- مدل کردن بسیار سریع شکلهای پیچیده
- به کار گیری بدون دشواری شرایط نیرویی کل
- مدل کردن چندین مواد مختلف، زیرا معادلات اجزاء به طور مجزا تعیین می شوند.
  - به کار گیری شرایط مرزی با تعداد و نوع نامحدود
  - تغییر اندازه اجزاء که امکان استفاده از اجزای کوچک را در صورت لزوم میدهد.
    - اصلاح نسبتاً آسان و کمهزینه مدل اجزاء محدود
      - دربرداشتن اثرات دینامیکی
- به کار گیری رفتار غیرخطی که در تغییر شکلهای بزرگ و مواد غیرخطی وجود دارند.

روش اجزاء محدود در تحلیلهای ساختاری، طراح را قادر می سازد تا مسائل مربوط به تنش، ارتعاش و حرارت در طی فرایند را شناسایی کرده و تغییرات طراحی را قبل از ساخت نمونه اولیه ارزیابی کند. در نتیجه بر قابل قبول بودن نمونه افزوده می شود. علاوه بر آن اگر این روش صحیح استفاده شود، می توان تعداد نمونه های مورد نیاز برای ساخت را کاهش داد [۳۹].

## ۳-۱-۱ معرفی نرمافزار آباکوس و حلگر صریح

از جمله نرمافزارهای متداول اجزای محدود میتوان به ANSIS ، NASTRAN ، LS DYNA و ABAQUS ا اشاره کرد که هر یک دارای مزایا و محدودیتهای مرتبط با خود میباشند. در این بین آباکوس مجموعهای از برنامههای شبیه سازی قدرتمند مهندسی است که میتواند مسائلی با طیف گسترده از یک تحلیل خطی نسبتاً ساده تا تحلیلهای غیرخطی بسیار پیچیده را حل کند. آباکوس شامل کتابخانه گستردهای از المانهاست که میتواند هر نوع هندسه ای را به صورت مجازی مدل سازی کند. همچنین این برنامه شامل لیست گسترده ای از مدلهای رفتار ماده است که میتواند رفتار اغلب مصالح مهندسی مانند فلزات، لاستیک، پلیمرها، کامپوزیتها، بتن مسلح، فومهای شکننده و حتی مصالح ژئوتکنیکی مثل خاک و سنگ را نیز شبیهسازی کند. از آنجایی که آباکوس به گونهای طراحی شده که یک وسیله شبیهسازی عمومی با قابلیتهای فراگیر باشد، از آباکوس می توان برای حل مسائلی که خارج از حیطه مهندسی (تنش-کرنش) است نیز استفاده کرد. این نرمافزار می تواند شبیهسازی مسائلی با تنوع فراوان همانند انتقال حرارت، انتشار جرم، مدیریت حرارت اجزای الکتریکی (تحلیلهای کوپله الکتریکی حرارتی)، مسائل مربوط به صوت، مکانیک خاک (تحلیلهای کوپلهای جریان آب منفذی-تنش) و تحلیلهای پیزوالکتریک را انجام داد. آباکوس قابلیتهای گستردهای را برای شبیهسازی در کاربردهای خطی و غیرخطی فراهم می کند. مسائلی که دارای اجزای متعدد و مصالح مختلف هستند را می توان با تعریف هندسه هر جز و اختصاص دادن مصالح تشکیل دهنده آن و سپس تعریف شرایط تماس بین این

تحلیل دینامیک صریح<sup>۱</sup> میتواند ابزاری کارا برای حل محدوده گستردهای از مسائل مکانیک سازه غیرخطی باشد. در اغلب موارد این تحلیل مکملی برای حلگر ضمنی<sup>۲</sup> مانند آباکوس استاندارد است. خصوصیات متمایزکننده روشهای ضمنی و صریح عبارتند از:

- روشهای صریح نیازمند نمو زمانی کوچکی است که تنها به بالاترین فرکانس طبیعی مدل بستگی
   دارد و مستقل از نوع و مدت بارگذاری است. شبیه سازی ها معمولاً با استفاده از ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ تا نمو زمانی انجام می شود ولی زمان مربوط به هر نمو نسبتاً کوچک است.
- روشهای ضمنی محدودیت ذاتی برای اندازه نمو زمانی قائل نمی شوند. اندازه نمو معمولاً از فرضیات همگرایی و دقت به دست میآید. شبیه سازی های ضمنی معمولاً تعداد نمو کمتری نسبت به شبیه سازی صریح دارند، با این حال از آنجایی که مجموعه کلی معادلات در هر نمو باید حل شود، زمان هر نمو در روش ضمنی بسیار بیشتر از روش صریح است.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Implicit solver

یکی از مزایای تحلیل صریح نسبت به تحلیل ضمنی سهولت بیشتر آن در حل مسائل پیچیده تماسی است. بهعلاوه زمانی که ابعاد مدل ها بسیار بزرگ باشد تحلیل صریح نسبت به تحلیل ضمنی نیاز به عملیات پردازش کمتری دارد.

## ۲-۳ شرح مدلسازی عددی

در این پژوهش از نرمافزار 2-6.14 ABAQUS برای انجام شبیهسازیهای مورد نظر استفاده شده است. این شبیهسازیها شامل دو قسمت میباشد. در شبیهسازی اول پس از طراحی اولیه قالب، بهمنظور اطمینان از سلامت قالب در برابر تنشهای اعمالی، مدلسازی سهبعدی قالب شکلدهی اتصال تیشکل با اعمال فشار دوطرفه به کمک لاستیک، انجام شد. سپس در شبیهسازی دوم بهمنظور شناخت بهتر فرایند RPF و تأثیر هر یک از عوامل، مدلسازی سهبعدی فرایند انجام شد که در این مرحله کلیهی اجزاء قالب صلب در نظر گرفته شد، که در این مدلسازی ساز کره دوم به منظور شناخت میتر فرایند گرفته مدار گرفته مدلسازی سهبعدی این مرحله کلیهی اجزاء قالب صلب در نظر گرفته شد، که در ادامه به شرح آن پرداخته خواهد شد.

## ۳-۲-۳ تحلیل تنش سهبعدی قالب شکلدهی

یکی از مهمترین مواردی که باید در طراحی و ساخت قالب مدنظر قرار گیرد، اطمینان از کارکرد صحیح قالب در طی فرایند میباشد. در صورت عدم توجه به این موضوع ممکن است قالب در طی فرایند تحت تنشهای وارده به تسلیم رسیده و یا دچار شکست شود که میتواند زیانهایی به قالب، تجهیزات آزمایشگاهی و حتی افراد وارد کند. از اینرو جهت اطمینان از استحکام قالب در برابر تنشهای وارده، تحلیل سهبعدی قالب انجام گرفت که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

#### الف) تعريف مدل هندسي

اولین گام برای تحلیل یک مسأله، ایجاد مدل هندسی مناسب میباشد. در این بخش، هر یک از اجزای قالب به صورت سهبعدی، کاملا مجزا و از نوع شکل پذیر <sup>۱</sup> ایجاد شده است. به دلیل تقارن صفحهای موجود، تنها یک چهارم قالب مدل شد. نقشه مونتاژی و اجزای قالب در پیوست پایاننامه ارائه شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Deformable

ب) خصوصیات اجزای قالب در بخش خواص<sup>۱</sup> خصوصیات فیزیکی و مکانیکی اجزای قالب تعیین می گردد. در این مدل تنها خصوصیات ناحیه کشسان فولاد 150 VCN، شامل چگالی، مدول کشسان و ضریب پواسون به ترتیب برابر با ناحیه کشسان مشخصات به ترمافزار معرفی شده است. در ادامه این مشخصات به صورت جامد<sup>۲</sup> و همگن<sup>۳</sup> به اجزای قالب اعمال شده است.

# ج) مونتاژ<sup>†</sup> اجزای قالب

در این بخش تمامی اجزای قالب که به صورت مجزا مدل شدهاند، فراخوانی می شوند با استفاده از نوار ابزارهای موجود در این بخش، نسبت به هم موقعیت دهی می گردند. شکل ۳-۱ نحوه مونتاژ اجزای قالب را نشان می دهد.



شكل ٣-١ نحوه مونتاژ اجزاى قالب

د) تعیین تعداد مراحل و نوع حل مسئله نوع حل مسأله و مراحل شبیه سازی در بخش گام<sup>۵</sup> قابل تعریف است. در این پژوهش، مسأله مورد نظر در یک گام حل می شود. با فرض شبه استاتیک بودن اعمال تنش به اجزای قالب، حل استاتیکی گزینه مناسبی برای این مدل سازی می باشد. زمان فرایند برابر با ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته شده است.

- <sup>2</sup> Solid
- <sup>3</sup> Homogeneous
- <sup>4</sup> Assembly
- <sup>5</sup> Step

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Property

ه) تعیین نوع تماس سطوح اجزاء با هم در بخش برهم کنش<sup>۱</sup>، نوع تماس و مشخصات فیزیکی آن تعیین می شود. در این مدل سازی برهم کنش سطوح به صورت تماس عمومی<sup>۲</sup> انتخاب شده است. شرایط تماس نیز از نوع مکانیکی با رفتار مماسی<sup>۳</sup> و با مدل اصطکاکی پنالتی تعریف شد. همچنین به منظور تعیین اتصال پیچها به اجزای قالب، در سطوح رزوه از قید هم بندی<sup>۴</sup> استفاده شده است.

## و) شرایط مرزی و بارگذاری

در بخش بار<sup>۵</sup>، شرایط مرزی و نحوه بارگذاری مشخص می شود. در این مدل سازی به سطح زیرین قالب پایین، قید بدون حرکت<sup>۶</sup> داده شده است. در ادامه قیدهای تقارن در جهت های x و z به اجزای قالب اعمال گردید. به منظور ساده سازی و کاهش زمان تحلیل، از یک فشار یکنواخت<sup>۷</sup> عمود بر سطح حفره داخلی قالب به جای مدل سازی لاستیک و لوله استفاده شد.

#### ز) شبکهبندی

شبکهبندی هر یک از اجزای قالب در بخش شبکه<sup>۸</sup> انجام میشود. نوع المانی که برای هر یک از اجزای قالب استفاده میشود، باید متناسب با شرایط و نوع مسأله انتخاب شود. المان به کار رفته در مدل های قالب پایین و بالا از نوع C3D4 است که یک المان پیوسته سهبعدی با چهار گره<sup>۹</sup> میباشد. برای شبکه بندی سایر اجزای قالب شامل قالب عرضی و اینسرتی، پیچها و پین از المان نوع C3D8R که یک المان پیوسته سهبعدی هشت گرهای با انتگرال گیری کاهش یافته ۱۰ است، استفاده شده است. اندازه المانها یکی از پارامترهای مهم و تأثیر گذار در حل مسائل اجزای محدود میباشد که باید با دقت به آن توجه شود. اگر اندازه المانها بزرگ انتخاب شود، آنگاه پاسخ مسأله از دقت کافی برخوردار نخواهد بود. از طرفی هر چه اندازه المانها کاهش یابد و یا به عبارتی

- <sup>4</sup> Tie
- <sup>5</sup> Load
- <sup>6</sup> Encastre
- <sup>7</sup> Ramp
- <sup>8</sup> Mesh
- <sup>9</sup> 4-node 3D continuum

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Interaction

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> General contact

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Tangential behavior

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> 8-node 3D continuum, reduced integration

تعداد المانها افزایش یابد، سبب افزایش زمان حل می شود. در مدل سازی حاضر اندازه مناسب المانها با سعی و خطای عددی انتخاب گردید و در نواحی دارای انحنا، برای حل دقیق تر از تعداد المانهای بیشتری استفاده شد.

۳-۲-۲ مدلسازی شکلدهی اتصال تی شکل با اعمال فشار دوطرفه به کمک ابزار الاستومری

الف) تعریف مدل هندسی در این بخش مدل سهبعدی فرایند شکلدهی شامل قالب، سنبه، لوله و ابزار الاستومری انجام شد. در این مدلسازی، قطعات قالب و سنبه بهصورت پوسته <sup>۱</sup>ای و از نوع صلب گسسته<sup>۲</sup> انتخاب گردید. مدل لوله و لاستیک نیز از نوع شکلپذیر میباشد. علاوه بر آن، صفحه واسط از نوع صلب بین لوله و لاستیک ثانوی مدل شد که نقش آن جلوگیری از گنبدی شدن سر شاخه میباشد. در ادامه به هر یک از اجزای صلب یک نقطه مرجع<sup>۳</sup> اختصاص داده شد تا در تعریف شرایط مرزی و بارگذاری از آن استفاده شود. لوله مسی با قطر خارجی و طول به ترتیب mm ۳۵ و mm ۱۵۰ برای انجام شبیهسازی در نظر گرفته شده است. همچنین بهدلیل تقارن موجود، تنها یک چهارم مدل شبیهسازی شده است.

## ب) خصوصيات لوله

لوله مسی به صورت یک ماده کشسان-مومسان در نظر گرفته شد که خواص مکانیکی آن در جدول ۳-۱ مشاهده می شود. همچنین از منحنی تنش-کرنش مومسان به دست آمده از آزمون کشش تک محوری مطابق با شکل ۳-۲ برای تعیین تنش تسلیم و ناحیه مومسان لوله استفاده گردید.

جدول ۳-۱ خواص مکانیکی لوله مسی

ضريب پواسون [۴۰]	مدول کشسان (GPa) [۴۰]	تنش تسليم (MPa)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> ) [۲۴]			
• /٣٣	١١۵	٧٠	٨٩٠٠			

<sup>1</sup> Shell

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Discrete rigid

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Reference point



شکل ۳-۲ منحنی تنش-کرنش مومسان لوله مسی استفاده شده در شبیهسازی

صفحهای و ناهمسانگردی نرمال ٬  $R_{90} = R_{90} = R_{90}$  میباشد. در این شرایط ثوابت تابع پتانسیل ناهمسانگردی در نرمافزار آباکوس به صورت رابطه ۳-۳ ساده می شود.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Planar isotropy <sup>2</sup> Normal anisotropy

$$r_{11} = r_{22} = 1$$
;  $r_{33} = \sqrt{\frac{R_0 + 1}{2}}$  (Y-Y

بر طبق آزمونهای تجربی انجامشده بر روی لوله مسی در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM E517 ضریب R برابر ۰/۶۳ و از رابطه ۳-۳ مقدار <sub>33</sub> برابر با ۰/۹ محاسبه شد.

منحنی حد شکلدهی<sup>۱</sup> یک روش مفید برای کنترل پارگی در فرایندهای شکلدهی ورق و لوله میباشد [۴۱]. حد شکلدهی ورقهای فلزی به حالتی گفته میشود که طی فرایند شکلدهی در ورق ناز کشدگی موضعی آغاز و در نهایت منجر به پارگی ورق میشود. حد شکلدهی به صورت متداول در قالب منحنی کرنش اصلی<sup>۲</sup> \*۵ و فرعی<sup>۳</sup> \*۶ بیان میشود [۴۲]. هیل نشان داد که سمت چپ منحنی حد شکلدهی به آسانی با رابطه ۳-۴ تعیین می گردد.

$$\varepsilon_1^* = \frac{n}{1+\rho}$$
 که در این رابطه  $\frac{\varepsilon_2^*}{\varepsilon_1^*} = \rho$  نسبت کرنش و  $n$  توان کرنش سختی ماده است که برای لوله مسی برابر با ۲/۰  
بهدست آمد.  
سویفت نشان داد هنگامی که رابطه ۳-۵ برقرار باشد می توان در انتظار نازک شدگی پخشی<sup>۴</sup> بود. این رابطه با

سویفت نشان داد هنگامی که رابطه ۲-۵ برفرار باشد میتوان در انتظار ناز ک شدگی پخشی ٔ بود. این رابطه ب دقت قابل قبولی سمت راست FLD را بهدست خواهد داد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Forming Limit Diagram (FLD)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Major strain

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Minor strain

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Diffuse necking



شکل ۳-۳ منحنی حد شکلدهی با معیار هیل-سوئیفت برای لوله مسی باز پخت شده به ازای n=0.4

ج) خصوصیات لاستیک به منظور تعیین خواص مکانیکی ابزار الاستومری، رفتار هایپرالاستیک<sup>۱</sup> پلیاورتان با مدل انرژی کرنشی مونی-ریولین تعریف شد. ضرایب مورد استفاده در شبیهسازی برای لاستیک پلیاورتان در جدول ۳-۲ نشان داده شده است.

چگالی (kg/mm <sup>3</sup> )	ضريب پواسون	C <sub>01</sub> (MPa)	C <sub>10</sub> (MPa)	سختی لاستیک (Shore-A)
		•/•٧۶	•/٣•٢	۵۰
۲×۱۰ <sup>-۶</sup>	•/499	•/184	• /٧٣۶	٧٠
	-	•/٧•۶	۲/۸۲۴	٩٠

جدول ۳-۲ خواص مکانیکی لاستیک پلی اورتان با سختی های متفاوت [۴۴]

تابع انرژی کرنشی<sup>۲</sup> W را میتوان توسط تابعی بر حسب ثوابت تانسور تغییر شکل  $I_1$ ،  $I_2$  و  $I_3$  بیان نمود. اگر از تانسور کوشی-گرین چپ<sup>۳</sup> B بهعنوان تانسور تغییر شکل استفاده شود، ثوابت تغییر شکل را میتوان توسط ترمهای کشش اصلی<sup>۴</sup> (i = 1,2,3) مطابق با رابطه ۳-۶ بیان کرد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Hyperelastic

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Strain energy function

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Left Cauchy-Green tensor

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Principal stretches

$$\begin{split} I_{1} &= \mathrm{tr}B = \lambda_{1}^{2} + \lambda_{2}^{2} + \lambda_{3}^{2} \\ I_{2} &= \frac{1}{2} \{ (\mathrm{tr}B)^{2} - \mathrm{tr}(BB) \} = (\lambda_{1}\lambda_{2})^{2} + (\lambda_{2}\lambda_{3})^{2} + (\lambda_{3}\lambda_{1})^{2} \\ I_{3} &= \mathrm{det}(B) = J^{2} = (\lambda_{1}\lambda_{2}\lambda_{3})^{2} \\ \mathfrak{l}_{3} &= \mathrm{det}(B) = J^{2} = (\lambda_{1}\lambda_{2}\lambda_{3})^{2} \\ \mathfrak{l}_{4} &= W(I_{1}, I_{2}) \\ \mathbb{W} = W(I_{1}, I_{2}) \\ \mathbb{W} = W(I_{1}, I_{2}) \\ \mathbb{W} = \mathcal{U}(I_{1}, I_{2}) \\ \mathbb{W} = \mathcal{U}(I_$$

$$W^{M} = C_{10}(\overline{I_{1}} - 3) + C_{01}(\overline{I_{2}} - 3)$$
  
که در این رابطه  $W^{M}$  انرژی کرنشی در واحد کسر حجمی اولیه،  $C_{10}$  و  $C_{00}$  دو پارامتر و  $\overline{I_{1}}$  و  $\overline{I_{2}}$  ثوابت اول و  
دوم تانسور کرنش انحرافی<sup>۱</sup> میباشند که توسط ترمهای کشش اصلی انحرافی  $\overline{\lambda_{i}}$  و در قالب رابطه ۳-۹ تعریف  
میشوند.

$$\begin{split} \bar{I_1} &= \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \\ \bar{I_1} &= \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)} \\ &+ \bar{\lambda}_3^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)} \\ &+ \bar{\lambda}_3^{(-2)}$$

$$\lambda_1 = \lambda$$
 ;  $\lambda_1 = \lambda_1 = \lambda^{-0.5}$  ;  $\lambda = 1 + \varepsilon_1$  (۱۰-۳)  
ثوابت کرنش در آزمون تکمحوری در قالب رابطه ۱۱-۳ تعیین می شود.

$$\bar{I}_1 = I_1 = \lambda^2 + 2\lambda^{-1};$$
  $\bar{I}_2 = I_2 = \lambda^{-2} + 2\lambda$  (1)- $\tilde{r}$ 

<sup>4</sup> Deviatoric

با استفاده از پتانسیل انرژی کرنشی میتوان وابستگی بین تنش اسمی و تابعی از کرنش را تعیین نمود که برای مدل مونی-ریولین رابطه ۳-۱۲ حاصل میشود.

$$\frac{P}{A_0} = 2\left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right)(\lambda C_{10} + C_{01}) = 2\left\{\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right)C_{10} + \left(1 - \frac{1}{\lambda^3}C_{01}\right)\right\}$$
(1) T-T

در رابطه بالا P نیروی محوری خارجی در آزمون،  $A_0$  سطح مقطع اولیه و  $\lambda$  نسبت کشش ٔ میباشد که از رابطه P - ۱۳-۳ تعیین می شود.

$$\lambda = \frac{h}{h_0} \tag{17-7}$$

$$C = \frac{P}{2A_0(1-\frac{1}{\lambda^3})} = \lambda C_{10} + C_{01}$$
 (۱۴-۳)  
همانگونه که مشاهده میشود تابع  $C$  یک تابع خطی بر حسب  $\lambda$  است که شیب آن برابر  $C_{10}$  و عرض از مبدأ  
آن  $C_{01}$  میباشد.

د) مونتاژ اجزای قالب
در این بخش تمامی مدلهای هندسی که به صورت جداگانه ایجاد شدهاند، باید در موقعیت مناسبی نسبت
به هم قرار گیرند تا هندسه یکلی فرایند شکل یابد. شکل ۳-۴ نحوه استقرار اجزای فرایند را نشان می دهد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Stretch ratio



شکل ۳-۴ مونتاژ اجزای قالب و لوله در شبیه سازی

ه) تعیین تعداد مراحل و نوع حل مسئله در این مدلسازی، مسأله در یک گام حل میشود. با توجه به تغییر شکل زیاد ماده و شرایط پیچیده تماسی، از حلگر صریح دینامیکی استفاده شد. زمان گام حل برابر یک ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین دقت شد تا مقدار انرژی جنبشی تغییر شکل از یک درصد مجموع انرژی درونی شکلدهی تجاوز نکند تا آنکه طبیعت شبهاستاتیکی مسأله حفظ گردد. شکل ۳-۵ که نسبت انرژی جنبشی به انرژی درونی را نشان میدهد این موضوع را تأیید میکند.



شکل ۳-۵ منحنی نسبت انرژی جنبشی به انرژی درونی در شبیهسازی فرایند RPF

و) تعیین نوع تماس سطوح اجزاء با هم در این پژوهش، اثر متقابل سطوح به صورت تماس عمومی انتخاب شد. شرایط تماس نیز از نوع مکانیکی با رفتار مماسی و با مدل اصطکاک پنالتی تعیین شد که در آن برهم کنش بین سنبه و قالب در نظر گرفته نشده است.

ز) شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی به کار رفته در این مدلسازی بر سه دسته تقسیم می شود. دسته اول مربوط به قیدهای تقارن می اشرایط مرزی به کار رفته در این مدلسازی بو لوله اعمال شده است. قید دسته ی دوم از نوع بدون حرکت به نقطه مرجع قالب نسبت داده شده است. در نهایت به منظور فراهم نمودن نیروی شکل دهی، قید جابه جایی به نقطه مرجع سنبه اعمال شده است. شکل ۳-۶ شرایط مرزی اعمال شده در شبیه سازی را نشان می دهد.



شکل ۳-۶ شرایط مرزی اعمال شده در شبیه سازی

#### ح) شبکهبندی

برای شبکهبندی قالب و سنبه، المان از نوع R3D4 که نماینده المان صلب سهبعدی با تعداد چهار گره<sup>۱</sup> است؛ استفاده شده است. المان به کار رفته در لوله نیز از نوع S4R میباشد که یک المان از نوع پوستهای چهار گرهای با انتگرال گیری کاهشیافته<sup>۲</sup> است. برای سایر اجزاء شامل لاستیکها و صفحهی واسط از المان نوع R3D8R که المانی پیوسته، سهبعدی، هشت گرهای و با انتگرال گیری کاهشیافته میباشد؛ انتخاب گردید.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 4-node 3D rigid

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 4-node shell, reduced integration

ط) آنالیز استقلال نتایج از شبکهبندی همانطور که پیشتر نیز بیان شد، تعداد المانها تأثیر به سزایی در حل مسائل المان محدود دارند. در این پژوهش برای تعیین تعداد المانهای بهینه، مسأله با تعداد المانهای متفاوتی حل گردید و نیروی فرایند در هر یک از شبیه سازی ها مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با شکل ۳-۷ و ۳-۸ مشاهده گردید که اگر تعداد المانها از حدی فراتر رود تأثیر چندانی در نیروی کل فرایند نخواهد داشت و همچنین زمان تحلیل را افزایش می دهد. بر این اساس تعداد المان بهینه برابر با ۲۴۲۱۵ تعیین گردید.





شکل ۳-۸ منحنی نیروی فرایند بر حسب زمان برای تعداد المان های متفاوت

ی) تحلیل فرایند تحلیلهای این مدلسازی با استفاده از یک رایانه با پردازنده شش هستهای ۳/۵ گیگاهرتزی انجام شد و زمان تقریبی حل برای هر شبیهسازی در حدود ۸ ساعت بوده است.

# ۳-۳- طراحی آزمایش

بهعنوان حقیقتی انکارناپذیر، صنعت به اهمیت روزافزون کیفیت پی برده است. امروزه کیفیت بهعنوان یک راهحل تجاری برای افزایش سهم بازار مطرح است و سازمانها با بهکارگیری آزمایشهای طراحی شده به کیفیت جهانی دست مییابند. طراحی آزمایشها یکی از کارآمدترین روشهای بهبود کیفیت و افزایش بهرهوری است. در این روش از طریق انجام برخی آزمایشها، تغییراتی آگاهانه در فرایند یا سیستم اعمال میشود تا تأثیر آنها در ویژگیهای عملکردی سیستم یا پاسخ فرایند، مورد بررسی قرار گیرد.

روش تعریف و تحقیق تمامی شرایط ممکن در یک آزمایش شامل چند عامل، بهعنوان طراحی آزمایش شناخته شده است. این روش در آثار علمی بهعنوان طراحی عاملی نیز معرفی گردیده است. مفهوم طراحی آزمایش حدود نیم قرن پیش، زمانی که فیشر آزمایش هایی در زمینه کشاورزی انجام می داد، به کار گرفته شد. فیشر آزمایشهایی به منظور عملیات بهینه بر روی زمین کشاورزی برای بهدست آوردن بیشترین محصول را با موفقیت طراحی کرد [۴۶].

بهطور کلی، آزمایشها بهمنظور بررسی عملکرد فرایندها و سیستمها استفاده میشود. فرایند یا سیستم را میتوان با مدل ارائه شده در طرحواره شکل ۳-۹ نشان داد. معمولاً یک فرایند را میتوان ترکیبی از عملیات، ماشینها، روشها، افراد و منابعی دیگر تصور کرد که در آن برخی ورودی (اغلب مواد) به یک خروجی شامل یک یا چند متغیر پاسخ<sup>۱</sup> قابل مشاهده تبدیل میشود. برخی از متغیرهای فرایند و خواص مکانیکی مواد شامل یک یا چند متغیر پاسخ<sup>۱</sup> قابل مشاهده تبدیل میشود. برخی از متغیرهای فرایند و خواص مکانیکی مواد شامل هدف از آزمایش ممکن است شامل موارد زیر باشد:

> الف) تعیین متغیری که بیشترین تأثیر را بر روی پاسخ y دارد. ب) مقادیر xهای تأثیر گذار به گونهای انتخاب شوند که:

- . همواره به مقدار نامی مطلوب نزدیک باشد. y
  - تغییرات در y کوچک باشد.
- اثرات متغیرهای غیرقابل کنترل z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub>, ..., z<sub>p</sub> کمینه شود.

همان گونه که ذکر گردید، آزمایشها اغلب شامل چندین عامل هستند. معمولاً، هدف آزمایش گر تعیین نمودن تأثیر این عاملها برروی پاسخ خروجی سیستم میباشد. روش کلی برای برنامهریزی و مدیریت آزمایش را استراتژی آزمایش مینامند [۴۷].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Response variables



شکل ۳-۹ طرح کلی یک فرایند یا سیستم

## ۳-۳-۱ فلسفه تاگوچی

پس از جنگ جهانی دوم، دولتهای متفقین دریافتند که کیفیت سیستم تلفن ژاپنی به شدت ضعیف بوده و بهطور کلی برای اهداف ارتباطی طولانی مدت مناسب نیست. برای بهبود سیستم، متفقین پیشنهاد کردند که ژاپن مراکز تحقیقاتی مشابه با آزمایشگاه بل واقع در ایالات متحده را بهمنظور پیشرفت سیستمهای ارتباطی تأسیس کند. ژاپنیها آزمایشگاههای ارتباط الکتریکی<sup>۱</sup> را با مسؤلیت دکتر تاگوچی با هدف بهرهوری تحقیق و توسعه<sup>۲</sup> و همچنین افزایش کیفیت محصول ایجاد کردند. ایشان مشاهده نمود که بخش عظیمی از وقت و سرمایه صرف آزمایشهای مهندسی میشود و تأکید کمی بر روی روش طوفان فکری خلاق<sup>۳</sup> برای به حداقل رساندن هزینههای منابع وجود داشت. تاگوچی شروع به توسعه روشهای جدیدی بهمنظور بهینهسازی فرایند آزمایشهای مهندسی نمود. ایشان روشهایی را گسترش داد که اکنون با نام روشهای تاگوچی شناخته شده است. سهم فراوان وی در فرمول بندی ریاضی طراحی آزمایش قابل انکار نیست، اما نسبتاً همراه با فلسفه آن میباشد. رویکرد ایشان فراتر از یک روش طراحی آزمایشها است. کار ایشان مفهومی از یک انضباط بهبود کیفیت یکتا و قدرتمند ارائه کرد که با روشهای سنتی متفاوت است [۶].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Electrical Communication Laboratories (ECL)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Research and development (R&D)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Creative brainstorming

## ۳-۳-۲ کیفیت و تابع زیان

روش تاگوچی نسبت به روش های متداول و رایج مهندسی کیفیت کاملاً متفاوت است. روش تاگوچی بر طراحی کیفیت در هنگام طراحی محصولات و فرایندها تأکید دارد، درحالی که روش های متداول بر مبنای بازرسی و کنترل کیفیت در حین فرایند تولید و یا بعد از تولید محصول میباشند. فلسفه تاگوچی در سه مفهوم اصلی و ساده بنا نهاده شده است:

- کیفیت باید هنگام طراحی محصول نهادینه شود، نه اینکه در طی فرایند ساخت محصول بررسی شود.
  - محصول باید طوری طراحی گردد که در برابر عوامل محیطی غیرقابل کنترل ایمن باشد.
- هزینه کیفیت باید به صورت تابع انحراف از حالت استاندارد اندازه گیری شده و ضرر و زیانها در عرض سیستم گنجانده شود.

تاگوچی بر این باور بود که بهترین راه بهبود کیفیت، طراحی و ایجاد آن در خود محصول است و بر این اساس کیفیت را زیانی تعریف میکند که از لحظه حمل محصول، به جامعه منتقل میشود. تابع زیان تاگوچی در مقابل روشهای متداول و قدیمی در طرحواره شکل ۲۰۰۳ نشان داده شده است. به طور طبیعی، یک محصول زمانی از دیدگاه کارکرد مورد تأیید و دارای کیفیت است که مقدار پارامتر هدف در بازهی حد قابل قبول بالایی<sup>۲</sup> و پایینی<sup>۳</sup> قرار گیرد. در دیدگاه سنتی، ضرر و زیان در ناحیه هاشورخورده میباشد. در این منطقه ۱۰۰٪ ضرر و زیان کاری رخ داده و محصول یا دور انداخته میشود و یا در معرض عملیات بازیابی قرار میگیرد. اما طبق روش تاگوچی هنگامی که پارامتر طراحی از مقدار بهینه خود منحرف میشود، زیان بهصورت تدریجی و با شیب کم شروع به انحراف می کند. از اینرو تاگوچی پیشنهاد کرد تابع ضرر و زیان بهصورت انحراف از مقدار ایده آل اندازه گیری شود. در مقابل تمامی تعاریف قبلی که به تولیدکننده مربوط میشود، تعریف تاگوچی بهطور واضح

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Quality and loss function

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Upper Allowable Limit (UAL)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Lower Allowable Limit (LAL)



شکل ۳-۱۰ طرحواره تابع زیان سنتی و روش تاگوچی

تابع زیان برای حالتهای اسمی-بهتر<sup>۱</sup>، کوچکتر-بهتر<sup>۲</sup> و بزرگتر-بهتر<sup>۳</sup> استفاده می شود که در ادامه به هر یک از آنها پرداخته خواهد شد.

## الف) حالت اسمى-بهتر

از حالت اسمی-بهتر زمانی استفاده میشود که هدف دستیابی به مقدار مشخصی باشد. در این حالت معمولاً حدود مشخصی در هر دو سمت هدف وجود دارد. برای مثال ضخامت ورق، ارتفاع یک قطعه و جریان خروجی مقاومت در یک ولتاژ ورودی مشخص، نمونههایی از حالت اسمی-بهتر بهشمار میروند.

در این حالت تابع زیان برای یک محصول به صورت معادله ۳-۱۵ تعریف می شود.

$$L = k \; (y-m)^2$$
  
که در آن  $L$  تابع زیان،  $y$  مقدار خروجی،  $m$  مقدار هدف و  $k$  ضریبی است که در ادامه تعریف خواهد شد. برای  
محصولی با مقدار هدف  $m$ ، محدوده قابل قبولی به اندازه  $\Delta_0$  وجود دارد که بهازای مقادیر پاسخ  $\Delta_0 \pm m$  زیانی  
به اندازه  $\Lambda_0$  رخ میدهد. در این حالت روابط ۳-۱۶ تا ۳-۱۸ برقرار است.

$$y = m \pm \Delta_0 \tag{19-1}$$

$$A_0 = k(m \pm \Delta_0 - m)^2 \tag{1V-Y}$$

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Nominal-the-best

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Smaller-the-better

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Larger-the-better

$$k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \tag{1A-Y}$$

. برای تعداد n محصول، با مقادیر خروجی  $y_1, y_2, \dots, y_n$  ، رابطه ۲–۱۹ به کار می رود.

$$L = \frac{k(y_1 - m)^2 + k(y_2 - m)^2 + \dots + k(y_n - m)^2}{n}$$
(19-7)

در اغلب موارد، کیفیت تمامی قطعات مورد بررسی قرار می گیرد. به همین منظور، از انحراف مربع میانگین<sup>۱</sup> استفاده می شود که به صورت رابطه ۳-۲۰ قابل بیان است.

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - m)^2$$
 (۲۰-۳)  
با ترکیب روابط ۳–۱۹ و ۳-۲۰ می توان تابع زیان را به صورت رابطه ۲۱-۳ بازنویسی کرد.  
 $L = k(MSD)$  (۲۱-۳)

طبق روابط گفته شده، تاگوچی دور شدن از مقدار هدف را با یک تابع زیان درجه دو بیان نمود. در این تابع که برای حالت اسمی-بهتر در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است، اگر پاسخ خروجی برابر با مقدار هدف باشد، زیان برابر با صفر بوده و هرگاه مقدار پاسخ به اندازه  $\Delta_0$  از مقدار هدف بیشتر یا کمتر شود، سبب زیانی به اندازه  $A_0$  می شود. هر چه مقدار انحراف از هدف بیشتر باشد، زیان با تابع درجه دو افزایش می یابد.



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Mean-Squared Deviation (MSD)

#### ب) حالت کوچکتر-بهتر

پاسخ خروجی از نوع کوچکتر-بهتر در مواردی به کار میرود که هدف حداقل نمودن پاسخ میباشد. در این حالت پاسخ ایده آل صفر است. سایش سطح قطعه، میزان نوسان صدایی موتور، آلودگی هوا و هدر رفتن حرارت مثالهای از حالت کوچکتر-بهتر میباشد. باید به این نکته توجه داشت که نمونههای بیان شده اگرچه در سیستم وجود دارند ولی مطلوب نیستند و بنابراین باید تا حد امکان آنها را کاهش داد. تابع زیان برای حالت کوچکتر-بهتر در روابط ۳-۲۲ و ۳-۲۳ بیان گردیده است.

$$L = ky^2$$
;  $k = \frac{A_0}{y_0^2}$  (17-7)

$$L = k(MSD) ; \qquad MSD = \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i^2}{n}$$
 (TT-T

که در آن  $y_0$  محدوده مجازی<sup>۱</sup> میباشد که در آن زیان بهاندازه  $A_0$  رخ میدهد.

تابع زیان تاگوچی برای حالت کوچکتر-بهتر در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۲ تابع زیان تاگوچی برای حالت کوچکتر-بهتر

ج) حالت بزرگتر –بهتر

خروجی از نوع بزگتر-بهتر برای حالتی به کار میرود که هدف حداکثر رساندن نتیجه باشد و پاسخ ایدهآل در این موارد برابر با بینهایت است. استحکام مواد و بازده سوخت نمونههایی از پاسخ نوع بزرگتر-بهتر میباشند. پاسخهایی که با درصد بیان میشوند، اگرچه به نظر میرسد که از نوع بزرگتر-بهتر باشد، ولی در این گروه قرار

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Tolerance

نمی گیرد، زیرا در این حالت پاسخ ایده آل برابر با ۱۰۰٪ است و بینهایت نیست. برای این حالت تابع زیان مطابق با روابط ۳-۲۴ و ۳-۲۵ قابل محاسبه است.

$$L = k \frac{1}{y^2} ; \qquad \qquad k = A_0 y_0^2 \tag{(1)}$$

$$L = k(MSD)$$
;  $MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2}$  (Ya-Y

شکل ۳-۱۳ تابع زیان را برای حالت بزرگتر-بهتر نشان میدهد. همان گونه که مشاهده میشود هر چه مقدار پاسخ به صفر نزدیک شود، مقدار زیان با تابع درجه دو افزایش مییابد.



شکل ۳-۱۳ تابع زیان تاگوچی برای حالت بزرگتر-بهتر

۳–۳–۳ نسبت سیگنال به نویز

در هنگام مطالعه و تحقیق برروی یک محصول در طراحی آزمایش، عامل سیگنالی وجود دارد که تغییرات مطلوبی ایجاد میکند. با این وجود، هنگامی که یک آزمایش اجرا میگردد، عاملهای خارجی فراوان کنترل نشدهای وجود دارند که نتیجه را تحت تأثیر قرار میدهند. این عاملهای خارجی، عامل نویز نامیده میشوند. نسبت سیگنال به نویز، حساسیت عاملهای مطلوب به عاملهای غیرقابل کنترل را ارزیابی میکند. همواره هدف بسیاری از آزمایشها دستیابی به بیشترین نسبت ممکن *N/* برای پاسخ فرایند است. مقدار بالای *S/N* به این معنی است که تأثیر سیگنال بسیار بیشتر از اثرات تصادفی عاملهای نویز میباشد. طراحی محصول

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Signal to Noise (S/N)

یا انجام فرایند مطابق با بیشترین *S/N،* همواره موجب کیفیت بهینه بههمراه کمترین واریانس میباشد. نسبت سیگنال به نویز از رابطه ۳-۲۶ قابل محاسبه است.

- با استفاده از این روش می توان سطح بهینه بر مبنای حداقل تغییرات اطراف هدف و همچنین
   نزدیک ترین مقدار میانگین به هدف را انتخاب کرد.
- مقایسه واقعی بین دو گروه از اطلاعات آزمایش را با توجه به تغییرات اطراف هدف و انحراف
   میانگین از مقدار هدف انجام میدهد.

# ۳-۳-۴ طراحی آزمایش تاگوچی در پژوهش حاضر

در فرایند شکلدهی اتصال تی شکل با ابزار الاستومری به همراه فشار ثانوی، هشت عامل کنترلی سه سطحی شامل سختی لاستیک، اصطکاک بین لاستیک و لوله، فاصله زبانه سنبه از لبه لوله، ارتفاع لاستیک اصلی، ارتفاع لاستیک ثانوی، قطر سوراخ کنترل فشار ثانوی، شعاع گوشه قالب و ضخامت لوله مشخص گردید. بدیهی است که اصطکاک کم بین لوله و قالب سبب جریان یافتن آسان دیواره لوله شده و درنتیجه باعث افزایش شکل پذیری و بهبود فرایند خواهد شد، لذا در طراحی آزمایش از این عامل صرف نظر شده است. این عوامل کنترلی و سطوح مختلف در جدول ۳-۳ و طرحواره فرایند در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.

سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	عامل	نماد
٩٠	٧٠	۵۰	سختی لاستیک (Shore-A)	А
۱۵	١.	۵	فاصله زبانه سنبه از لبه لوله (mm)	L <sub>1</sub>
14.	13.	17.	ارتفاع لاستیک اصلی (mm)	L <sub>2</sub>
40	۳۵	۲۵	ارتفاع لاستیک ثانوی (mm)	L <sub>3</sub>
۲/۵	۵	۲/۵	شعاع گوشه قالب (mm)	R <sub>c</sub>
۱۵	١.	۵	قطر سوراخ کنترل فشار ثانوی (mm)	$2R_h$
۰/۲۵	• / ١	•/•۵	اصطکاک بین لاستیک و لوله	μ
٢	١/۵	١	ضخامت لوله (mm)	t

جدول ۳-۳ متغیرهای کنترلی به همراه سطوح آنها



شکل ۳-۱۴ طرحواره فرایند شکلدهی با ابزار الاستومری بههمراه فشار ثانوی

اگر برای انجام آزمایش در نظر گرفته شده در این پژوهش از روش عاملی کامل استفاده شود، طبق رابطه ۳-۲۷ باید ۶۵۶۱ شبیهسازی اجرا گردد که نیازمند صرف زمانی طولانی است.

$$N=T^m$$
  
که در این رابطه  $N$  تعداد آزمایشهای لازم،  $T$  تعداد سطوح و  $m$  تعداد عوامل میباشند.

از این رو با توجه به زیاد بودن تعداد متغیرهای مؤثر در فرایند، از روش تحلیل آزمایش تاگوچی و با استفاده از نرمافزار Minitab 16 برای طراحی آزمونها استفاده شد. بر این اساس، آزمایش با آرایه متعامد L27 مطابق با جدول ۳-۴ که شامل ۲۷ آزمایش میباشد، طراحی و شبیهسازی تمامی آنها انجام گرفت.

t	μ	$2R_h$	R <sub>c</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>1</sub>	A	آزمون	t	μ	$2R_h$	R <sub>c</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>1</sub>	A	آزمون
١	٢	١	٣	١	٣	٢	٢	۱۵	١	۱	١	١	١	١	١	١	١
٣	٣	۲	١	٢	١	٣	٢	18	٢	٢	٢	٢	١	١	١	١	٢
١	١	٣	٢	٢	١	٣	٢	۱۷	٣	٣	٣	٣	١	١	١	١	٣
٢	٢	١	٣	٢	١	٣	۲	۱۸	٢	١	١	١	٢	٢	٢	١	۴
١	٢	٣	١	٢	٣	١	٣	١٩	٣	٢	۲	٢	٢	٢	٢	١	۵
٢	٣	١	٢	٢	٣	١	٣	۲.	١	٣	٣	٣	٢	٢	٢	١	۶
٣	١	۲	٣	٢	٣	١	٣	۲۱	٣	١	١	١	٣	٣	٣	١	γ
٢	٢	٣	١	٣	١	٢	٣	77	١	٢	۲	٢	٣	٣	٣	١	٨
٣	٣	١	٢	٣	١	٢	٣	۲۳	٢	٣	٣	٣	٣	٣	٣	١	٩
١	١	٢	٣	٣	١	٢	٣	74	١	٣	٢	١	٣	٢	١	٢	١٠
٣	٢	٣	١	١	٢	٣	٣	۲۵	٢	١	٣	٢	٣	٢	١	٢	۱۱
١	٣	١	٢	١	٢	٣	٣	79	٣	٢	١	٣	٣	٢	١	٢	17
٢	١	٢	٣	١	٢	٣	٣	۲۷	٢	٣	٢	١	١	٣	٢	۲	۱۳
									٣	۱	٣	٢	١	٣	٢	٢	14

جدول ۳-۴ ماتریس متعامد L27 طراحی آزمایش تاگوچی

اعدادی که در جدول بالا قرار دارند، نشان دهنده سطوح هر یک از عوامل در آزمایش مربوطه میباشند. به عنوان مثال در شبیهسازی اول که همه عوامل در سطح یک قرار دارند؛ لاستیک با سختی A· Shore-A، فاصله زبانه سنبه از لبه لوله mm ۵، ارتفاع لاستیک اصلی ۱۲۰ mm، ارتفاع لاستیک ثانوی ۲۵ mm، شعاع گوشه

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Orthogonal array
قالب mm ۲/۵ mm، قطر سوراخ کنترل فشار ثانوی mm ۵، اصطکاک بین لاستیک و لوله ۰/۰۵ و ضخامت لوله ۱ mm در نظر گرفته می شود.

### ۳-۴- روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ، مجموعهای از تکنیکهای مفید ریاضی و آماری برای مدلسازی، تجزیه و تحلیل مسائل است که در آن یک پاسخ مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار دارد و هدف بهینهسازی این پاسخ میباشد. به عنوان نمونه پیدا کردن سطوح درجه حرارت (x1) و فشار (x2) که در آن بیشترین عملکرد (y) فرایند حاصل گردد. عملکرد فرایند، تابعی از دما و فشار است که طبق رابطه ۳-۲۸ بیان میشود.

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon$$
  
که در آن  $f$  نشاندهنده نویز یا خطای مشاهده شده در پاسخ  $y$  میباشد. اگر پاسخ مورد انتظار با رابطه ۳-۲۹  
مشخص شود، آنگاه رویهی ارائه شده توسط رابطه ۳-۳۰ سطح پاسخ نامیده میشود.

$$E(y) = f(x_1, x_2) = \eta \tag{79-7}$$

$$\eta = f(x_1, x_2) \tag{(7.-7)}$$

 $x_1$  معمولاً سطح پاسخ به صورت گرافیکی مانند آنچه در شکل ۳-۱۵ (الف) برای ترسیم  $\eta$  در مقایسه با سطوح  $x_1$ و  $x_2$  نشان داده شده است، ارائه می گردد. برای کمک به مجسم کردن شکل یک سطح پاسخ، اغلب نمای آن مطابق با شکل ۳-۱۵ (ب) رسم می شود. در طرح نمایی، خطوط پاسخ ثابت در صفحه ی $x_1$  و  $x_2$  ترسیم می شود که هر خط مطابق با ارتفاع خاصی از سطح پاسخ می باشد.



شکل ۳-۱۵ سطح پاسخ، الف) سهبعدی، ب) نمای دوبعدی [۴۷]

در بسیاری از مسائل RSM، رابطه بین پاسخ و متغیرهای مستقل ناشناخته است. بنابراین اولین گام در RSM، یافتن تخمین مناسب برای رابطه تابعی صحیح<sup>۱</sup> بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل است. معمولاً از یک چندجملهای با درجه پایین در برخی از نواحی متغیرهای مستقل استفاده می شود. اگر بتوان پاسخ را به خوبی با تابع خطی بر حسب متغیرهای مستقل مدل کرد، آن گاه تابع تقریب<sup>۲</sup> مرتبه اول<sup>۳</sup> مطابق با رابطه ۳-۳۱ تعیین می گردد.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon$$
  
در این رابطه y تابع پاسخ،  $x_1$  تا  $x_k$  تا  $x_k$  متغیرهای مستقل،  $k$  تعداد متغیرهای مستقل،  $\beta_0$  تا  $\beta_k$  ضرایب ثابت  
مجهول هستند که از تحلیل بهدست میآیند و  $\epsilon$  خطای آماری است. اگر انحنایی در سیستم وجود داشته  
باشد، آنگاه باید چندجملهای با درجه بالاتر مانند مدل مرتبه دوم<sup>۴</sup> استفاده شود که طبق رابطه ۳-۳۲ محاسبه  
میگردد.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i< j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$
 (77-7)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> True functional relationship

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Approximating function

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> First-order

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Second-order model

در بیشتر مسائل RSM، از یک یا هر دو مدل بیان شده استفاده می شود. البته بعید است که یک مدل چندجملهای تقریب قابل قبولی برای رابطه تابعی صحیح در تمام فضای متغیرهای مستقل باشد، اما برای یک ناحیه نسبتاً کوچک معمولاً به خوبی کار می کند [۴۷].

۳-۴-۲ طراحی آزمایش با روش سطح پاسخ در پژوهش حاضر

در پژوهش حاضر، ابتدا طراحی آزمایش با روش تاگوچی مطابق با مطالب بیان شده در بخش ۳-۳-۴ طراحی و اجرا گردید. سپس به منظور بررسی دقیق تر، با توجه به نتایج به دست آمده از روش تاگوچی، از متغیرهایی که تأثیر اندکی بر فرایند داشتند، صرف نظر گردید و طراحی آزمایش با روش سطح پاسخ برای سایر عوامل با اثرگذاری بیشتر انجام شد. روش سطح پاسخ به طرحهای مختلفی مانند مرکب مرکزی<sup>۱</sup>، باکس بنکن<sup>۲</sup> و دهلرت<sup>۳</sup> تقسیم می شود. یکی از مهم ترین و کاربردی ترین آنها روش طرح مرکب مرکزی می باشد. این روش با در نظر گرفتن تعداد متغیرهای مستقل و محدوده آنها، می تواند ماتریس آزمون را طراحی کند. در این روش ۵ سطح مختلف برای هر متغیر مستقل ایجاد می شود. این عوامل و هر یک از سطوح آن در جدول ۳-۵ نشان داده شده است.

سطح ۲+	سطح ۱+	سطح •	سطح ۱–	سطح ۲-	عامل	نماد
٩٠	٨۵	٧٠	۶۵	۶.	سختی لاستیک (Shore-A)	A
١٢	٩	۶	٣	•	فاصله زبانه سنبه از لبه لوله (mm)	L <sub>1</sub>
۶	۵	k	٣	٢	شعاع گوشه قالب (mm)	R <sub>c</sub>
۲/۲۵	٢	١/٧۵	۱/۵	۱/۲۵	ضخامت لوله (mm)	t

### جدول ۳-۵ عوامل کنترلی و سطوح آنها در روش سطح پاسخ

آزمایشهای طراحی شده با روش سطح پاسخ توسط نرمافزار Minitab 16 در جدول ۳-۶ مشخص شده است. شبیهسازی تمامی آزمایشهای طراحی شده انجام و ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت (مشابه روش

- <sup>2</sup> Box-Behnken
- <sup>3</sup> Doehlert

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Central composite

تاگوچی) بهعنوان پاسخ اندازه گیری شد. اعدادی که در جدول ۳-۶ قرار دارند، نشان دهنده سطوح هر یک از عوامل در آزمایش مربوطه میباشند. به عنوان مثال در شبیهسازی اول که همه عوامل در سطح ۱- قرار دارند؛ لاستیک با سختی A-Shore ۵۶، فاصله زبانه سنبه از لبه لوله mm ۳، شعاع گوشه قالب mm ۳ و ضخامت لوله mm ۱/۵ سر نظر گرفته می شود.

t	R <sub>c</sub>	L <sub>1</sub>	Α	آزمون	t	R <sub>c</sub>	L <sub>1</sub>	А	آزمون
•	•	•	-۲	١٧	- 1	- 1	- 1	- 1	١
•	•	•	٢	١٨	- 1	- 1	- 1	١	٢
•	٠	-۲	٠	١٩	- 1	- 1	١	- 1	٣
٠	٠	٢	٠	۲.	- 1	- 1	١	١	۴
٠	-۲	٠	٠	۲۱	- 1	١	- 1	- 1	۵
٠	٢	٠	٠	22	- 1	١	- 1	١	۶
-۲	٠	٠	٠	۲۳	- 1	١	١	- 1	γ
٢	٠	٠	٠	74	- 1	١	١	١	٨
٠	•	٠	٠	۲۵	١	- 1	- 1	- 1	٩
٠	٠	٠	٠	78	١	- 1	- 1	١	١.
٠	•	٠	٠	۲۷	١	- 1	١	- 1	١١
٠	٠	٠	٠	۲۸	١	- 1	١	١	١٢
٠	٠	•	٠	۲۹	١	١	- 1	- 1	١٣
٠	٠	٠	٠	۳۰	١	١	- 1	١	14
٠	•	•	٠	۳۱	١	١	١	- 1	۱۵
					١	١	١	١	18

جدول ۳-۶ آزمایشهای طراحی شده به روش سطح پاسخ

## فصل ۴ نتایج و بحث

در این بخش، نخست نتایج حاصل از آزمونهای کشش تکمحوری و فشار لاستیکها مورد بررسی قرار گرفته و روابط تنش کرنش مناسب، محاسبه گردید. همچنین نتایج حاصل از طراحی آزمایشهای انجام شده بیان گردید و تأثیر هر یک از عوامل فرایند مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در پایان مدل شبیهسازی با نمونه اتصال تی شکل تولید شده در آزمایشگاه با روش RPF مقایسه گردید.

## ۴-۱-۴ نتایج آزمون تعیین خواص مکانیکی

۹-۱-۱ آزمون کشش تکمحوری با استفاده از دستگاه اینسترون شامل نیرو و جابجهجایی فکها اطلاعات خروجی از آزمون کشش تکمحوری با استفاده از دستگاه اینسترون شامل نیرو و جابجهجایی فکها میباشد که با تقسیم نیرو بر سطح مقطع و تعیین کرنش محدوده گیج، منحنی تنش-کرنش مهندسی محاسبه گردید. سپس با استفاده از روابط ۹-۱ و ۴-۲ منحنی تنش-کرنش حقیقی به دست آمد که در شکلهای ۴-۱ تا ۴-۳ نشان داده شده است. شکل ۴-۱ نمونهها را پس از انجام آزمون کشش نشان میدهد که ناحیه گلویی شدن در داخل ناحیه گیج میباشد در داخل ناحیه گیج میباشد.

$$\sigma = S(1+e) \tag{1-f}$$

$$\varepsilon = \ln(1+e) \tag{7-4}$$

که در آن o و ع بهترتیب تنش و کرنش حقیقی، S و e بهترتیب تنش و کرنش مهندسی میباشد.



شکل ۴-۱ منحنی تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم (قبل از بازپخت)



شکل ۲-۴ منحنی تنش-کرنش حقیقی برنج



 cm1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8
 9
 10
 11
 12
 13
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24

 Memoria Precious
 6
 7
 8
 9
 10
 11
 12
 13
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24

 Memoria Precious
 6
 7
 8
 9
 10
 11
 12
 13
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24

 Memoria Precious
 6
 7
 8
 9
 10
 11
 12
 13
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24

 Memoria Precious
 6
 7
 8
 7
 9
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24

 Memoria Precious
 6
 7
 8
 7
 19
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 20
 21
 20
 21
 24

شکل ۴-۳ منحنی تنش-کرنش حقیقی مس (قبل از بازپخت)

شکل ۴-۴ نمونه های حاصل از انجام آزمون کشش تکمحوری (قبل از باز پخت)

همانگونه که از شکلهای ۴-۱ و ۴-۳ مشخص است، لولههای آلومینیومی و مسی تهیهشده به علت کرنش شکست پایین و غیریکنواختی رفتار در نقاط مختلف لوله، خواص مکانیکی مناسبی برای فرایندهای شکلدهی ندارند. از این رو بهمنظور بهبود خواص مکانیکی، ساختاری همگنتر و افزایش شکلپذیری، عملیات بازپخت کامل انجام گرفت که منحنیهای تنش-کرنش حقیقی برای این لولهها در شکلهای ۴-۵ و ۴-۶، و همچنین نمونههای آزمون پس از کشش در شکل ۴-۷ قابل مشاهده است.



شكل ۴-۵ منحنى تنش-كرنش حقيقى آلومينيوم (بعد از بازپخت)





شکل ۴-۶ منحنی تنش-کرنش حقیقی مس (بعد از بازپخت)

شکل ۴-۷ نمونههای بازپختشده پس از انجام آزمون کشش

برای مقایسه بهتر خواص لولهها قبل و بعد از عملیات حرارتی، منحنیهای تنش-کرنش آنها در شکلهای ۴-۸ و ۴-۹ رسم شده است. بهخوبی مشاهده میشود که پس از عملیات حرارتی تنش تسلیم کاهش یافته و ناحیه تغییر شکل مومسان افزایش یافته است که در نتیجه آن شکلپذیری نیز افزایش مییابد.



شکل ۴-۸ مقایسه منحنیهای تنش-کرنش آلومینیوم قبل و بعد از بازپخت



شکل ۴-۹ مقایسه منحنیهای تنش-کرنش مس قبل و بعد از بازپخت

برای تمامی نمونههای آزمون کشش، تنش تسلیم مطابق با کرنش ۰۰/۰۰۲ تنش نهایی، درصد ازیاد طول و همچنین K و n ثوابت معادله توانی  $ar{\sigma} = Kar{arepsilon}^n$  محاسبه گردید که در جدولهای ۴–۱ تا ۴–۳ ارائه شده است.

نمای کار سختی n	ضریب کار سختی <i>K</i> (MPa)	ازدیاد طول (٪)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسليم (MPa)	شماره نمونه	جنس
-	_	$\Lambda/\Delta$	180/1	۹۴/۵	A1	( ) m. 1Ĩ
_	_	۶/۵	180/6	٨۵/۵	A2	الومينيوم (قبل از را: رخت)
_	_	-	-	٨٩/۵	A3	
•/7۴	222/1	۱۵	111/4	54/2	A.A1	
۰/۲۶	741/4	۱۴/۸	۱ • ۹/۷	۵۸/۸	A.A2	الومينيوم (بعد از با: بخت)
_	_	_	_	۶۰/۳	A.A3	(

جدول ۴-۱ خواص مکانیکی لوله آلومینیومی (قبل و بعد از بازپخت)

## جدول ۴-۲ خواص مکانیکی لوله مسی (قبل و بعد از بازپخت)

نمای کار سختی n	ضریب کار سختی <i>K</i> (MPa)	ازدیاد طول (٪)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسليم (MPa)	شماره نمونه	جنس
-	-	٣/٢	368/1	137/1	C1	
-	-	۲/٨	3189/4	107/4	C2	مس (قبل از بازپخت)
-	-	-	-	171/8	C3	-
٠/۴	۵۵۹/۸	۲۳/۲	227/9	۶۸/۳	A.C1	
_	_	_	_	۷۰/۵	A.C2	مس (بعد ار بارپخت) -

## جدول ۴-۳ خواص مكانيكي لوله برنجي

نمای کار سختی n	ضریب کار سختی <i>K</i> (MPa)	ازدیاد طول (٪)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسليم (MPa)	شماره نمونه	جنس
۰ /۳ ۱	881/1	۲۰/۶	31.4/2	۱۳۵/۸	B1	
۰ /۳ ۱	820/0	۱۹/۱	<b>T99/T</b>	۱۳۵	B2	برنج
-	_	_	_	١٣١	В3	

#### ۲-۱-۴ ضرایب ناهمسانگردی

به منظور تعیین ضریب ناهمسانگردی لولهی مسی، طول ناحیه گیج و عرض نمونه آزمون کشش در سه نقطه مطابق شکل ۴–۱۰، قبل و بعد از آزمون اندازه گیری شد. برای تعیین کرنش عرضی از میانگین اندازههای سه نقطه استفاده شد. اندازه گیریهای انجام شده و ضریب ناهمسانگردی در جدول ۴–۴ ارائه شده است.



شکل ۴-۱۰ نقاط مشخص شده برای اندازه گیری کرنشهای طولی و عرضی

ضریب ناهمسانگردی <i>R</i>	کرنش طولی <i>2</i> ا	کرنش عرضی ۶ <sub>w</sub>	اندازه بعد آزمون	اندازه قبل آزمون	نقاط
_	_	_	17/77	17/78	<i>w</i> <sub>1</sub>
_	_	_	17/74	17/74	W <sub>2</sub>
_	_	_	17/31	17/78	<i>W</i> <sub>3</sub>
•/8٣	_	-•/• TL	17/773	17/204	میانگین ( <sub>W1</sub> ، <sub>W2</sub> و W <sub>3</sub> )
,, ,	•/•९٩	_	۵۴/۷۹	49/82	l

جدول ۴-۴ دادههای آزمون کشش و تعیین ضریب ناهمسانگردی

#### ۴–۱–۳ آزمون فشار لاستیک

منحنی نیرو به جابهجایی و تنش-کرنش مواد الاستومری عموماً دارای حلقهی هیسترزیس<sup>۱</sup> میباشند که پس از چند مرحله بارگذاری سیکل به حالت اشباع میرسد. به همین جهت آزمون فشار بر روی لاستیک در چند

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Hysteresis loop

سیکل بارگذاری و باربرداری انجام شد که منحنی تنش-کرنش مربوط به PU و PVC در شکلهای ۴–۱۱ و ۴–۱۲ ارائه شده است.



شکل ۴-۱۱ منحنی تنش-کرنش فشاری پلیاورتان



شکل ۴-۱۲ منحنی تنش-کرنش فشاری PVC

مشاهده می شود که از سیکل دوم به بعد منحنی تنش-کرنش بر هم منطبق شده است. از این رو برای تعیین ثوابت مونی-ریولین که روابط آن در فصل دوم بیان شد، از رفتار ماده در سیکل بارگذاری دوم استفاده گردید. در شکل ۴-۱۳ منحنی  $\frac{P}{2A_0(1-\frac{1}{\lambda^3})} = C$  بر حسب  $\lambda$  در ناحیه خطی رسم شده است که طبق روابط گفته شده در شکل ۴-20 به ترتیب برابر با ۱/۰۴ و ۱۹۳۲ مگایاسکال می باشد.



 $\lambda$  شکل  $^{+}$  ۳-۴ منحنی C بر حسب

#### ۲-۴- نتایج تحلیل عددی

#### ۴–۲–۱ تحلیل تنش اجزای قالب

در این بخش، نتیجه حاصل از شبیهسازی قالب که با هدف بهدست آوردن میزان تنش ایجاد شده در اجزای قالب شکل دهی اتصال تی شکل انجام شده است؛ بیان می گردد. در شکل ۴-۱۴ توزیع تنش ون-میسز در اجزای مختلف قالب قابل مشاهده است. بر طبق این تحلیل مقدار تنش بیشینه در پیچ برابر با ۷۷۰ مگاپاسکال و در ناحیه شعاع قالب به میزان ۱۹۰ مگاپاسکال ایجاد شده است. با توجه به تنش تسلیم پیچ M12 گرید 12.9 و همچنین 150 VCN که به ترتیب برابر با ۱۰۸۰ مگاپاسکال و ۲۰۰ مگاپاسکال می باشد و مقدار تنش ایجاد شده در اجزای قالب، می توان از سلامت قالب مطمئن بود. همچنین به منظور تحمل فشار فرایند، اجزای قابل قبل از مرحله سنگزنی مورد عملیات سختکاری قرار گرفت.



شکل ۴-۴۴ توزیع تنش مؤثر ون-میسز در اجزای قالب طراحی شده بر حسب مگاپاسکال

۴-۲-۲ اثر پارامترهای فرایند RPF به روش تاگوچی
در این بخش نتایج حاصل از طراحی آزمایش به روش تاگوچی بیان می شود. برای نمونه شکل ۴-۱۵ مراحل
مختلف پیشرفت شبیه سازی بیستم در طراحی آزمون تاگوچی را در چهار مرحله تا پایان فرایند نشان می دهد.



شکل ۴-۱۵ توزیع فشار (بر حسب MPa) در مراحل مختلف شبیهسازی آزمون بیستم از طراحی آزمایش تاگوچی

پس از شبیهسازی آزمونهای طراحی شده، ارتفاع شاخه اتصال و درصد کاهش ضخامت برای هر آزمایش تعیین گردید. به عنوان نمونه اتصال تی شکل حاصل از شبیهسازی آزمایش بیستم در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. بدین منظور در لحظه شروع گلویی المانهای قسمتهایی از شاخه اتصال که به عنوان یک قطعه محصول باید برش داده شوند، حذف گردید (مطابق شکل ۴-۱۶–ب). سپس برای قسمت باقی مانده ارتفاع شاخه اتصال و درصد کاهش ضخامت اندازه گیری شد. ارتفاع شاخه اتصال و درصد کاهش ضخامت به عنوان عوامل کنترل کننده اتخاذ شد که به ترتیب بر اساس حالت بزر گتر-بهتر و کوچکتر-بهتر مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۴-۵ نتایج حاصل از شبیهسازیهای انجام گرفته بر اساس طراحی آزمایش تاگوچی را نشان

مىدھد.



شکل ۴-۱۶ نتایج توزیع ضخامت (بر حسب mm) حاصل از شبیهسازی آزمایش بیستم، الف) نتیجه شبیهسازی، ب) بعد از حذف المانهای اضافی

$\frac{\Delta t}{t}\%$	H (mm)	آزمون	$\frac{\Delta t}{t}\%$	H (mm)	آزمون
٣٣	۱/۹۰	۱۵	۳۸	$\chi/\chi\chi$	١
۴.	۲/۴۰	18	۳۳	٧/٢۴	٢
۳۶	•/ <b>\</b> •	١٧	١٣	۴/۷۵	٣
٣٣	١/٣٠	١٨	4.	۵/۵۰	۴
۳۵	٩/۴٢	١٩	١٩	۲/۶۰	۵
٣٣	1./4.	۲.	۳۸	۱/۵۰	۶
۲۵	۱۲/۰۰	71	۳۸	١/٩٠	γ
۴۵	۱۳/۶۰	77	74	•/87	٨
۴۳	۱۶/۵۰	۲۳	٣٣	•   ۶ •	٩
74	۲/۰۰	74	۲۸	۵/۵۰	١.
۳۵	٧/٨٠	۲۵	۲۰	۴/۷۷	) )
74	۶/۳۰	79	١٣	8/8 ·	١٢
٣٣	١/٣٧	۲۷	۴.	۶/٨٠	١٣
			۳۵	٧/۵٠	14

جدول ۴-۵ نتایج حاصل از طراحی آزمایش تاگوچی

به منظور بررسی نتایج حاصل از تأثیر عوامل فرایند بر توابع هدف، ابتدا باید کفایت مدل بررسی گردد. یکی از مهم ترین پیش فرض هایی که در انجام هر آزمایشی و در نهایت تحلیل واریانس باید برقرار باشد، نرمال بوده توزیع داده ها است. شکل ۴-۱۷ نمودار احتمال نرمال باقیمانده را برای ارتفاع شاخه نشان می دهد. در این نمودار هر چه نقاط به خط راست نزدیک تر باشند نشان دهنده این است که مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی به یکدیگر نزدیک هستند و مقدار خطای مدل کم است. مشاهده می شود خط راستی که از میان این نقاط رسم شده است تقریباً همه داده ها را پوشش داده و نرمال بودن داده ها قابل قبول است.



شکل ۴-۱۷ نمودار احتمال نرمال باقیمانده برای ارتفاع شاخه (بر اساس روش تاگوچی)

برای فرض برابری واریانسها از نمودار مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش استفاده می شود که این منحنی برای ارتفاع شاخه در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود تغییرات باقیمانده ها از روند خاصی پیروی نمی کنند و فرض برابری واریانس ها مورد تأیید است. شکل های ۴–۱۹ و ۴–۲۰ منحنی های احتمال نرمال باقیمانده و مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش را برای درصد کاهش ضخامت نشان می دهند.



شکل ۴-۱۸ نمودار مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش برای ارتفاع شاخه (بر اساس روش تاگوچی)



شکل ۴-۱۹ نمودار احتمال نرمال باقیمانده برای درصد کاهش ضخامت (بر اساس روش تاگوچی)



شکل ۴-۲۰ نمودار مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش برای درصد کاهش ضخامت (بر اساس روش تاگوچی)

پس از تأیید کفایت مدل با استفاده از منحنیهای ذکر شده، میتوان به بررسی اثرات متغیرهای فرایند بر روی عوامل هدف پرداخت. شکلهای ۴–۲۱ تا ۴–۲۴ تأثیر هر یک از متغیرهای فرایند و نمودارهای نسبت سیگنال به نویز بر ارتفاع شاخه اتصال و درصد کاهش ضخامت را نشان میدهد.



شکل ۴-۲۱ اثر متغیرهای فرایند بر ارتفاع شاخه



شکل ۴-۲۳ اثر متغیرهای فرایند بر درصد کاهش ضخامت



به کمک نمودارهای بیان شده به راحتی میتوان به نتایج مفید و ارزشمندی دست یافت. اما باید به این نکته توجه کرد که اطلاعات ارائه شده تنها در محدوده سطوح تعریف شده قابل استناد میباشند و در خارج این محدوده لزوماً روابط بالا برقرار نیست. برخی از مهمترین نتایج در ارتباط با ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت به شرح زیر میباشد.

- سختی لاستیک رابطه مستقیمی با ارتفاع شاخه تولید شده دارد. همچنین سختی لاستیک در سطوح بالاتر به مراتب سبب افزایش بیشتر طول شاخه اتصال می شود.
- کاهش فاصله زبانه سنبه از لبه لوله از یک سو باعث افزایش پیشروی محوری و درنتیجه کاهش نرخ نازک شدن لوله خواهد شد. این امر سبب بهبود شکل پذیری و افزایش ارتفاع شاخه می شود. البته باید به این نکته نیز توجه داشت که کاهش بیش از حد L<sub>1</sub> سبب تنشهای فشاری محوری بالا و درنتیجه چروکیدگی لوله خواهد شد.
- نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که افزایش شعاع گوشه قالب با تسهیل عبور جریان ماده از ناحیه تغییر شکل از ناز کشدگی بیش از حد لوله جلوگیری کرده و همچنین شاخه بلندتری نیز تولید

می شود. ولی از طرفی ناحیه گنبدی در انتهای شاخه افزایش مییابد که پس از برش این ناحیه در قطعه محصول، ارتفاع شاخه کوتاه تری نسبت به شعاع قالب کوچک ایجاد می شود.

- با افزایش ضخامت لوله، نرخ گلویی شدن موضعی و شکست کاهش یافته و شکلپذیری لوله افزایش مییابد؛ در نتیجه میتوان به طول شاخه بلندتری دست یافت. همچنین ناز کشدگی در قطعه حاصل کاهش مییابد.
  - سایر عوامل کنترلی تأثیر محسوسی بر ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت ندارند.

نتایج حاصل از تحلیل واریانس ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت مطابق با جدولهای ۴-۶ و ۴-۷ بهدست آمد. در تحلیلهای واریانس مقدار α در آزمون F برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده که بیانگر این است که در صورتیکه مقدار احتمال P در تحلیل واریانس کمتر از ۰/۰۵ باشد، پارامتر مربوطه با احتمال بالای ۹۵٪ مؤثر میباشد. از این رو عواملی با مقدار P-value کمتر تأثیر بیشتری بر تابع هدف دارند و بر این اساس می توان از اثر عواملی که P-value آنها از ۰/۰۵ بیشتر باشد صرف نظر کرد. مطابق با تحلیل انجام شده عامل سختی لاستیک با ۲۲/۷۹٪ دارای بیشترین تأثیر بر روی ارتفاع شاخه اتصال میباشد. پس از آن فاصله زبانه سنبه از لبه لوله، ضخامت و شعاع گوشه قالب به ترتیب با ۲۸/۵٪، ۱۵/۰۳٪ و ۱۰/۲٪ عوامل تأثیرگذار بعدی بودند که با نتایج حاصل از تحلیل سیگنال به نویز نیز مطابقت دارد. همچنین مطابق با جدول ۴-۷، شعاع گوشه قالب، فاصله بین زبانه سنبه از لبه لوله و ضخامت به ترتیب با ۲۵/۵٪، ۲۰/۵۲٪ و ۱۰/۲٪ بیشترین اثر را بر درصد کاهش ضخامت قطعه محصول دارند. مقدار ضریب دوربین-واتسون<sup>۱</sup> برای ارتفاع شاخه برابر با ۱۸/۵ و برای درصد کاهش ضخامت برابر با ۱۸/۴ حاصل شد که نشان از استقلال و عدم همبستگی عوامل با یکدیگر است. آزمون دوربین واتسون برای بررسی استقلال عوامل از یکدیگر است. اگر مقدار مودم میربین واتسون در بازه آزمون دوربین واتسون برای بررسی استقلال عوامل از یکدیگر است. اگر مقدار ضریب دوربین واتسون در بازه

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Durbin-Watson

درصد تأثير (P-effect)	مقدار P (P-value)	عدد فیشر (F)	میانگین مربعات (MS)	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (DF)	منبع (Source)
	•/•••٩	0/114	۴۱/۸	886/61	٨	مدل رگرسیونی
FT/V9	•/•••٣	۱٩/٩٠٣	142/•7	143/•7	١	А
۲۸/۵	•/••١٨	18/202	۹۵/۳۱	۹۵/۳۱	١	L <sub>1</sub>
•/•٣	•/9118	•/•17	•/•٩	•/•٩	١	L <sub>2</sub>
۰/۳۵	•/۶٩·V	•/19٣	)/)Y	١/١٧	١	L <sub>3</sub>
۱۰/۲	•/•479	4/740	344/11	34/11	١	R <sub>c</sub>
• / ۲ ۱	•/VQ97	•/•98	•/۶٩	• /۶٩	١	2R <sub>h</sub>
۲/۸۹	•/٢۶١٣	1/840	٩/۶٧	٩/۶٧	١	μ
۱۵/۰۳	•/•194	F/99T	۵۰/۲۶	۵۰/۲۶	١	t
۲/۱۵			٧/١٨	189/4	١٨	خطا
۱۰۰				483/11	78	مجموع

جدول ۴-۶ جدول تحليل واريانس براى ارتفاع شاخه

# جدول ۴-۲ جدول تحلیل واریانس برای درصد کاهش ضخامت

درصد تأثير (P-effect)	مقدار P (P-value)	عدد فیشر (F)	میانگین مربعات (MS)	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (DF)	منبع (Source)
	•/• 477	۲/۶۲۸	17•/47	१९४/४१	٨	مدل رگرسیونی
۶/۰۳	•/275	1/797	۵۸/۰۸	۵۸/۰۸	١	А
۳۵/۸۲	•/• ١٣٣	٧/۵٣٢	840/28	840/28	١	L <sub>1</sub>
۰/۴۵	•/४۶١٩	•/•9۴	۴/۳۳	۴/۳۳	١	L <sub>2</sub>
•/۲٨	۰/۸۱۰۲	•/•۵٩	۲/۷۲	۲/۷۲	١	L <sub>3</sub>
4.101	•/••٩١	٨/۵١٨	39./44	39.140	١	R <sub>c</sub>
۱/۱۳	•/8318	•/٣٣٧	۱۰/۸۸	۱۰/۸٩	١	2R <sub>h</sub>
٠/۴٩	•/V&TT	•/\•٢	4/21	4/21	١	μ
10/29	•/•从٩٨	37/214	147/84	147/30	١	t
۴/۷۶			۴۵/۸۳	140/04	١٨	خطا
۱۰۰				١٧٨٨/٨٣	78	مجموع

معادله رگرسیونی برای ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت بر اساس متغیرهای مورد بررسی در شکلدهی به صورت رابطههای ۴-۳ و ۴-۴ قابل بیان است.

$$\begin{split} H &= 263.281 - 0.5128 \times \text{A} + 0.9302 \times L_1 - 3.9531 \times L_2 + 0.0691 \times L_3 \\ &+ 2.6802 \times R_c - 0.3044 \times 2R_h - 50.4278 \times \mu + 3.2017 \times \text{t} \\ &+ 0.0046 \times \text{A}^2 - 0.0624 \times L_1^2 + 0.0153 \times L_2^2 - 0.0678 \times R_c^2 \\ &+ 151.741 \times \mu^2 - 0.0844 \times \text{t}^2 + 0.0087 \times \text{A} \times L_1 - 0.0530 \times \text{A} \\ &\times R_c + 0.1282 \times \text{A} \times \text{t} + 0.0779 \times L_1 \times R_c - 0.7604 \times \text{t} \times L_1 \end{split}$$

$$\begin{split} \frac{\Delta t}{t} \% &= 871.336 - 0.9032 \times A + 5.2389 \times L_1 - 12.4935 \times L_2 - 1333 \times L_3 \\ &+ 3.1333 \times R_c - 0.4 \times 2R_h - 170.833 \times \mu + 0.3055 \times t \\ &+ 0.0065 \times A^2 - 0.2189 \times L_1^2 + 0.0475 \times L_2^2 - 0.03851 \\ &\times R_c^2 + 533.951 \times \mu^2 - 13.9259 \times t^2 - 0.01889 \times A \times L_1 \\ &- 0.04889 \times A \times R_c + 0.3417 \times A \times t - 0.0637 \times L_1 \times R_c \\ &+ 1.1037 \times L_1 \times t \end{split}$$

میزان انطباق مدل با نتایج شبیهسازی با ضریب تعیین  $R^2$  بیان می شود که طبق رابطه ۴-۵ محاسبه می گردد.

$$R^{2} = \frac{\sum (y_{i} - \hat{y}_{i})^{2}}{\sum (y_{i} - \overline{y}_{i})^{2}} \tag{(a-f)}$$

که در آن  $y_i$  مقدار حاصل از آزمایش،  $\hat{y}_i$  مقدار پیشبینی شده توسط مدل و  $\overline{y}_i$  مقدار میانگین می باشد. مقدار  $R^2$  رابطه رگرسیونی تعیین شده برای ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت به ترتیب برابر با ۹۵/۰۵٪ و  $R^2$  رابطه رگرسیونی تعیین می دهند مدل تحلیل و رگرسیون از مقبولیت کافی برخوردار است.

به کمک نمودارهای سیگنال به نویز و تحلیل واریانس میتوان دریافت که عوامل سختی لاستیک، فاصله زبانه سنبه از لبه لوله، شعاع قالب و ضخامت تأثیر گذارترین عوامل بر روی توابع هدف بوده و از اینرو در مرحله بعد، بهینهسازی فرایند با این چهار عامل انجام شد.

## ۲-۴-۳ اثر پارامترهای فرایند RPF به روش سطح پاسخ

شبیهسازی فرایند RPF مطابق با آزمایشهای طراحی شده به روش سطح پاسخ که در فصل سوم بیان شد، انجام گردید که نتایج حاصل از آن در ۴-۸ ارائه شده است.

$\frac{\Delta t}{t}\%$	H (mm)	آزمون	$\frac{\Delta t}{t}\%$	H (mm)	آزمون
75	۶/۵	١٧	۲۵	۵/۹	١
٣٠	۱ • /۲	١٨	٣٠	٩/۴	٢
بل از پارگی	چروکیدگی ق	١٩	٣٩	٧	٣
۴۵	۶/۹	۲.	٣٧	٨/۶	۴
٢٢	۶/۱	۲۱	74	۶/۵	۵
۲۸	٨/۴	٢٢	٣١	٧/٨	۶
٣١	۶/٣	۲۳	۴۲	٨/۵	٧
78	٧/۶	74	۴.	٨/٨	٨
۲۲	۶/۱	۲۵	۲۷	٨/۵	٩
٢٢	۶/۱	۲۶	۳۵	١١	١.
۲۲	۶/۱	۲۷	٣٣	۲/۵	) )
۲۲	۶/۱	۲۸	۳۵	٩/۵	١٢
۲۲	۶/۱	۲٩	٣٧	٩/۵	١٣
۲۲	۶/۱	٣٠	۲۸	۱ • /۵	14
۲۲	۶/۱	۳۱	۳۷	٨/٣	۱۵
			٣٣	٩/۴	18

جدول ۴-۸ نتایج طراحی آزمایش سطح پاسخ

در گام اول همانند بخش قبل باید کفایت مدل مورد تأیید قرار گیرد که با استفاده از نمودارهای احتمال نرمال باقیمانده و مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش انجام می شود. شکل های ۴–۲۵ تا ۴–۲۸ این نمودارها را برای ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت نشان می دهد.



شكل ۴-۲۵ نمودار احتمال نرمال باقيمانده براى ارتفاع شاخه (بر اساس روش سطح پاسخ)



شکل ۴-۲۶ نمودار مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش برای ارتفاع شاخه (بر اساس روش سطح پاسخ)



شكل ۴-۲۷ نمودار احتمال نرمال باقيمانده براى درصد كاهش ضخامت (بر اساس روش سطح پاسخ)



شکل ۴-۲۸ نمودار مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش برای درصد کاهش ضخامت (بر اساس روش سطح پاسخ)

جدولهای ۴-۹ و ۴-۱۰ تحلیل واریانس حاصل نتایج روش سطح پاسخ برای ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت را نشان میدهد.

درصد تأثير (P-effect)	مقدار P (P-value)	عدد فیشر (F)	میانگین مربعات (MS)	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (DF)	منبع (Source)
	•	17/07	۴/۷۸۸۱۸	۶۷/۰۳۴۵	14	مدل رگرسیونی
	•/••۴	۶/۲	1/89804	41/1940	۴	عوامل خطى
۱۷/۵	•	۲۱/۸۲	۵/٩۶۳۳۴	۳۰/۶۱۷۸	١	А
١/٨٢	•/10٣	۲/۲۷	•/87	•/۲۹۵۹	١	L <sub>1</sub>
• / • ۲	۰/۸۸۹	•/•٢	•/••۵۵۳	1/1804	١	R <sub>c</sub>
۲/۳۱	•/\\	۲/۸۸	•/VN887	۸/۵۲۰۴	١	t
	•	18/10	4/4142	17/738	۴	عوامل توان دوم
۲۷/۹۳	•	34/14	٩/۵١٨٩	٩/٣٨۴٣	١	A <sup>2</sup>
8188	•/• \ \	$\Lambda/ extsf{T}$ )	۲/۲۷۰۳	٣/•٧٩۶	١	$L_1^2$
۱۰/۹۵	•/••٢	18/88	٣/٧٣٣۴	٣/••٢	١	R <sub>c</sub> <sup>2</sup>
۶/۹۱	• / • )	٨/۶٢	۲/۳۵۶۹	۲/۲۷۲۵	١	t <sup>2</sup>
	•   • • 9	4/94	1/30.7	٨/١٠١۴	۶	برهمكنش عوامل
1/41	•/7•۴	١/٧۶	•/۴۸۱۸	•/۴۸۱۸	١	$A \times L_1$
٨/۵٧	•/••۵	۱۰/۶۹	٢/٩٢١٩	४/९४१९	١	A×R <sub>c</sub>
•/18	•/۶۵٨	• / ۲	•/•۵۵۸	•/•۵۵۸	١	A×t
۱/۵۴	۰/۱۸۶	1/97	•/۵۲۵۶	•/۵۲۵۶	١	$L_1 \times R_c$
17/•٣	•/••٢	۱۵	4/1 • • ۶	4/18	١	$L_1 \times t$
•/•۵	۰/۸۱۴	•   • 9	•/•108	•/•108	١	R <sub>c</sub> ×t
• /٨			•/٢٧٣٣	4/17	۱۵	خطای باقیماندہ
۱/۳۴			•/۴۵۵۶	4/1	٩	عدم انطباق
			•	•	۶	خطای خالص
۱۰۰				V1/18FV	29	مجموع

جدول ۴-۹ تحلیل واریانس بر اساس روش سطح پاسخ برای ارتفاع شاخه

درصد تأثير (P-effect)	مقدار P (P-value)	عدد فیشر (F)	میانگین مربعات (MS)	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (DF)	منبع (Source)
	•	१९/٣٩	λ٧/١٠λ	1719/87	14	مدل رگرسیونی
	•/••٩	۵/۰۵	22/298	554/+ I	۴	عوامل خطی
۸/۴۵	•/••٢	۱۳/۵	8.1844	۶٩/٨٧	١	А
•/۶٩	• /٣ ١	١/١	4/952	408/40	١	L <sub>1</sub>
• / • 1	٠/ <b>٨٩</b> ١	• / • ۲	•/• *	۱۳/۹	١	R <sub>c</sub>
१/११	•/• ١٣	٧/٩٨	۳۵/۸۳۱	۱۸/۷۹	١	t
	•	<b>T9/TT</b>	141/22	۵۴۸/۸۸	۴	عوامل توان دوم
14/07	•	22/28	۱۰۰/۵۶۹	۱۲ • /Y	١	A <sup>2</sup>
36/68	•	۵۸/۲۵	781/898	310/78	١	$L_1^2$
4/17	• / • ۲ ١	۶/۵٩	<b>T9/818</b>	18/01	١	R <sub>c</sub> <sup>2</sup>
१٣/९९	•	22/22	۱۰۰/۳۳۷	98/41	١	t <sup>2</sup>
	•/• ١٢	4/14	۱ ۸/۶۰۶	111/88	۶	برهمكنش عوامل
37/41	•/•٣۴	0/44	26/620	74/44	١	A×L <sub>1</sub>
۲/۳۷	•/•٧١	٣/٧٩	۱۷/۰۰۹	۱ <i>۷</i> /۰۱	١	A×R <sub>c</sub>
•/18	•/817	•/7۶	1/171	)/)Y	١	A×t
1/22	•/١٨٣	١/٩۵	٨/٧۵٢	٨/٧۵	١	$L_1 \times R_c$
٨/١	•/••٣	17/94	۵۸/۱۴۱	۵۸/۱۴	١	$L_1 \times t$
۰/٣	۰/۵۰۲	•/۴٧	7/177	۲/۱۳	١	R <sub>c</sub> ×t
•/9٣			4/494	۶۷/۳۹	۱۵	خطای باقیمانده
•			۷/۴۸۸	۶۷/۳۹	٩	عدم انطباق
			•	•	۶	خطای خالص
۱۰۰				1788/91	۲۹	مجموع

جدول ۴-۱۰ تحلیل واریانس بر اساس روش سطح پاسخ برای درصد کاهش ضخامت

مقادیر <sup>R</sup><sup>2</sup> برای تحلیل واریانس ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت به ترتیب برابر با ۹۴/۲۴٪ و ۹۴/۷۶٪ میباشد که نشان میدهد تحلیل انجام شده دارای دقت بالایی میباشد. برای بررسی دقیق تر تأثیر عوامل فرایند بر توابع پاسخ، از پارامترهایی که مقدار P آنها بزرگتر از ۰/۰۵ است صرفنظر شد و تحلیل واریانس تصحیح شده مطابق با جدولهای ۴–۱۱ و ۴–۱۲ ارائه می گردد.

درصد تأثير (P-effect)	مقدار P (P-value)	عدد فیشر (F)	میانگین مربعات (MS)	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (DF)	منبع (Source)
۳۵/۰۹	•	۶۹/ <b>۰</b> ۹	۱۸/۸۳۱۵	3.16114	١	А
• /YA	•/771	۱/۵۳	•/۴1۶۶	•/2929	١	L <sub>1</sub>
١/٧۶	•/•YA	۳/۴۷	•/9468	1/1804	١	R <sub>c</sub>
۱۵/۸۸	•	۳۱/۲۶	٨/۵۲۰۴	٨/۵۲۰۴	١	t
17/22	•	347	9/2940	٩/٣٨۴٣	١	A <sup>2</sup>
۵/۰۸	•/••۵	١.	T/VTDV	<b>۳/•</b> ٧٩۶	١	$L_1^2$
۶/۷۶	•/••٢	۱ ۳/۳ ۱	318774	٣/••٢	١	R <sub>c</sub> <sup>2</sup>
4/74	•/••9	۲/۳۴	۲/۲۷۲۵	۲/۲۷۲۵	١	t <sup>2</sup>
۵/۴۵	•/••۴	۱۰/۷۲	٢/٩٢١٩	٢/٩٢١٩	١	A×R <sub>c</sub>
V/84	• / • • ١	10/•4	4/18	4/1008	١	L <sub>1</sub> ×t

جدول ۴-۱۱ تحلیل واریانس تصحیح شده بر اساس روش سطح پاسخ برای ارتفاع شاخه

# جدول ۴-۱۲ تحلیل واریانس بر اساس روش سطح پاسخ برای درصد کاهش ضخامت

درصد تأثير (P-effect)	مقدار P (P-value)	عدد فیشر (F)	میانگین مربعات (MS)	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (DF)	منبع (Source)
۱/۹۵	۰/۰ <b>۸</b> ۶	٣/٢٩	18/89	۶٩/٨٧	١	А
۲۷/۰۲	•	40/01	731/041	409/40	١	L <sub>1</sub>
1/87	•/114	۲/۷۴	۱۳/۸۹۶	۱٣/٩	١	R <sub>c</sub>
۲/۲	• / • V	٣/٧	۱۸/۷۸۶	١٨/٧٩	١	t
11/78	•	۱۹/۸۱	1/089	١٢٠/٧	١	A <sup>2</sup>
٣٠/۶	•	۵۱/۵۵	TF1/F91	810/78	١	$L_1^2$
٣/۴۶	•/•78	۵/۸۳	<b>۲۹/۶۱۶</b>	18/01	١	R <sub>c</sub> <sup>2</sup>
11/77	•	<b>۱۹/۷۷</b>	1 • • /٣٣٧	98/41	١	t <sup>2</sup>
۲/۸۶	•/•۴١	۴/۸۱	24/420	26/62	١	$A \times L_1$
۶/٨	•/••٣	11/40	۵۸/۱۴۱	۵۸/۱۴	١	$L_1 \times t$

مقادیر R<sup>2</sup> برابر با ۹۲/۷۲٪ و ۹۲/۵۱٪ به ترتیب برای ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت در تحلیل واریانس تصحیح شده حاصل شد. روابط ۴-۶ و ۴-۷ معادله رگرسیونی توابع پاسخ را بر اساس تحلیل واریانس تصحیح شده بیان می کند.

$$\begin{split} \mathrm{H} &= 57.9874 - 1.3826 \times A + 0.5776 \times L_1 + 0.4053 \times R_c - 9.5017 \times t \\ &+ 0.0109 \times A^2 + 0.0459 \times L_1^2 + 0.3595 \times R_c^2 + 4.5529 \times t^2 \\ &- 0.0411 \times A \times R_c - 0.657 \times L_1 \times t \end{split}$$

$$\frac{\Delta t}{t}\% = 294.168 - 5.0759 \times A + 3.2632 \times L_1 - 7.4642 \times R_c - 94.2654 \times t + 0.0361 \times A^2 + 0.457 \times L_1^2 + 1.0251 \times R_c^2 + 30.2789 \times t^2 - 0.0409 \times A \times L_1 - 2.5417 \times L_1 \times t$$
(V-F

از مهم ترین نتایج حاصل از تحلیل واریانس می توان به نکات زیر اشاره کرد.

- از میان پارامترهای متغیر، عوامل سختی لاستیک و ضخامت لوله به ترتیب با ۳۵/۰۹٪ و ۱۵/۸۸٪ و ۱۵/۸۸٪ بیشترین تأثیر را بر ارتفاع شاخه دارند. همچنین فاصله زبانه سنبه از لبه لوله با ۲۷/۰۲٪ تأثیر گذارترین عامل بر روی درصد کاهش ضخامت میباشد. همان طور که پیشتر نیز بیان شد، نقش L<sub>1</sub> ایجاد یک تنش فشاری در جداره لوله است که از ناز کشدگی آن جلوگیری می کند.
- از بین پارامترهای مرتبه دوم نیز A<sup>2</sup> با ۱۷/۳۲٪ بر روی ارتفاع شاخه و A<sup>2</sup> ، L<sup>2</sup> و t<sup>2</sup> به ترتیب با ۲۰/۶٪، ۱۱/۷۳٪ و ۱۱/۷۶٪ بر روی درصد کاهش ضخامت، اثر گذارترین عوامل میباشند.
- بقیه پارامترهای مستقل، درجه دو و برهم کنش بین عوامل کمتر از ۱۰٪ بوده و اثر قابل ملاحظهای ندارند.

اثر متقابل دو پارامتر بر یک تابع پاسخ به معنای تأثیر یکی از پارامترها بر تابع پاسخ در سطوح مختلف پارامتر دیگر است. در شکل ۴-۲۹ اثر متقابل پارامترها بر ارتفاع شاخه نشان داده شده است. مشاهده میشود که L<sub>1</sub> با شعاع قالب و ضخامت اثر متقابل دارد ولی بقیه عوامل اثر متقابلی با هم ندارند.



t (mm)

شکل ۴-۲۹ اثر متقابل پارامترها بر ارتفاع شاخه

شکل ۴-۳۰ اثر متقابل پارامترها را بر درصد کاهش ضخامت نشان میدهد. همان گونه که مشخص است سختی لاستیک با L<sub>1</sub> و شعاع قالب اثر متقابل دارند ولی در بقیه موارد اثر متقابل مشاهده نمی شود.



شکل ۴-۳۰ اثر متقابل پارامترها بر درصد کاهش ضخامت

شکل ۴–۳۱ سطح پاسخ مربوط به ارتفاع شاخه را در حالت دوبعدی و سهبعدی نشان میدهد. در این نمودارها تابع پاسخ بر اساس دو متغیر بیان شده است و دو متغیر دیگر ثابت فرض شدهاند. برای مثال در نمودار ارتفاع شاخه بر حسب  $L_1$  و  $R_1$  متغیرهای  $R_2$  و t ثابت فرض شده است. مقادیری که ثابت فرض شده است، برابر با مقادیر آزمون تجربی میباشد.





نمودارهای سطح پاسخ دوبعدی و سهبعدی درصد کاهش ضخامت نسبت به پارامترهای فرایند در شکل ۴-۳۲ مشاهده می شود.





شکل ۴-۳۲ نمودارهای سطح پاسخ برای درصد کاهش ضخامت

با توجه به نمودارهای سطوح پاسخ ارائه شده میتوان در رابطه با محدودههای مناسب برای فرایند بحث نمود که در زیر به برخی از مهمترین آنها اشاره شده است.

- با ثابت ماندن شعاع و ضخامت، L<sub>1</sub> در سطوح بالا برای ارتفاع شاخه مناسب تر بوده و سختی لاستیک را می توان در محدوده وسیع تری انتخاب نمود. برای کاهش ضخامت L<sub>1</sub> با سطوح پایین و همچنین سختی لاستیک در محدوده A۰ Shore-A پیشنهاد می شود.
- با ثابت ماندن L<sub>1</sub> و ضخامت، سختی در سطح بالا برای ارتفاع شاخه و سختی در محدوده
   با ثابت ماندن ۲۰ و ضخامت، سختی در سطح بالا برای ارتفاع شاخه و سختی در محدوده در محدوده وسیعتری تعیین کرد ولی شعاعهای کوچک میتوانند بهتر عمل کنند.
- با ثابت ماندن L<sub>1</sub> و شعاع، ضخامت زیاد و سختی بالا برای ارتفاع شاخه مناسب میباشد. همچنین ضخامت ۱/۶ تا ۲ میلیمتر و سختی در محدوده ۸۰-۸۰ Shore را میتوان برای کاهش ضخامت انتخاب کرد.
- با ثابت ماندن سختی لاستیک و ضخامت،  $L_1$  در سطوح بالا به همراه شعاع بزرگ برای ارتفاع شاخه و  $L_1$  در سطوح پایین و شعاع در محدوده  $\pi$  تا  $\Delta$  میلی متر برای کاهش ضخامت مناسب است.
- با ثابت ماندن سختی لاستیک و شعاع، L<sub>1</sub> در سطوح پایین برای هر دو تابع پاسخ، ضخامت بالا و ضخامت در محدوده ۱/۶ تا ۲ میلیمتر به ترتیب برای ارتفاع شاخه و کاهش ضخامت مناسب است.
- با ثابت ماندن سختی لاستیک و L<sub>1</sub>، شعاع کوچک و ضخامت بالا برای ارتفاع شاخه و شعاع در محدوده
  ۴ تا ۵ میلیمتر بههمراه ضخامت ۱/۹ تا ۱/۹ میلیمتر برای کاهش ضخامت، انتخابهای مناسبی میباشند.

شکل ۴-۳۳ محدوده مناسب و غیرمناسب متغیرهای فرایند را نسبت به هر دو پاسخ ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت به صورت توأم نشان میدهد. در این نمودار محدوده قابل قبول برای ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت بهترتیب برابر با ۸ تا ۱۵ میلیمتر و ۲۰ تا ۳۵ درصد درنظر گرفته شده است. در این شکل نیز مقادیر متغیرهایی که ثابت نگه داشته شدهاند، برابر با مقادیر آزمون تجربی میباشند.





شکل ۴-۳۳ محدودههای مناسب متغیرهای فرایند بر هر دو تابع پاسخ به صورت توام در این شکل مناطق سفیدرنگ سطوح قابل قبول از متغیرهای فرایند را نشان میدهد که ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت در محدوده در نظر گرفته شده قرار دارند و در نواحی رنگی یکی از دو پارامتر هدف یا هر دو خارج از محدوده تعیین شده میباشند.

در نهایت بهینهسازی با هدف دستیابی به ارتفاع شاخه بیشینه و کاهش ضخامت در حدود ۳۵٪ توسط نرمافزار مینی تب مطابق با شکل ۴–۳۴ پیشنهاد شد. شبیهسازی فرایند با سطوح پیشنهادی توسط نرمافزار انجام گرفت و ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت به ترتیب برابر با ۱۲/۴ میلیمتر و ۳۲٪ حاصل شد. خطای مقادیر پیشبینی شده و شبیهسازی برای ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت به ترتیب برابر با ۴٪ و ۱۸٪ می باشد که نشان می دهد بهینه سازی انجام شده دقت خوبی دارد.



شکل ۴-۳۴ مقادیر بهینه و توابع پاسخ

۴–۳- نتایج تجربی شکلدهی قطعه سهراهی و صحتسنجی نتایج شبیهسازی

در این بخش نتایج حاصل از شکلدهی یک قطعه اتصال سهراهی با استفاده از ابزار الاستومری بیان می شود و سپس به منظور صحت سنجی شبیه سازی های انجام شده، توزیع ضخامت، کرنش های طولی و محیطی حاصل از نتایج شبیه سازی با روش تجربی مقایسه گردید.

## FLD تعیین منحنی FLD و امضای کرنشی<sup>۱</sup> فرایند

حالت کرنش نقاط سالم از قطعه اتصال شکل داده شده بر روی صفحه کرنش در شکل ۴-۳۵ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود این نقاط به مقدار قابل توجهی بالاتر از منحنی حد شکل دهی تعیین شده با استفاده از تئوری هیل-سویفت می باشد، که برای شبیه سازی از آن استفاده گردید. علت این تفاوت را می توان به تنش بالای نرمال بر سطح لوله نسبت داد که از فشار لاستیک نتیجه می شود. این عامل موجب افزایش شکل پذیری نسبت به فرایندهای سنتی شکل دهی شده است [۴۸]. از این رو می توان با انتقال FLD تئوری

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Strain signature

هیل-سویفت به سمت بالا، منحنی حد شکلدهی برای فرایند RPF را به نحوی اصلاح نمود که کرنش نقاط سالم اندازه گیری شده در زیر منحنی اصلاحشده قرار گیرد.



شکل ۴-۳۵ منحنی حد شکل دهی اصلاح شده لوله مسی برای فرایند RPF

شکل ۴-۳۶ امضای کرنشی فرایند شکلدهی اتصال تیشکل با ابزار الاستومری در دو مسیر طولی (AB) و محیطی (BC) بر روی لوله را قبل از پارگی نشان میدهد. با توجه به شکل میتوان پیشبینی نمود که با ادامه فرایند، کرنش نقطه B تا رسیدن به منحنی حد شکلدهی افزایش یافته و پارگی در این ناحیه رخ دهد. ناحیه پیشبینی پارگی توسط شبیهسازی بههمراه نمونه لولههایی که دچار پارگی شدند، در شکل ۴-۳۷ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود ناحیه پارگی توسط شبیه سازی به خوبی پیشبینی شده است.



شکل ۴-۳۶ امضای کرنشی فرایند RPF قبل از پارگی لوله در دو مسیر طولی و محیطی با روش عددی و تجربی



شکل ۴-۳۷ پارگی لوله، الف) شبیه سازی، ب) نمونه های C2 و C4

۴–۳–۴ شکلدهی قطعه اتصال تیشکل

پس از آمادهسازی قالب، لولهها و ابزار الاستومری، آزمونهای تجربی مطابق با جدول ۲-۲ انجام شد. نمونههای شکل دهی شده تحت شرایط مختلف در شکل ۴-۳۸ مشاهده می شود. نمونه C2 به علت فشار ثانوی کم ناشی از بزرگ بودن C، نمونه C3 به دلیل بزرگ بودن  $L_1$  دچار پارگی شدند. همچنین

طول  $L_1$  برابر با صفر در نمونه C6 سبب ایجاد فشار محوری به لبه لوله از ابتدای فرایند گردید که منجر به چروکیدگی لوله شد.



شکل ۴-۳۸ نمونههای مسی شکلدهی شده تحت شرایط مختلف

شکل ۴-۳۹ هندسه قطعه اتصال شکلدهی شده C5 در آزمون تجربی و شبیهسازی را در کنار یکدیگر نشان میدهد که تطابق بسیار خوبی میان آنها مشاهده می شود.



شکل ۴-۳۹ مقایسه هندسه تغییر شکل در آزمون تجربی و شبیهسازی

مقایسه توزیع کرنش تجربی و شبیهسازی نمونهی C5 در جهتهای طولی و محیطی در مسیرهای A و B را میتوان در شکل ۴-۴۰ و ۴–۴۱ مشاهده نمود. میزان میانگین خطای تحلیل عددی در مقایسه با تحلیل تجربی در مسیر A برای کرنش طولی ۶٪ و کرنش محیطی ۸٪ میباشد. همچنین میانگین خطا در مسیر B برای کرنش طولی ۴٪ و کرنش محیطی ۸٪ میباشد.



## شکل ۴-۴۱ توزیع کرنش محیطی و طولی در مسیر B



شکل ۴-۴۲ برش نمونه مسی در دو مسیر A و B



شکل ۴-۴۳ توزیع ضخامت در مسیر A



شکل ۴-۴۴ توزیع ضخامت در مسیر B

شکل ۴–۴۵ منحنی نیرو-جابهجایی در شبیهسازی را نشان میدهد. به ازای جابهجایی ۲۰ میلیمتر سنبه، نیروی بیشینه برابر با ۱۰۱ کیلونیوتن در شبیهسازی بهدست آمد که با نیروی کل شکلدهی در آزمایش تجربی برای نمونه C5 که برابر با ۱۱۹ کیلونیوتن است، تطابق قابل قبولی دارد.



شکل ۴-۴۵ منحنی نیرو-جابهجایی در شبیهسازی

شکل ۴-۴۶ نمونههای برنجی شکلدهی شده را نشان میدهد. با تغییر فاصله ۶ مشخص شد که مقدار مناسب برای این پارامتر برابر با ۱۵/۵ میلیمتر میباشد و چنانچه از این مقدار بیشتر گردد؛ فشار ثانوی کاهش یافته و باعث پارگی لوله می شود. همچنین پخ نمونه B5 در انتهای فرایند کاملاً از بین نرفت و می توان نتیجه گرفت که پخ با y برابر ۱۰ میلیمتر مناسب می باشد.



شکل ۴-۴۶ نمونههای برنجی شکلدهی شده تحت شرایط مختلف

نمونههای آلومینیومی شکلدهی شده در شکل ۴-۴۷ قابل مشاهده است. به دلیل شکل پذیری کمتر آلومینیوم نسبت به مس و برنج، باید فاصله S تا حد امکان کوچک باشد تا فشار ثانوی لازم برای جلوگیری از پارگی لوله فراهم شود. برای لوله آلومینیومی به ازای S و y به ترتیب برابر با ۳ و ۵ میلی متر نمونه سالم حاصل شد.



شکل ۴-۴۷ نمونههای آلومینیومی شکلدهی شده تحت شرایط مختلف

نمونههای سالم از جنس آلومینیوم، برنج و مس که تحت شرایط مناسب با روش RPF بههمراه فشار ثانوی شکل دهی شدهاند، در شکل ۴-۴۸ قابل مشاهده است.



شکل ۴-۴۸ نمونههای سالم شکلدهی شده با روش RPF بههمراه فشار ثانوی

فصل ۵ نتیجه گیری و ارائهی پیشنهادها

## ۵–۱– نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی عددی و تجربی فرایند تولید اتصال تی شکل با اعمال فشار دوطرفه از داخل و بیرون لوله با استفاده از ابزار الاستومری پرداخته شد. در بخش عددی، میزان اثر گذاری پارامترهای مربوط به هندسه قالب، سختی لاستیک، شرایط اصطکاکی و نوع بار گذاری بر عمق نهایی شاخه اتصال و توزیع ضخامت با روش طراحی آزمایش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفت. سپس با شناسایی عوامل تأثیر گذار بر فرایند، بهینهسازی با روش سطح پاسخ انجام شد. در بخش تجربی، لولههایی از جنس مس، آلومینیوم و برنج، و دو نوع ابزار کشسان پلی اورتان و پی وی سی تهیه گردید و خواص مکانیکی آنها بر اساس استانداردهای موجود تعیین شد. برای اجرای آزمایشهای تجربی، قالب مناسب فرایند پس از طراحی و حصول اطمینان از سلامت آن توسط شبیه سازی اجزاء محدود، ساخته شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش به صورت زیر ارائه شده است.

 خواص مکانیکی لولههای آلومینیومی، برنجی و مسی به کمک آزمون کشش تکمحوری بر اساس استاندارد ASTM A370 تعیین شد. عملیات حرارتی بازپخت سبب بهبود خواص مکانیکی لولههای آلومینیومی و مسی گردید.

- منحنی تنش-کرنش مهندسی لاستیک پلیاورتان بر اساس استاندارد ASTM D575-91 بهدست آمد و رفتار لاستیک به عنوان یک ماده هایپرالاستیک تراکم ناپذیر با کمک معادله ساختاری مونی-ریولین مدل شد. <sub>1</sub>0 و <sub>0</sub>1 ثوابت معادله مونی-ریولین برای این ماده به ترتیب برابر با ۱/۰۴ و ۱/۰۹۳ مگاپاسکال به دست آمد.
- تحلیل عددی تنش اجزای قالب به صورت سهبعدی به کمک نرمافزار آباکوس اجرا و تنش بیشینه در قالب و پیچ به ترتیب برابر با ۱۹۰ و ۷۷۰ مگاپاسکال محاسبه شد. با توجه به تنش تسلیم فولاد VCN 150 و پیچ M12 گرید 12.9 که به ترتیب برابر با ۷۰۰ و ۱۰۸۰ مگاپاسکال است؛ سلامت قالب تأیید شد.
- نتایج حاصل از تحلیل واریانس بر اساس طراحی آزمایش تاگوچی نشان داد که عوامل سختی لاستیک، فاصله زبانه سنبه از لبه لوله، ضخامت و شعاع گوشه قالب به ترتیب با ۴۲/۷۹٪، ۲۸/۵٪، ۱۵/۲۷٪ و ۱۰/۲٪ بیشترین تأثیر را بر ارتفاع شاخه دارند. همچنین شعاع گوشه قالب، فاصله زبانه سنبه از لبه لوله و ضخامت به ترتیب با ۴۰/۵۱٪، ۳۵/۸۲٪ و ۱۵/۲۵٪ تأثیرگذارترین عوامل بر درصد کاهش ضخامت میباشند.
- نتایج حاصل از تحلیل سیگنال به نویز بر اساس طراحی آزمایش تاگوچی بیان میکند که افزایش سختی لاستیک، کاهش فاصله زبانه سنبه از لبه لوله، کاهش شعاع گوشه قالب و افزایش ضخامت سبب افزایش ارتفاع شاخه می شود. همچنین با کاهش فاصله زبانه سنبه از لبه لوله، افزایش شعاع قالب و افزایش ضخامت، نازک شدگی در قطعه حاصل کاهش مییابد.
- معادله رگرسیونی غیرخطی مناسب برای ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت بر اساس طراحی آزمایش تاگوچی تعیین شد. ضریب R<sup>2</sup> که میزان انطباق مدل ارائه شده و نتایج شبیهسازی را بیان می کند؛ برای ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت به ترتیب برابر با ۹۵/۰۵٪ و ۹۲/۸۳٪ بوده که نشان می دهند مدل تحلیل و رگرسیون از مقبولیت کافی برخوردار است.
- بر اساس طراحی آزمایش با روش سطح پاسخ مشخص شد که از میان پارامترهای متغیر، عوامل سختی
  لاستیک و ضخامت لوله به ترتیب با ۳۵/۰۹٪ و ۱۵/۸۸٪ بیشترین تأثیر را بر ارتفاع شاخه دارند.

همچنین فاصله زبانه سنبه از لبه لوله با ۲۷/۰۲٪ تأثیر گذارترین عامل بر روی درصد کاهش ضخامت میباشد. از بین پارامترهای مرتبه دوم نیز A<sup>2</sup> با ۱۷/۳۲٪ بر روی ارتفاع شاخه و A<sup>2</sup> ،L<sup>2</sup> و t<sup>2</sup> به ترتیب میباشد. از بین پارامترهای مرتبه دوم نیز A<sup>2</sup> با ۱۷/۳۲٪ بر روی ارتفاع شاخه و ۲<sup>1</sup>، A<sup>2</sup> و t<sup>2</sup> به ترتیب میباشد. با ۲۰/۶٪، ۱۱/۷۳٪ و ۱۱/۷۶٪ بر روی درصد کاهش ضخامت، اثر گذارترین عوامل میباشند.

- در تحلیل واریانس تصحیح شده بر اساس طراحی آزمایش سطح پاسخ؛ مقادیر R<sup>2</sup> برابر با ۹۲/۷۲٪ و ۹۲/۵۱٪ به ترتیب برای ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت برای معادله رگرسیونی غیرخطی تعیین شده نشان میدهد که مدل ارائه شده از دقت قابل قبولی برخوردار است.
- شبیه سازی فرایند با شرایط بهینه ی تعیین شده توسط روش سطح پاسخ و نرمافزار مینی تب انجام شد.
  خطای مقادیر پیش بینی شده و شبیه سازی برای ارتفاع شاخه و درصد کاهش ضخامت به تر تیب برابر
  با ۴٪ و ۱۸٪ می باشد که نشان می دهد بهینه سازی انجام شده دقت خوبی دارد.
- با اندازه گیری کرنش ها در نمونه ی مسی شکل دهی شده و تعیین منحنی حد شکل دهی نشان می دهد
  که استفاده از لاستیک موجب افزایش شکل پذیری نسبت به فرایندهای سنتی شکل دهی شده است.
- مقایسه نتایج تجربی و عددی نشان داد که هندسه نهایی قطعه شکل دهی شده و همچنین ناحیه پارگی در شبیه سازی به خوبی پیش بینی شده است.
- میزان میانگین خطای تحلیل عددی در مقایسه با تحلیل تجربی در راستای طولی لوله (مسیر A) برای کرنش طولی ۶٪، کرنش محیطی ۸٪ و توزیع ضخامت ۵٪، و در راستای محیطی لوله (مسیر B) برای کرنش طولی ۴٪، کرنش محیطی ۸٪ و توزیع ضخامت ۶٪ میباشد.

## ۵-۲- ارائهی پیشنهادها

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

- در این پژوهش از لاستیک پلیاورتان به عنوان واسط اعمال فشار استفاده شد. پیشنهاد می شود از ابزارهای الاستومری دیگری برای این فرایند به کار گیری شود.
- عملیات حرارتی بازپخت نقش زیادی در افزایش شکل پذیری مواد دارد. به نظر میرسد عملیات بازپخت بین مرحلهای می تواند قطعهای با ارتفاع شاخه بلندتر با توزیع ضخامت یکنواخت تری تولید کند.

- پیشنهاد می شود تأثیر عوامل فرایند بر نیروی شکل دهی مورد بررسی قرار گیرد.
- می توان از تلفیق دو فرایند هیدروفرمینگ و RPF استفاده کرد و در این حالت از سیال برای کنترل فشار ثانوی بهره برد.
  - پیشنهاد می شود تغذیه رفت و برگشتی ابزار الاستومری در این راستا مورد آزمایش قرار گیرد.

#### منبعها

- [1] M. H. Dirikolu and E. Akdemir, "Computer aided modelling of flexible forming process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 148, pp. 376-381, 2004.
- [2] M. Fu, H. Li, J. Lu, and S. Lu, "Numerical study on the deformation behaviors of the flexible die forming by using viscoplastic pressure-carrying medium," *Computational Materials Science*, vol. 46, pp. 1058-1068, 2009.
- [3] E. L. Deladi, *Static friction in rubber-metal contacts with application to rubber pad forming processes*: University of Twente, 2006.
- [4] S. Semiatin, "ASM Handbook Volume 14: Forming and Forging," ed: ASM International, 1988.
- [5] M. Ramezani and Z. M. Ripin, *Rubber-pad forming processes: Technology and applications*: Elsevier, 2012.
- [6] H. Yadong, X. Ping, T. Wenzhong, and Z. Fuhua, "Experimental investigation of bulge forming of plastic branch pipe," *Journal of materials processing technology*, vol. 142, pp. 551-555, 2003.
- [7] S. H. Zhang, "Developments in hydroforming," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 91, pp. 236-244, 1999.
- [8] J. Hu, Z. Marciniak, and J. Duncan, *Mechanics of sheet metal forming*: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [9] H. Tschaetsch, *Metal forming practise: processes-machines-tools*: Springer Science & Business Media, 2007.
- [10] M. Ahmetoglu and T. Altan, "Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 25-33, 2000.
- [11] T. Maeno, K. i. Mori, and C. Unou, "Improvement of die filling by prevention of temperature drop in gas forming of aluminium alloy tube using air filled into sealed tube and resistance heating," *Procedia Engineering*, vol. 81, pp. 2237-2242, 2014.
- [12] L. Vadillo, M. Santos, M. Gutierrez, I. Pérez, B. González, and V. Uthaisangsuk, "Simulation and experimental results of the hot metal gas forming technology for high strength steel and stainless steel tubes forming," in *AIP Conference Proceedings*, 2007, pp. 1199-1204.
- [13] T. Maeno, K. Mori, and K. Fujimoto, "Development of the hot gas bulging process for aluminium alloy tube using resistance heating," in *Key Engineering Materials*, 2009, pp. 315-323.
- [14] T. Maeno, K.-i. Mori, and K. Adachi, "Gas forming of ultra-high strength steel hollow part using air filled into sealed tube and resistance heating," *Journal of Materials processing technology*, vol. 214, pp. 97-105, 2014.
- [15] M. Ahmetoglu, J. Hua, S. Kulukuru, and T. Altan, "Hydroforming of sheet metal using a viscous pressure medium," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 146, pp. 97-107, 2004.
- [16] Z. Wang, J. Liu, X. Wang, Z. Hu, and B. Guo, "Viscous pressure forming (VPF): state-ofthe-art and future trends," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 151, pp. 80-87, 2004.

- [17] X. Wang, J. Xia, G. Hu, Z. Wang, and Z. Wang, "Sheet bulging experiment with a viscous pressure-carrying medium," *Journal of materials processing technology*, vol. 151, pp. 340-344, 2004.
- [18] J. Liu, B. Westhoff, M. A. Ahmetoglu, and T. Altan, "Application of viscous pressure forming (VPF) to low volume stamping of difficult-to-form alloys—results of preliminary FEM simulations," *Journal of materials processing technology*, vol. 59, pp. 49-58, 1996.
- [19] H. Al-Qureshi, "Factors affecting the strain distributions of thin-walled tubes using polyurethane rod," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 13, pp. 403IN1407-406IN2413, 1971.
- [20] S. Thiruvarudchelvan and F. Travis, "Tube bulging with a urethane rod," *Journal of materials processing technology*, vol. 23, pp. 195-209, 1990.
- [21] A. Girard, Y. Grenier, and B. Mac Donald, "Numerical simulation of axisymmetric tube bulging using a urethane rod," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 172, pp. 346-355, 2006.
- [22] H. G. Nosrati and M. Gerdooei, "Experimental and numerical study of friction in free bulging 304 stainless steel seamed tube using elastic pad," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, 2015 (In Persian).
- [23] L. Moreira Filho and H. Al-Qureshi, "Elastomer forming of cross junction," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, vol. 26, pp. 403-414, 1986.
- [24] B. Mac Donald and M. Hashmi, "Three-dimensional finite element simulation of bulge forming using a solid bulging medium," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 37, pp. 107-116, 2001.
- [25] L. Moreira Filho, J. Menezes, and H. Al-Qureshi, "Analysis of unconventional tee forming on metal tubes," *Journal of materials processing technology*, vol. 45, pp. 383-388, 1994.
- [26] S. Sheng and W. Tonghai, "Research into the bulge forming of a tube under axial-radial compound forces and its application," *Journal of materials processing technology*, vol. 51, pp. 346-357, 1995.
- [27] D. Shan, Y. Kim, Y. Lu, S. Kim, and C. Wang, "Characteristics of tee tube forming deformation zone using plastic pressure-building medium," *Metals and Materials International*, vol. 6, pp. 519-524, 2000.
- [28] H. Bisadi and M. Kalantari, "Numerical and experimental analysis of the effect of die and workpiece geometry in Bulg-Forming process of T-shape tube," presented at the International Conference on Manufacturing, Babol University of Technology, 2010 (In Persian).
- [29] H. Bisadi and M. Kalantari, "Numerical and experimental investigation of friction in Bulg-Forming process of T-shape tubes," presented at the International Conference on Manufacturing, Babol University of Technology, babol, 2010 (In Persian).
- [30] C. R. M. Foli, M. A. Menezes, and L. A. Moreira Filho, "THE INFLUENCE OF THE FRICTION FACTOR ON THE TOTAL FORMING FORCE IN "T" METALLIC JUNCTIONS EMPLOYING ELASTOMERS," in *Proceedings of the COBEM 2005: 18* th International Congress of Mechanical Engineering, 2005.
- [31] H. Ghaforian Nosrati, M. Gerdooei, and M. Falahati Naghibi, "Experimental and Numerical Study on Formability in Tube Bulging: A Comparison Between Hydroforming and Rubber Pad Forming," *Materials and Manufacturing Processes*, 2016.

- [32] H. Ghaforian Nosrati, S. M. H. Seyedkashi, and M. Gerdooei, "Investigation of Effective Parameters in Free Bulging of Stainless Steel 304 Tube Using Elastomer Tool," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, pp. 191-198, 2016 (In Persian).
- [33] Z. Z. Chen and B. Liu, "Simulation of Compound Bulging Process for T-Branch Tubes Using Rubber Medium," in *Advanced Materials Research*, 2011, pp. 88-95.
- [34] H. Czichos, T. Saito, and L. Smith, *Springer handbook of materials measurement methods* vol. 978: Springer Berlin, 2006.
- [35] A. Standard, "D575-91, 2010,"Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, DOI: 10.1520/D0575-91R07," ed.
- [36] A. Ashrafi and K. Khalili, "Studying the stress-strain curve of C12200 Copper tube using hydraulic bulge test in T-shaped die," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, 2015 (In Persian).
- [37] S. Thiruvarudchelvan and J. Gan, "Drawing of hemispherical cups using friction-actuated blank holding," *Journal of materials processing technology*, vol. 40, pp. 327-341, 1994.
- [38] K. Lange and K. Pöhlandt, *Handbook of metal forming*: McGraw-Hill, 1985.
- [39] D. L. Logan, *A first course in the finite element method*: Cengage Learning, 2011.
- [40] E. S. S. E, S. Y. Ahmadi Brooghani, and K. Khalili, "Designing Approach for the Ultrasonic Tube Hydroforming System," *Solid and Fluid Mechanics* vol. 5, pp. 135-148, 2015.
- [41] G. E. Dieter and D. J. Bacon, *Mechanical metallurgy* vol. 3: McGraw-Hill New York, 1986.
- [42] T. B. Stoughton, "A general forming limit criterion for sheet metal forming," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 42, pp. 1-27, 2000.
- [43] W. F. Hosford and R. M. Caddell, *Metal forming: mechanics and metallurgy*: Cambridge University Press, 2011.
- [44] A. Del Prete, G. Papadia, and B. Manisi, "Computer aided modelling of rubber pad forming process," in *Key Engineering Materials*, 2011, pp. 637-644.
- [45] Z. Nowak, "Constitutive modelling and parameter identification for rubber-like materials," *Engineering Transactions*, vol. 56, pp. 117–157, 2008.
- [46] R. Roy, A primer on the Taguchi method, 1990, 1990.
- [47] D. C. Montgomery, *Textbook: Design and Analysis of Experiments*, Eighth edition ed., 2014.
- [48] H. Ghaforian Nosrati, "Experimental and Numerical Study of Metallic Tubes Bulging Using Elastic Pad in Comparison with Tubes Hydro-Bulging," Master of Science, Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, 2014 (In Persian).

## پيوست يک

# ۱) ابعاد (بر حسب اینچ) نمونه آزمون کشش از لوله بر اساس استاندارد ASTM A370



1 . 4		ICI		
 11/1	EP	u. – 1	Юл	

Specimen No.		Dimensions, in.					
Specimen No.	Α	В	С	D			
1	<sup>1</sup> /2 ± 0.015	<sup>11</sup> ⁄16 approximately	2 ± 0.005	21/4 min			
2	<sup>3</sup> ⁄ <sub>4</sub> ± 0.031	1 approximately	$2 \pm 0.005$	21/4 min			
			4 ± 0.005	41/2 min			
3	1± 0.062	11/2 approximately	$2 \pm 0.005$	21/4 min			
			$4 \pm 0.005$	41/2 min			
4	1½ ± .125	2 approximately	2 ± 0.010	21/4 min			
			4 ± 0.015	41/2 min			
			8 ± 0.020	9 min			
5	1⁄4 ± .002	3∕₀ approximately	1 ± 0.003	1 ¼ min			

NOTE 1—Cross-sectional area may be calculated by multiplying A and t.

Note 2—The dimension t is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications.

Note 3—The reduced section shall be parallel within 0.010 in. and may have a gradual taper in width from the ends toward the center, with the ends not more than 0.010 in. wider than the center.

Note 4-The ends of the specimen shall be symmetrical with the center line of the reduced section within 0.10 in.

NOTE 5-Metric equivalent: 1 in. = 25.4 mm.

پيوست دو



۲) نقشه قالب شکلدهی اتصال تی شکل و اجزای تشکیل دهندهی آن



#### Abstract

The elastomeric tool is widely used in the aviation and automobile industry due to its high flexibility, good surface quality and cost reduction. In this thesis a new method for producing a Tbranch joint by using an elastic medium to apply double-sided pressure both inside and outside of the tube is presented. Numerical analysis of the process by assuming an incompressible hyperelastic material with Mooney-Rivlin behavior model for elastic tool in Abaqus software was performed. For tube the elastic-plastic model with normal anisotropy and FLD damage criterion was used. Taguchi test method was used to determine the effective intrinsic and extrinsic parameters on branch height and thickness reduction percentage. The statistical analysis of this design showed that the rubber hardness, the distance between punch should red and tube edge, the die corner radius and the tube thickness have the greatest effect successfull of the process. In the next step, in order to achieve the optimal values of effective factors, the response surface method was used with nonlinear regression model. In the experimental section, standard tests to extract the mechanical properties of three copper, brass and aluminum tubes, and two types of elastomeric polyurethane and PVC tools were performed. The manufacturing of the die after assuring the optimal design with the help of the 3D finite element method was carried out. Three intact sample of copper, brass and aluminum tubes after initial tests was successfully produced. For validation of experimental and numerical results, strain distribution and tube thickness in longitudinal and circumferential paths were compared. The results showed that, firstly, the idea of using both inner and outer pressure on tube walls is on oppropriate technique to fabricate a defect-free long Tbranch. Furthermore the simulation results have an acceptable accuracy.

**Keywords:** Optimization, Elastomer tool, Taghuchi's design of experiment, Response surface methodology, Copper tube, Forming of T-branch,



M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering

Title Optimization of Process Variables in Forming of Tube Fittings by Using Elastomer Tool

> Written by Mir Sadegh Akbarian Kuhkheyli

> > Supervisor Dr. Mahdi Gerdooei

Advisor Dr. Seyed Vahid Hosseini

July 2017