

به نام خداوند جان و خرد



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

مطالعه شکل دهی لوله فلزی با ترکیب شکل دهی  
به کمک سیال فشار بالا و پایین

نگارنده: امیرسامان سلیمی

استاد راهنما:

دکتر سید هادی قادری

شهریور ۱۳۹۶

## سپاس‌گزاری

بر خود لازم می‌دانم تا در انتهای این پژوهش، از تمامی کسانی که مرا در انجام آن یاری فرمودند، تشکر و قدردانی لازم را بجا آورم.

ابتدا، از استاد گرانقدر، جناب آقای دکتر سید هادی قادری به منظور راهنمایی‌های ایشان در انجام این کار، تشکر می‌کنم.

همچنین، از خانم مهندس صدف یآوری‌منش و پدر، مادر و خواهر عزیزم و آقایان دکتر محمد باقر نظری، دکتر مجتبی قطعی، مهندس حامد مقصودلو، مهندس حسین موسوی و تمامی افرادی که در انجام این پایان‌نامه اینجانب را صمیمانه کمک کردند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## تعهدنامه

اینجانب امیرسامان سلیمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک - ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان مطالعه شکل دهی لوله فلزی با ترکیب شکل دهی به کمک سیال فشار بالا و پایین تحت راهنمایی دکتر سید هادی قادری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار 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 بافت های 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.

### تاریخ

### 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.

## چکیده

هیدروفرمینگ لوله یکی از فرآیندهای نسبتاً جدید شکل‌دهی لوله است که به دلیل افزایش نسبت استحکام به وزن و کاهش هزینه و مراحل تولید، مورد توجه خودروسازان و صنایع هوا فضا قرار گرفته است. در این فرآیند، لوله داخل قالب قرار گرفته و با اعمال فشار سیال به داخل لوله و تغذیه محوری، شکل‌دهی لوله کامل می‌شود. برای بهبود شکل‌دهی و افزایش راندمان این فرآیند پژوهش‌های متعددی انجام شده است. در این پایان‌نامه نیز، استفاده از روشی جدید در انجام فرآیند هیدروفرمینگ برای افزایش شکل‌پذیری لوله مورد مطالعه قرار گرفته است که در آن، شکل‌دهی به کمک ترکیب سیال داخلی با فشار بالا و پایین استفاده می‌شود. همچنین قالب در انتهای فرآیند اندکی باز شده و دوه بسته می‌شود و اثر آن بر پرشدگی قالب مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا یک قالب هیدروفرمینگ برای ایجاد مقطع دمبلی شکل در لوله طراحی شده، سپس خواص مکانیکی لوله مسی مورد آزمایش، در دو حالت دریافتی و بازپخت‌شده با استفاده از آزمون کشش ساده به دست آمد. تحلیل المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ به روش سنتی با اعمال نتایج به دست آمده از آزمون کشش انجام گرفت و در مرحله بعد، تحلیل فرآیند با استفاده از روش پیشنهادی این پژوهش تکرار شد. در مقایسه نتایج حاصل از این دو تحلیل مشخص شد که در فشار سیال داخلی یکسان، با استفاده از روش پیشنهادی این پایان‌نامه، پرشدگی قالب برای لوله دریافتی و بازپخت‌شده به ترتیب ۱۷ و ۳۰ درصد بهبود می‌یابد و همچنین مشخص شد که برای شکل‌دهی لوله به میزان مشخص، فشار سیال مورد نیاز برای فرآیند در حالت دریافتی ۵۳ درصد و در حالت بازپخت‌شده ۹۰ درصد کاهش می‌یابد. پس از اطمینان از نتایج به دست آمده و اصلاح قالب طراحی‌شده، قالب هیدروفرمینگ ساخته شد. برای حفظ تقارن قالب در حین بسته شدن آن، یک سازوکار چهارمیله‌ای مورد استفاده قرار گرفت. آزمون‌های عملی با توجه به تحلیل المان محدود، برای لوله‌های دریافتی و بازپخت‌شده به دو روش سنتی و پیشنهادی تکرار شد. ارتفاع برآمدگی قسمت میانی لوله و حجم آن با نتایج تحلیل المان محدود مقایسه شد. نتایج آزمون تجربی و تحلیل المان محدود با دقت خوبی بر هم منطبق بود.

**واژگان کلیدی:** پرشدگی گوشه‌ی قالب، تحلیل المان محدود، شکل‌دهی لوله، هیدروفرمینگ لوله

## فهرست عنوان‌ها

فصل ۱ مقدمه .....	۱
۱-۱- هیدروفرمینگ لوله .....	۲
۱-۱-۱- فرآیند هیدروفرمینگ لوله .....	۳
۱-۱-۲- پارامترهای موثر در فرآیند هیدروفرمینگ .....	۶
۱-۲- پیشینه تحقیق .....	۷
۱-۳- ساختار پایان‌نامه .....	۱۱
فصل ۲ تحلیل المان محدود فرآیند .....	۱۳
۲-۱- تحلیل آزمون کشش .....	۱۴
۲-۱-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی ماده .....	۱۴
۲-۱-۲- مدل‌سازی هندسی .....	۱۵
۲-۲- تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ لوله .....	۱۶
فصل ۳ روش آزمایشگاهی .....	۲۳
۳-۱- آماده‌سازی مواد اولیه برای آزمون کشش .....	۲۳
۳-۲- آزمون کشش .....	۲۵
۳-۳- طراحی و ساخت قالب .....	۲۶
۳-۳-۱- صفحات قاب .....	۲۸
۳-۳-۲- قالب‌های کلگی .....	۲۹
۳-۳-۳- بوش‌های داخل کلگی .....	۳۰
۳-۳-۴- قالب‌های اینسرت .....	۳۱
۳-۳-۵- صفحات پشت‌بند .....	۳۲
۳-۳-۶- سازوکار چهار میله‌ای .....	۳۳
۳-۳-۷- سنبه‌های تغذیه .....	۳۴
۳-۴- تجهیزات مورد استفاده در فرآیند هیدروفرمینگ .....	۳۵
۳-۴-۱- دستگاه پرس .....	۳۶
۳-۴-۲- جک‌های هیدرولیک .....	۳۶
۳-۴-۳- پمپ‌های هیدرولیک .....	۳۶
۳-۴-۴- همگام‌کننده .....	۳۷

۳۸	..... ۳-۴-۵- تجهیزات هیدرولیکی
۳۹	..... ۳-۴-۶- ساعت اندازه‌گیری
۴۰	..... ۳-۵- انجام فرآیند هیدروفرمینگ
۴۰	..... ۳-۵-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها
۴۱	..... ۳-۵-۲- اجرای فرآیند هیدروفرمینگ
۴۴	..... ۳-۵-۳- اندازه‌گیری نمونه شکل داده‌شده
۴۷	..... <b>فصل ۴ نتایج و بحث</b>
۴۷	..... ۴-۱- آزمون کشش
۵۲	..... ۴-۲- مقایسه نتایج تحلیل المان محدود و آزمون تجربی آزمون کشش
۵۴	..... ۴-۳- تحلیل المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ
	..... ۴-۳-۱- شکل‌دهی نمونه دریافتی برای رسیدن به ارتفاع $h$ یکسان به روش سنتی و پیشنهادی
۵۴	..... ۴-۳-۲- شکل‌دهی نمونه دریافتی در فشار یکسان به روش سنتی و پیشنهادی
۵۷	..... ۴-۳-۳- شکل‌دهی نمونه بازپخت شده برای رسیدن به ارتفاع $h$ یکسان به روش سنتی و پیشنهادی
۵۹	..... ۴-۳-۴- شکل‌دهی نمونه بازپخت شده در فشار یکسان به روش سنتی و پیشنهادی
۶۱	..... ۴-۴- فرآیند هیدروفرمینگ
۶۴	..... ۴-۵- مقایسه نتایج تحلیل المان محدود و آزمون تجربی فرآیند هیدروفرمینگ
۶۵	..... <b>فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها</b>
۶۹	..... ۵-۱- نتیجه‌گیری
۷۰	..... ۵-۲- پیشنهادها
۷۳	..... <b>پیوست الف - نقشه‌های قالب و صفحات قالب</b>
۸۳	..... <b>منبع‌ها</b>
۸۶	..... <b>چکیده انگلیسی</b>

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: کاربردهای مختلف هیدروفرمینگ (الف) ترمپت (ب) فریم دوچرخه ..... ۲
- شکل ۱-۲: نمونه‌ای از مقاطع شکل‌دهی شده به روش هیدروفرمینگ [۸] ..... ۴
- شکل ۱-۳: شماتیک فرآیند هیدروفرمینگ [۱۰] ..... ۴
- شکل ۱-۴: روش‌های انجام فرآیند هیدروفرمینگ (الف) کم‌فشار (ب) پرفشار ..... ۵
- شکل ۱-۵: شرایط اصطکاکی در هیدروفرمینگ لوله ..... ۷
- شکل ۱-۶: محدوده کاری پیشنهادی توسط اصنافی [۱۶] ..... ۸
- شکل ۱-۷: مقایسه محدوده کاری روش یوان و حالت سنتی [۱۹] ..... ۹
- شکل ۱-۸: مقایسه شعاع پرشدگی گوشه قالب ..... ۱۰
- شکل ۱-۹: مقایسه توزیع ضخامت لوله حاصل از ارتعاشات التراسونیک ..... ۱۰
- شکل ۱-۲: تنش و کرنش پلاستیک استخراج‌شده از آزمون کشش تک محوره ..... ۱۵
- شکل ۲-۲: هندسه ونحوه شبکه‌بندی نمونه ..... ۱۶
- شکل ۲-۳: شکل نهایی لوله و ابعاد آن ..... ۱۷
- شکل ۲-۴: شماتیک روش سنتی فرآیند هیدروفرمینگ ..... ۱۸
- شکل ۲-۵: شماتیک روش پیشنهادی فرآیند هیدروفرمینگ ..... ۱۸
- شکل ۲-۶: نحوه قرار گرفتن اجزای مدل‌شده در کنار هم ..... ۱۹
- شکل ۲-۷: سطح اثر و نقطه مرجع برهم‌کنش حفره سیال ..... ۲۰
- شکل ۲-۸: شبکه‌بندی قسمت‌های مختلف مدل ..... ۲۱
- شکل ۳-۱: ابعاد نمونه آزمون کشش با توجه به استاندارد ASTM E 8M-00b ..... ۲۴
- شکل ۳-۲: نحوه گیره‌بندی نمونه ..... ۲۴
- شکل ۳-۳: نمونه‌های آماده‌شده برای آزمون کشش ..... ۲۴
- شکل ۳-۴: دستگاه آزمون کشش اینسترون ۸۸۰۲ ..... ۲۵



- شکل ۳-۵: الف) نحوه قرارگیری نمونه ب) شکست نمونه در پایان آزمون ..... ۲۶
- شکل ۳-۶: شماتیک نحوه بسته شدن قالب هیدروفرمینگ ..... ۲۷
- شکل ۳-۷: قالب طراحی شده نصب شده بر روی صفحات قاب ..... ۲۸
- شکل ۳-۸: صفحه قاب طراحی شده ..... ۲۸
- شکل ۳-۹: صفحات قاب و جک‌های هیدرولیک تغذیه محوری ..... ۲۹
- شکل ۳-۱۰: قالب کلگی ..... ۳۰
- شکل ۳-۱۱: نحوه قرارگیری بوش داخل کلگی ..... ۳۰
- شکل ۳-۱۲: بوش داخل کلگی ..... ۳۱
- شکل ۳-۱۳: اینسرت طراحی شده ..... ۳۲
- شکل ۳-۱۴: قالب اینسرت ..... ۳۲
- شکل ۳-۱۵: صفحه پشت‌بند ..... ۳۳
- شکل ۳-۱۶: اجزای سازوکار چهار میله‌ای ..... ۳۳
- شکل ۳-۱۷: نحوه اتصال اجزای مختلف قالب ..... ۳۴
- شکل ۳-۱۸: بخش‌های مختلف سرسنبه ..... ۳۴
- شکل ۳-۱۹: سنبه ساخته شده ..... ۳۵
- شکل ۳-۲۰: نمای کلی از تجهیزات مورد استفاده در فرآیند هیدروفرمینگ ..... ۳۶
- شکل ۳-۲۱: پمپ هیدرولیک ۳۵۰ bar ..... ۳۷
- شکل ۳-۲۲: پمپ هیدرولیک ۷۰۰ bar ..... ۳۷
- شکل ۳-۲۳: همگام‌کننده ..... ۳۸
- شکل ۳-۲۴: مجموعه تجهیزات کنترل فشار سیال ..... ۳۹
- شکل ۳-۲۵: نحوه قرارگیری ساعت اندازه‌گیری بر روی همگام‌کننده ..... ۴۰
- شکل ۳-۲۶: نمونه مسی تمیز شده ..... ۴۰

- شکل ۳-۲۷: نمونه شبکه بندی شده ..... ۴۱
- شکل ۳-۲۸: الف) روانکار مولی اسلیپ ب) نمونه آغشته به روانکار ..... ۴۱
- شکل ۳-۲۹: الف) نیمه بالایی قالب و صفحات قاب بسته شده به صفحه بالای پرس ..... ۴۲
- شکل ۳-۳۰: مسیر بارگذاری روش سنتی در فشار ۱۶ MPa ..... ۴۳
- شکل ۳-۳۱: مسیر بارگذاری روش پیشنهادی در فشار ۱/۵ MPa ..... ۴۴
- شکل ۴-۱: نمونه‌های دریافتی شکسته شده تحت آزمون کشش ..... ۴۸
- شکل ۴-۲: نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمون کشش نمونه‌های دریافتی ..... ۴۸
- شکل ۴-۳: نمونه‌های بازپخت شده شکسته شده تحت آزمون کشش ..... ۴۹
- شکل ۴-۴: نمودار نیرو-جاب‌جایی حاصل از افزایش طول سنج و فاصله سنج ..... ۵۰
- شکل ۴-۵: مقایسه نمودار نیرو-جاب‌جایی حاصل از تحلیل المان محدود ..... ۵۱
- شکل ۴-۶: نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمون کشش نمونه‌های بازپخت شده ..... ۵۱
- شکل ۴-۷: کرنش معادل ایجاد شده در نمونه در لحظه گلویی شدن ..... ۵۲
- شکل ۴-۸: نمودار نیرو-جاب‌جایی میانگین تحلیل المان محدود آزمون کشش ..... ۵۳
- شکل ۴-۹: مقایسه نمودار نیرو-جاب‌جایی میانگین حاصل از تحلیل المان محدود ..... ۵۳
- شکل ۴-۱۰: مسیر بارگذاری روش سنتی در فشار ۳۰ MPa ..... ۵۴
- شکل ۴-۱۱: توزیع ضخامت روش سنتی تحت فشار ۳۰ MPa ..... ۵۵
- شکل ۴-۱۲: مسیر بارگذاری روش پیشنهادی در فشار ۱۴ MPa ..... ۵۵
- شکل ۴-۱۳: توزیع ضخامت روش پیشنهادی تحت فشار ۱۴ MPa ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۴: ارتفاع  $\frac{h}{2}$  نمونه‌ی دریافتی در شکل‌دهی به روش سنتی در فشار ۳۰ MPa ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۵: مسیر بارگذاری روش پیشنهادی در فشار ۲۶ MPa ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۶: توزیع ضخامت روش پیشنهادی تحت فشار ۲۶ MPa ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۷: مسیر بارگذاری روش سنتی در فشار ۲۶ MPa ..... ۵۸

- شکل ۴-۱۸: توزیع ضخامت روش سنتی تحت فشار ۲۶ MPa ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۹: مقایسه ارتفاع  $\frac{h}{2}$  نمونه‌ی دریافتی در شکل‌دهی به روش سنتی ..... ۵۹
- شکل ۴-۲۰: توزیع ضخامت روش سنتی تحت فشار ۱۶ MPa ..... ۶۰
- شکل ۴-۲۱: توزیع ضخامت روش پیشنهادی تحت فشار ۱/۵ MPa ..... ۶۰
- شکل ۴-۲۲: ارتفاع  $\frac{h}{2}$  نمونه‌ی بازپخت‌شده در شکل‌دهی به روش سنتی در فشار ۱۶ MPa ..... ۶۱
- شکل ۴-۲۳: مسیر بارگذاری روش پیشنهادی در فشار ۱۲ MPa ..... ۶۱
- شکل ۴-۲۴: توزیع ضخامت روش پیشنهادی تحت فشار ۱۲ MPa ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۵: مسیر بارگذاری روش سنتی در فشار ۱۲ MPa ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۶: توزیع ضخامت روش سنتی تحت فشار ۱۲ MPa ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۷: مقایسه ارتفاع  $\frac{h}{2}$  نمونه‌ی بازپخت‌شده در شکل‌دهی به روش سنتی ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۸: نمونه‌ی تولیدشده به روش هیدروفرمینگ سنتی در فشار ۱۲ MPa ..... ۶۴
- شکل ۴-۲۹: نمونه‌ی تولیدشده به روش هیدروفرمینگ پیشنهادی در فشار ۱۲ MPa ..... ۶۴
- شکل ۴-۳۰: مقایسه ارتفاع h نمونه‌های دریافتی (الف) روش سنتی با فشار ۳۰ MPa ..... ۶۵
- شکل ۴-۳۱: مقایسه ارتفاع h نمونه‌های بازپخت‌شده (الف) روش سنتی با فشار ۱۶ MPa ..... ۶۵

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه مورد آزمایش ..... ۱۴
- جدول ۲-۲: مشخصات شبکه‌بندی اجزای مدل ..... ۲۱
- جدول ۱-۳: شرایط آزمایش‌های شکل‌دهی ..... ۴۴
- جدول ۱-۴: خواص مکانیکی نمونه‌های دریافتی ..... ۴۹
- جدول ۲-۴: خواص مکانیکی ماده‌ی بازپخت‌شده ..... ۵۲
- جدول ۳-۴: مقایسه نتایج تحلیل المان محدود و آزمون تجربی نمونه دریافتی ..... ۶۶
- جدول ۴-۴: مقایسه نتایج تحلیل المان محدود و آزمون تجربی نمونه بازپخت‌شده ..... ۶۶

## فهرست نشانه‌ها

$F$	نیرو
$P$	فشار سیال
$A$	سطح اثر فشار
$V$	حجم سیال
$E$	مدول الاستیک
$m$	جرم سیال
$\sigma$	تنش حقیقی
$\varepsilon$	کرنش حقیقی
$\varepsilon_p$	کرنش پلاستیک
$\rho$	چگالی سیال



## فصل ۱ مقدمه

امروزه بهبود عملکرد خودروها در مواردی مانند افزایش ایمنی، کاهش مصرف سوخت و ... از طرفی، و کاهش هزینه‌های تولید خودرو از طرفی دیگر، از مسائل روز صنعت خودروسازی در دنیا می‌باشد. از این رو خودروسازان تلاش می‌کنند تا با استفاده از مواد و روش‌های جایگزین، این مسائل را کمرنگ‌تر سازند. یکی از روش‌های کاهش مصرف سوخت در خودروها، کاهش وزن خودرو می‌باشد، هیدروفرمینگ لوله<sup>۱</sup> به دلیل ایجاد نسبت استحکام به وزن بالاتر نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی مرسوم، بسیار مورد توجه خودروسازان قرار گرفته است. با وجود اینکه فرآیند هیدروفرمینگ بیش از شش دهه قدمت دارد اما تنها سه دهه از زمان ورود این فرآیند به صنعت خودرو سازی گذشته است. به طور کلی از این فرآیند در شکل‌دهی قطعات لوله‌ای شکل خودرو مانند قطعات اگزوز، قطعات شاسی، فریم‌های رادیاتور، میل‌لنگ و میل‌بادامک، محورهای جلو و عقب، فریم‌های صندلی و نگه‌دارنده موتور استفاده می‌شود. علاوه بر این، از این فرآیند برای شکل‌دهی ورق، مانند قطعات بدنه خودرو و ... نیز استفاده می‌شود که به آن هیدروفرمینگ ورق<sup>۲</sup> گفته می‌شود. همچنین فرآیند هیدروفرمینگ در صنایع هوایی، ساخت بدنه دوچرخه، ساخت اتصالات لوله و ... نیز کاربرد دارد که در شکل ۱-۱ نمونه‌هایی از این کاربردها آورده شده است.

---

<sup>۱</sup> Tube Hydroforming (THF)

<sup>۲</sup> Sheet Hydroforming (SHF)



شکل ۱-۱: کاربردهای مختلف هیدروفرمینگ (الف) ترمپت (ب) فریم دوچرخه (ج) قطعات شیرآلات (د) اتصالات لوله

### ۱-۱- هیدروفرمینگ لوله

هیدروفرمینگ لوله فرآیندی است جهت ایجاد مقاطعی پیچیده در لوله که اغلب به وسیله روش‌های شکل‌دهی مرسوم امکان پذیر نیست. در این روش فشار بالای سیال داخل لوله عامل شکل‌دهی است. این روش برای اولین بار توسط گری و همکاران [۱] در سال ۱۹۴۰ برای شکل‌دهی لوله سهراهی مورد استفاده قرار گرفت.

از نقاط قوت هیدروفرمینگ لوله نسبت به فرآیندهای سنتی مرسوم می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۲، ۳].

۱. یکپارچگی قطعه (قطعات چند تکه‌ای که به روش فرآیند مهرزنی تولید، و سپس به روش جوشکاری به هم متصل می‌شوند را با استفاده از این روش می‌توان به صورت یکپارچه تولید کرد.)

۲. کاهش وزن قطعات به دلیل امکان تولید لوله با هندسه مقاطع بهینه‌تر و کنترل ضخامت در نواحی مختلف

۳. بهبود استحکام و چقرمگی قطعات تولیدی به دلایل ذکر شده در بالا

۴. کاهش هزینه ساخت قالب به دلیل قطعات کمتر قالب



۵. کاهش مراحل تولید (به عنوان مثال با استفاده از این روش، نیازی به جوشکاری در ساخت مقاطع با هندسه پیچیده نیست، همچنین می‌توان عملیاتی مانند سوراخ کاری را در حین فرآیند هیدروفرمینگ انجام داد که این فرآیند را سوراخ کاری هیدروفرمینگ<sup>۱</sup> می‌نامند).

۶. تولید قطعات با ابعاد دقیق‌تر و کاهش برگشت فنی

۷. کاهش دور ریز مواد در حین تولید

فرآیند هیدروفرمینگ نقاط ضعفی نیز دارد که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است:

۱. زمان طولانی انجام فرآیند و سرعت کم تولید

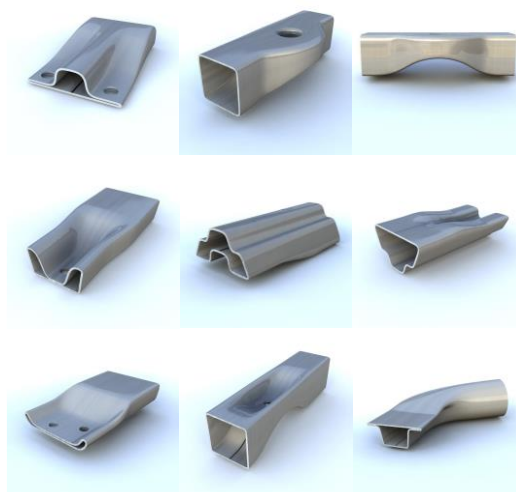
۲. تجهیزات گران قیمت

۳. نیاز به دانش گسترده برای انجام فرآیند و تولید قالب

### ۱-۱-۱- فرآیند هیدروفرمینگ لوله

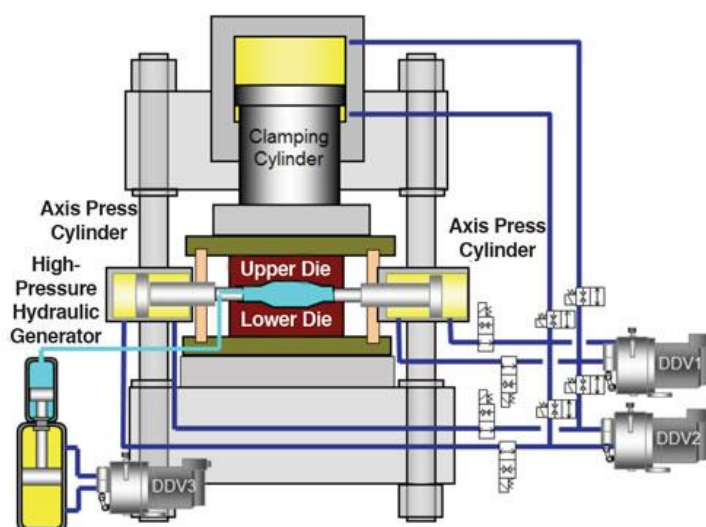
به کمک فرآیند هیدروفرمینگ لوله می‌توان لوله را با هندسه مقاطع پیچیده‌ای که بعضی وقت‌ها ممکن است در طول لوله دچار تغییر شوند شکل‌دهی کرد. در حقیقت بزرگترین وجه تمایز هیدروفرمینگ نسبت به فرآیند اکستروژن همین تغییر هندسه مقاطع در طول یک قطعه می‌باشد، چرا که شکل‌دهی هندسه‌های پیچیده مقاطع به صورت پیوسته و بدون تغییر به روش اکستروژن نیز امکان‌پذیر است. در شکل ۱-۲ نمونه‌هایی از مقاطع شکل‌دهی شده به روش هیدروفرمینگ آورده شده است.

<sup>۱</sup> Hydropiercing



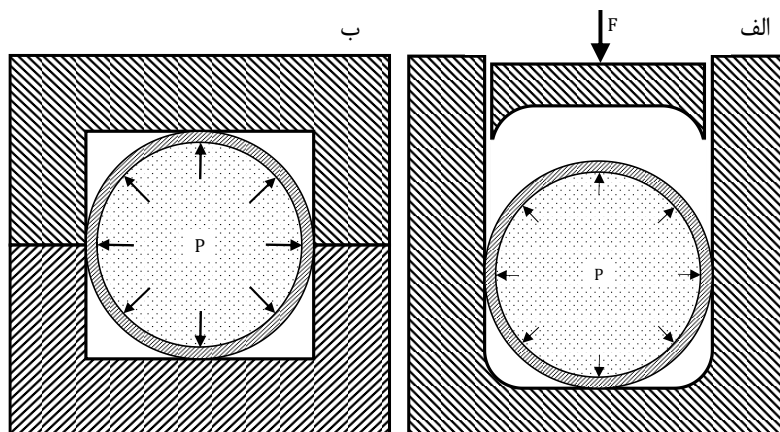
شکل ۲-۱: نمونه‌ای از مقاطع شکل‌دهی شده به روش هیدروفرمینگ

در شکل ۳-۱ اصول کلی فرآیند هیدروفرمینگ آورده شده است. همان طور که مشخص است در ابتدای فرآیند قطعه‌کار که معمولاً لوله‌ای شکل (ممکن است در مواردی قطعه‌کار در فرآیندهای دیگری تحت عملیات پیش‌فرم قرار گرفته باشد) می‌باشد درون نیمه‌ای از قالب قرار می‌گیرد و سپس قالب به وسیله پرس بسته می‌شود. قطعه‌کار به وسیله سنبه از هر دو جهت در تماس با جک‌های هیدرولیک قرار می‌گیرد و آب‌بندی و تغذیه محوری در طول فرآیند به کمک این جک‌ها صورت می‌گیرد. بعد از آن لوله تحت فشار سیال منبسط می‌شود و شکل حفره قالب را به خود می‌گیرد. آب به همراه افزودنی‌های ضد خوردگی معمولاً سیال مورد استفاده در این فرآیند می‌باشد. اما در مواردی از سیالات دیگر مانند گاز داغ نیز استفاده شده است [۴].



شکل ۳-۱: شماتیک فرآیند هیدروفرمینگ [۵]

شکل دهی هیدروفرمینگ لوله به دو صورت کم فشار<sup>۱</sup> و پرفشار<sup>۲</sup> انجام می شود. در فرآیند هیدروفرمینگ لوله کم فشار شکل ۱-۴-الف، لوله قبل از اینکه قالب هیدروفرم بسته شود، از سیال کم فشار پر می شود، در مرحله بعد قسمت فوقانی پرس به سمت پایین حرکت می کند، ایجاد تغییر شکل در لوله موجب افزایش فشار سیال تراکم ناپذیر داخل لوله و انبساط لوله درون حفره قالب می شود، این روند تا بسته شدن کامل قالب ادامه می یابد. به دلیل اینکه در این حالت در حین افزایش فشار، قالب به طور کامل بسته نیست، برای جلوگیری از پارگی لوله افزایش فشار محدود می باشد و به همین دلیل این فرآیند هیدروفرمینگ کم فشار نامیده می شود. در این فرآیند ممکن است به دلیل فشار کم سیال، لوله به طور کامل حفره قالب را پر نکند و مقدار برگشت فنری زیاد باشد اما توزیع ضخامت یکنواخت تر خواهد بود. در فرآیند هیدروفرمینگ پرفشار شکل ۱-۴-ب، در ابتدا قالب به طور کامل بسته شده، سپس فشار سیال توسط دستگاه افزایش یافته و در نتیجه لوله منبسط می شود و شکل قالب را به خود می گیرد. در این روش به دلیل بسته بودن فضای قالب می توان از فشار بیشتری استفاده نمود. به همین دلیل این فرآیند هیدروفرمینگ پرفشار نامیده می شود. در این روش برگشت فنری کمتر و انبساط لوله بیشتر است اما توزیع ضخامت غیر یکنواخت تر است زیرا به دلیل فشار بالای درون لوله، اصطکاک لوله و سطح قالب افزایش یافته و لوله به صورت یکنواخت درون حفره قالب جریان پیدا نمی کند. به همین دلیل کنترل فرآیند هیدروفرمینگ پرفشار از هیدروفرمینگ کم فشار دشوارتر است [۶].



شکل ۱-۴: روش های انجام فرآیند هیدروفرمینگ (الف) کم فشار (ب) پرفشار

<sup>۱</sup> Low Pressure Tube Hydroforming (LPTH)

<sup>۲</sup> High Pressure Tube Hydroforming (HPTH)

## ۲-۱-۱- پارامترهای موثر در فرآیند هیدروفرمینگ

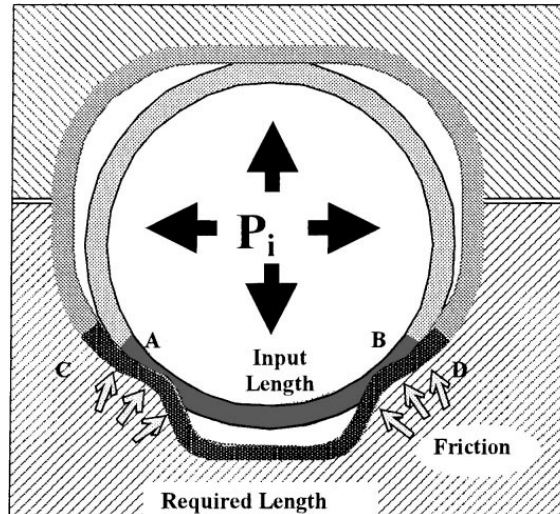
شکل‌دهی لوله با استفاده از هیدروفرمینگ به پارامترهای مختلفی وابسته است، عدم کنترل و انتخاب نادرست این پارامترها موجب بروز مشکلاتی نظیر چروکیدگی<sup>۱</sup>، خمیدگی<sup>۲</sup>، ترکیدگی<sup>۳</sup> و یا نازک شدگی بیش از حد لوله می‌شود. بنابراین برای تولید محصول سالم باید به پارامترهای مختلفی از قبیل تغذیه محوری، فشار سیال، شرایط روانکاری، هندسه قالب، و خصوصیات و شکل‌پذیری قطعه‌کار اولیه توجه داشت [۷]. هر یک از این پارامترها نقش موثری در شکل‌دهی قطعه نهایی دارند. تغذیه محوری برای جلوگیری از نازک شدن لوله در زمانی که درون قالب منبسط می‌شود در نظر گرفته می‌شود، اگر مقدار این تغذیه بیش از حد باشد موجب ایجاد چروکیدگی در لوله و اگر مقدار آن ناکافی باشد موجب کاهش ضخامت و حتی گسیختن دیواره لوله می‌شود همچنین در صورت افزایش سریع فشار سیال، لوله دچار ترکیدگی و در صورت افزایش کند آن موجب ایجاد چروکیدگی در لوله می‌شود بنابراین لازم است تا فشار سیال به صورت متناسب با تغذیه محوری اعمال شود.

روانکاری و شرایط اصطکاکی خصوصاً زمانی که فرآیند با تغذیه محوری همراه است یکی از مسائل مهم در فرآیند هیدروفرمینگ به حساب می‌آید، وجود روانکار در این شرایط باعث کاهش اصطکاک، چسبندگی، سایش ابزار و نیروی محوری می‌شود. علاوه بر این همان‌طور که در شکل ۱-۵ قابل مشاهده است، روانکاری در مرحله پرشدن گوشه‌های قالب نیز بسیار حیاتی است زیرا در این شرایط به علت بالا بودن فشار درون لوله و افزایش اصطکاک، امکان جریان یافتن مواد کاهش می‌یابد، این امر موجب کاهش غیر یکنواخت ضخامت در لوله و گسیختگی آن می‌شود [۸].

<sup>۱</sup> Wrinkling

<sup>۲</sup> Buckling

<sup>۳</sup> Bursting



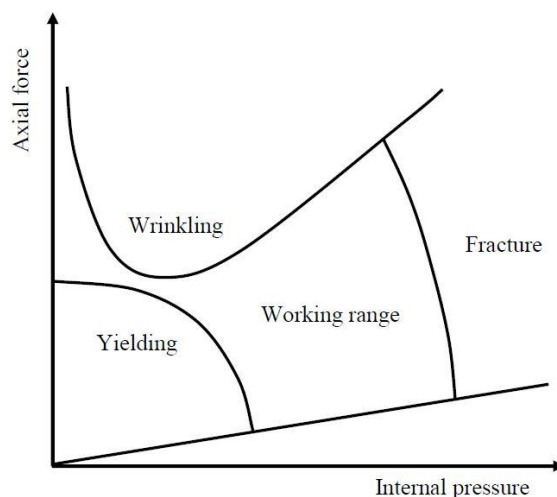
شکل ۵-۱: شرایط اصطکاکی در هیدروفرمینگ لوله، مقطع AB از قطعه کار اولیه به دلیل وجود اصطکاک تحت کشش قرار گرفته و به مقطع CD تبدیل می‌شود [۸].

خصوصیات و قابلیت شکل‌پذیری مواد اولیه از دیگر پارامترهای تاثیرگذار می‌باشد، زیرا مواد با خصوصیات مختلف نیازمند مسیرهای بارگذاری متفاوتی می‌باشند. خصوصیات لوله نظیر مواد تشکیل‌دهنده، قابلیت جوشکاری، تنش تسلیم، استحکام نهایی، درصد ازدیاد طول و تنش سیلان از عوامل تاثیرگذار در فرآیند می‌باشند [۸].

تحلیل المان محدود فرآیند، با توجه به تعدد پارامترهای تاثیرگذار بر آن یکی از راه‌های موثر برای کاهش هزینه و صرف زمان کمتر و همچنین بررسی امکان‌پذیری یک طراحی می‌باشد. به کمک آن می‌توان تاثیر تغییر در پارامترهایی نظیر تغذیه محوری و فشار داخلی و ... را مشاهده کرد و مسیر بارگذاری مناسب و مقادیر دیگر متغیرها را پیش‌بینی نمود.

## ۲-۱- پیشینه تحقیق

افزایش استفاده از این فرآیند در سال‌های اخیر و تلاش برای بهبود خواص محصولات تولید شده به وسیله آن، در کنار تعدد پارامترهای تاثیرگذار بر فرآیند موجب شده است که تحقیقات زیادی در این زمینه، هم به صورت تحلیل المان محدود و هم آزمایش‌های تجربی، برای بهبود شکل‌دهی انجام شود. اصنافی [۹] در سال ۱۹۹۹ دیاگرامی ارائه کرد که در آن محدوده‌ای برای تولید محصول بدون عیب مشخص شده است. او متوجه شد که وقوع چروکیدگی، شکست و تسلیم در قطعه، وابسته به تغذیه محوری و فشار داخلی می‌باشد. دیاگرام ارائه شده وی در شکل ۶-۱ قابل مشاهده است.

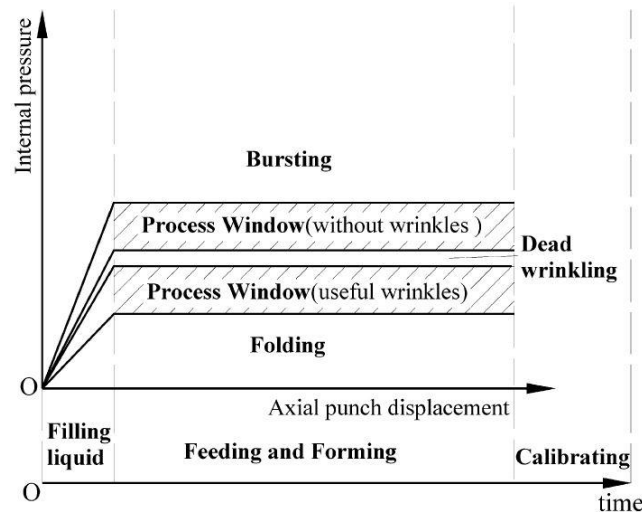


شکل ۶-۱: محدوده کاری پیشنهادی توسط اصنافی [۹]

در سال ۲۰۰۲ ترانا [۱۰] در تحلیل‌های المان محدود خود نشان داد که انجام عملیات پیش‌فرم به وسیله بسته شدن قالب در حین فرآیند هیدروفرمینگ به شکل قابل ملاحظه‌ای موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود. وی همچنین استفاده از منحنی حد کشش بر پایه تنش<sup>۱</sup> را انتخاب مناسب‌تری نسبت به منحنی حد کشش<sup>۲</sup>، برای پیش‌بینی رفتار ماده در طول شبیه‌سازی دانست. کنگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۵ اثر اندازه بر شکل‌پذیری لوله را مورد بررسی قرار دادند، آنها دریافتند که افزایش قطر لوله در یک فرآیند خاص باعث کاهش نازک‌شدگی و وابستگی فرآیند به تغذیه محوری می‌شود و همچنین با کاهش قطر لوله، فشار داخلی نقش کمتر و تغذیه محوری نقش بیشتری را در جلوگیری از نازک‌شدگی ایفا می‌کنند. در سال ۲۰۰۷ یوان و همکاران [۱۲] به بررسی چروکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ پرداختند. مطالعات آنها نشان داد که ایجاد چروکیدگی به وسیله فشار تغذیه در بخشی از لوله در مرحله شکل‌دهی اولیه می‌تواند به پرشدن بهتر قالب هیدروفرمینگ کمک کند، با وجود این که این روش توزیع ضخامت نامتوازن‌تری در محصول ایجاد می‌کند اما می‌تواند در شکل‌دهی مواد با خصوصیات شکل‌پذیری کم مفید باشد. در شکل ۷-۱ محدوده کاری حاصل از این روش با روش سنتی مقایسه شده است.

<sup>۱</sup> Forming Limit Stress Diagram (FLSD)

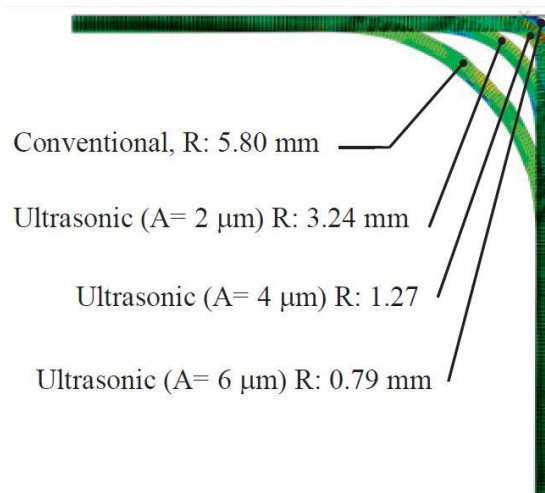
<sup>۲</sup> Forming Limit Diagram (FLD)



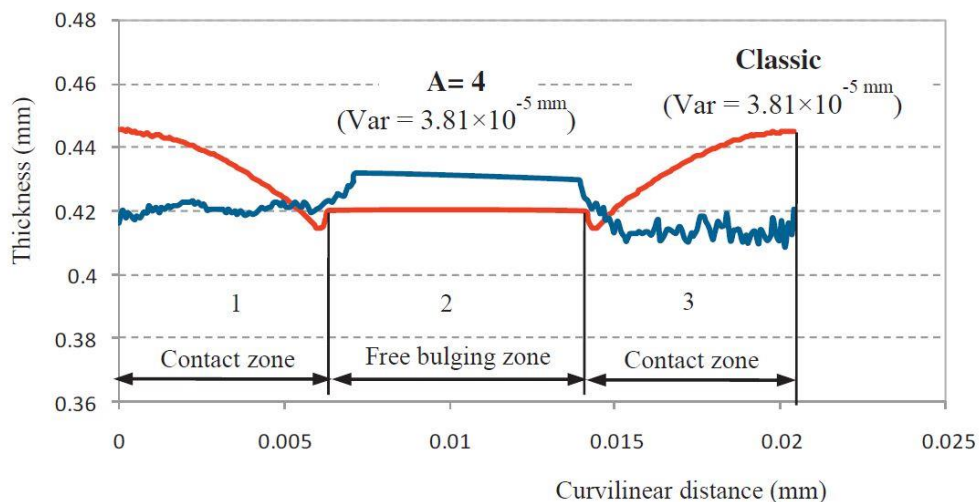
شکل ۱-۷: مقایسه محدوده کاری روش یوان و حالت سنتی [۱۲]

در همان سال موری و همکاران [۱۳] اثر فشار نوسانی را بر فرآیند هیدروفرمینگ مورد مطالعه قرار دادند. در آزمایش آنها مشخص شد که استفاده از فشار داخلی نوسانی موجب شکل‌گیری یکنواخت‌تر لوله، جلوگیری از نازک‌شدگی منطقه‌ای و همچنین توزیع ضخامت مطلوب‌تر می‌شود. محمدی و موسوی [۱۴] در سال ۲۰۰۹ برای پیدا کردن مسیر بارگذاری مناسب برای شکل‌دهی اتصالات مسی از کنترل فازی استفاده کردند. در پژوهش آنها مشخص شد با افزایش فشار داخلی و کاهش تغذیه محوری احتمال وقوع چروکیدگی کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش تغذیه محوری و کاهش فشار داخلی احتمال وقوع نازک‌شدگی منطقه‌ای (گلوبی شدن) کاهش می‌یابد. بنابراین با استفاده از بهینه‌سازی می‌توان به مسیر بارگذاری مناسب برای هیدروفرمینگ قطعات پیچیده دست یافت. ایمان‌نژاد و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۰ به بهینه‌سازی مسیر بارگذاری برای شکل‌دهی اتصالات سه‌راهی پرداختند، آنها دریافتند که برای بهبود شکل‌دهی باید بخش قابل ملاحظه‌ای از تغذیه محوری، بعد از رسیدن ماده به نقطه تسلیم تحت فشار داخلی، اعمال شود. در سال ۲۰۱۳ فیورنتینو و همکاران [۱۶] روش جدیدی را جهت تخمین اصطکاک در فرآیند هیدروفرمینگ ارائه دادند. آنها با استفاده از تحلیل المان محدود، اصطکاک را به عنوان تابعی از ضخامت نهایی لوله تعریف کردند و سپس با استفاده از تابع به دست آمده در نتایج تجربی، ضریب اصطکاک را محاسبه کردند. مشخص شد که این روش پیش بینی دقیقی از ضریب اصطکاک فرآیند ارائه می‌دهد و همچنین مشخص شد که دقت این روش به سطح تماس قالب و لوله (شرایط روانکاری و فشار نرمال سطح) بستگی داشته و عوامل دیگر در آن تاثیرگذار نخواهد بود. شهری و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۴ تاثیر ارتعاشات التراسونیک بر هیدروفرمینگ لوله با مقطع مربعی

را به صورت تحلیل المان محدود بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ارتعاشات التراسونیک موجب کاهش استحکام تسلیم مواد شده و به پرشدگی بهتر گوشه های قالب و توزیع تنش یکنواخت تر کمک می کند، هر چند افزایش بیش از حد دامنه این ارتعاشات موجب کاهش یکنواختی سطح و توزیع غیریکنواخت ضخامت خواهد شد. در شکل ۸-۱ و شکل ۹-۱ اثر این ارتعاشات بر پرشدگی گوشه قالب و توزیع ضخامت قابل مشاهده است.



شکل ۸-۱: مقایسه شعاع پرشدگی گوشه قالب حاصل از هیدروفرمینگ به روش ارتعاشات التراسونیک در دامنه های مختلف و روش سنتی [۱۷]



شکل ۹-۱: مقایسه توزیع ضخامت لوله حاصل از ارتعاشات التراسونیک (آبی) با روش سنتی (قرمز) [۱۷] در سال ۲۰۱۵ بیهاتما و همکاران [۱۸] بهینه سازی هیدروفرمینگ لوله آلومینیومی با شکل پیچیده را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که بعضی فرآیندهای پیش فرم موجب کاهش ضخامت منطقه ای نمونه می شوند که این امر می تواند باعث ایجاد عیوب در مرحله هیدروفرمینگ شود. همچنین



آن‌ها دریافتند به کمک تغذیه محوری در هیدروفرمینگ لوله‌ها با اشکال پیچیده در نقاط خم شده نمیتوان از نازک‌شدگی جلوگیری کرد و در این شرایط استفاده از لوله با ضخامت موضعی بیشتر، می‌تواند مناسب باشد. در همان سال هاشمی و همکاران [۱۹] پیش‌بینی میزان پرشدگی قالب در فرآیند هیدروفرمینگ لوله در دمای بالا را به وسیله معیارهای مختلف شکست نرم مورد مطالعه قرار دادند. آنها با مقایسه نتایج با آزمایش‌های تجربی، دریافتند که در دمای بالا، معیار آيادا<sup>۱</sup> دقیق‌ترین پیش‌بینی را از ارتفاع قسمت منبسط شده ارائه می‌دهد. همچنین گزارش دادند که افزایش دما موجب افزایش شکل‌پذیری، تسریع وقوع ترکیدگی در لوله و کاهش ارتفاع قسمت منبسط شده لوله می‌شود. در همان سال لیو و همکاران [۲۰] مقدار کمینه فشار داخلی لازم برای جلوگیری از چروکیدگی لوله سهراهی جدار نازک را محاسبه نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که برای جلوگیری از چروکیدگی با افزایش نسبت قطر به ضخامت لوله، فشار داخلی بیشتری مورد نیاز است و با افزایش ضریب استحکام  $k$  و یا کاهش توان کرنش سختی  $n$  می‌توان با چروکیدگی مقابله کرد.

### ۳-۱- ساختار پایان‌نامه

با توجه به رشد روزافزون صنعت خودرو و هوافضا و تلاش برای ساخت قطعات بهینه با استحکام بالاتر و وزن کمتر، نیاز به تحقیق و پژوهش در زمینه روش‌های ساخت و تولید مورد استفاده در این صنایع امری ضروری است. فرآیند هیدروفرمینگ لوله به عنوان یک فرآیند موثر در افزایش نسبت استحکام به وزن قطعات، مدت زیادی است که در داخل و خارج کشور مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های هیدروفرمینگ مورد استفاده در حال حاضر، نتیجه حذف محدودیت‌ها و مشکلات استفاده از این فرآیند در طی تحقیقات و آزمایش‌های فراوان می‌باشد، با این وجود به دلیل پیچیدگی آن و وجود پارامترهای تاثیرگذار متعدد، تلاش و تحقیقات و ارائه روش‌های جدید شکل‌دهی به کمک سیال جهت بهبود شکل‌پذیری و بهینه‌سازی فرآیند همچنان ادامه دارد. در این پایان‌نامه امکان افزایش شکل‌پذیری لوله مسی به قطر ۳۵ mm و ضخامت ۱/۲۵ mm در دو حالت دریافتی<sup>۲</sup> و بازپخت‌شده<sup>۳</sup> در فرآیند هیدروفرمینگ با ترکیب روش هیدروفرمینگ کم‌فشار و پرفشار و همچنین بازشدن قالب در حین انجام

<sup>۱</sup> Ayada

<sup>۲</sup> As received

<sup>۳</sup> Annealed

فرآیند مورد بررسی قرار می‌گیرد. تفاوت روش پیشنهادی این پایان‌نامه و روش سنتی در مسیر بارگذاری (شامل باز و بسته شدن قالب، مسیر حرکت و میزان جابه‌جایی سنبه تغذیه و مسیر اعمال فشار سیال داخلی) می‌باشد. به این منظور تحلیل المان محدود و آزمون تجربی این فرآیند به دو روش سنتی و پیشنهادی این پایان‌نامه انجام، و نتایج آن‌ها مقایسه می‌شود.

پایان‌نامه حاضر شامل پنج فصل می‌باشد. در فصل اول مقدمه‌ای راجع به فرآیند، ویژگی‌ها و پارامترهای موثر در آن آورده شده است. همچنین اشاره‌ای به پژوهش‌های پیشین در این زمینه و اهداف این پایان‌نامه شده است. فصل دوم به تحلیل المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ اختصاص دارد. در فصل سوم به روش تجربی انجام فرآیند هیدروفرمینگ و آزمون کشش پرداخته شده است. در فصل چهارم، نتایج تحلیل المان محدود و آزمون تجربی ارائه شده است و در فصل پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار آورده شده است.

## فصل ۲ تحلیل المان محدود<sup>۱</sup> فرآیند

ظهور نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در سه دهه اخیر باعث رشد و پیشرفت سریع علوم در زمینه‌های مختلف شده‌است. این نرم‌افزارها با استفاده از روش المان محدود مدل‌های پیچیده را با اعمال متغیرهای گوناگون و حتی جزئی‌ترین متغیرهای محیطی تحلیل می‌کنند و پیش‌بینی خوبی از آنچه در واقعیت اتفاق خواهد افتاد به کاربر ارائه می‌دهند. از پرکاربردترین این نرم‌افزارها می‌توان به آباکوس<sup>۲</sup>، انسیس<sup>۳</sup>، ال‌اس‌دایناس<sup>۴</sup> و ... اشاره کرد. به وسیله‌ی این نرم‌افزارها می‌توان تاثیر تغییر پارامترهای مختلف در یک فرآیند را مورد بررسی قرار داد علاوه بر این نیاز به آزمون‌های سعی و خطا از بین خواهد رفت و با استفاده از بهینه‌سازی می‌توان به بهترین روش انجام فرآیند پی برد. همچنین فرد می‌تواند قبل از صرف هزینه و سرمایه‌گذاری در یک طرح، امکان‌پذیر بودن آن را بررسی کند. به این ترتیب نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به طور موثری موجب صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌گردند.

نرم‌افزار آباکوس یکی از کامل‌ترین نرم‌افزارهای تحلیل المان محدود است که علاوه بر تحلیل مسائل مکانیک جامدات، قادر به حل مسائل مربوط به اکوستیک، انتقال جرم، انتقال حرارت، سیالات و ... نیز می‌باشد.

---

<sup>۱</sup> Finite Element Analysis (FEA)

<sup>۲</sup> ABAQUS

<sup>۳</sup> ANSYS

<sup>۴</sup> LS-DYNA

در این پایان نامه از نسخه ۶,۱۴ آباکوس برای تحلیل المان محدود فرآیندها استفاده شد.

### ۲-۱- تحلیل آزمون کشش

یکی از عوامل تاثیرگذار بر نتایج حاصل از تحلیل المان محدود هر فرآیند نحوه اعمال خصوصیات مواد در مدل سازی می باشد. خواص کشسان و مومسان از آزمون کشش تک محوره به دست آمد. برای اطمینان از خواص استخراج شده از نتایج آزمون کشش، تحلیل المان محدود همین آزمون برای ماده در حالت دریافتی و بازپخت شده انجام شد که مراحل انجام آن در ادامه آورده شده است.

#### ۲-۱-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی ماده

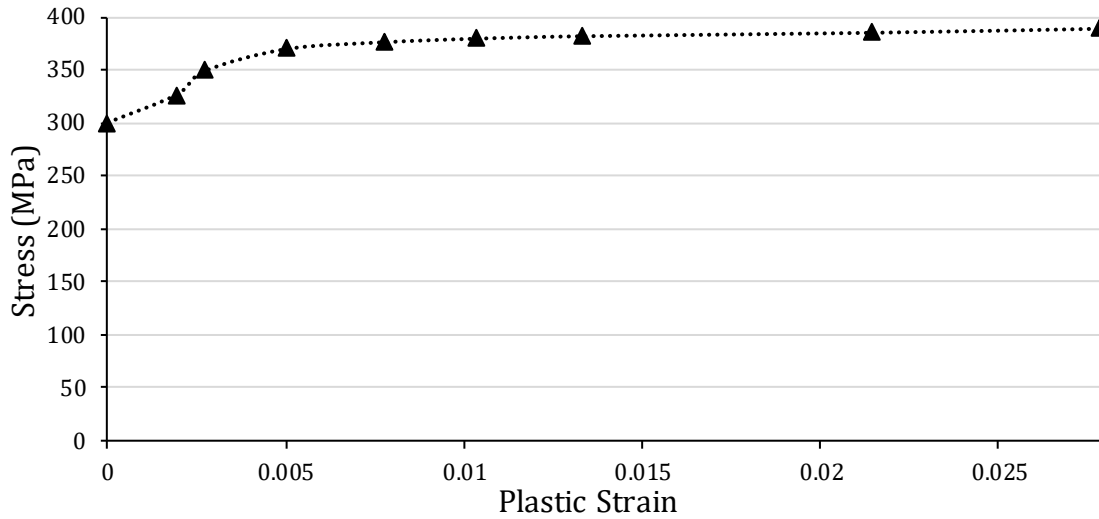
لوله مورد استفاده در این پایان نامه ساخت کارخانه مس قائم می باشد، که خواص فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۱-۲ آورده شده است. همچنین مقادیر کرنش پلاستیک با استفاده از رابطه (۱-۲) از نتایج آزمون کشش محاسبه شد. نمودار تنش و کرنش پلاستیک در شکل ۱-۲ آورده شده است.

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (1-2)$$

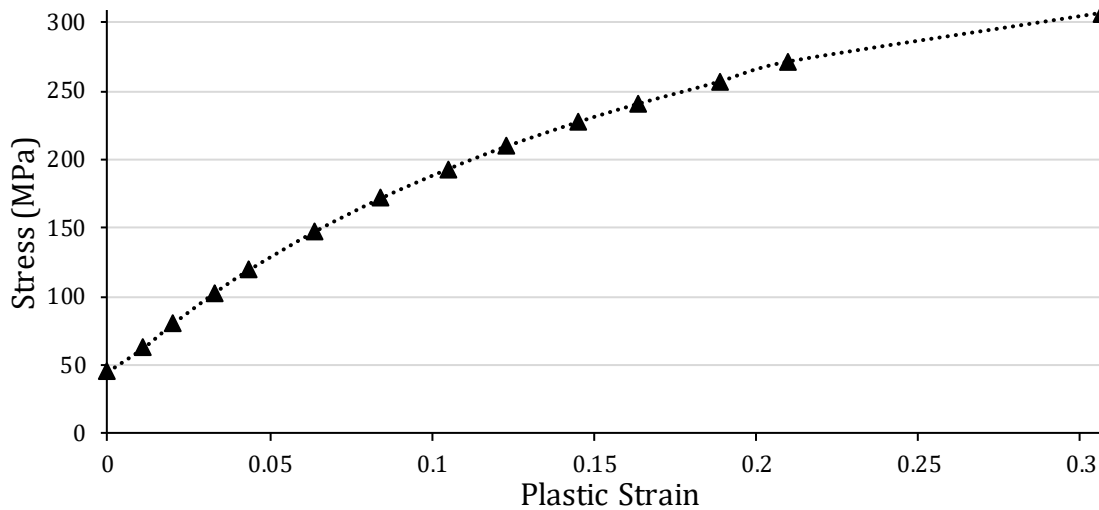
در این رابطه  $\varepsilon_p$  کرنش پلاستیک،  $\varepsilon$  کرنش حقیقی،  $\sigma$  تنش حقیقی و  $E$  مدول الاستیک نمونه می باشد.

جدول ۱-۲: خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه مورد آزمایش

چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)	ترکیب شیمیایی (%)		ماده
			Cu	P	
۹/۸	۰/۳۳	۱۱۷	۹۹/۹۰	۰/۰۱۵ - ۰/۰۴۰	Cu 12200



الف



ب

شکل ۲-۱: تنش و کرنش پلاستیک استخراج شده از آزمون کشش تک محوره الف) نمونه دریافتی ب) نمونه بازپخت شده

### ۲-۱-۲- مدل سازی هندسی

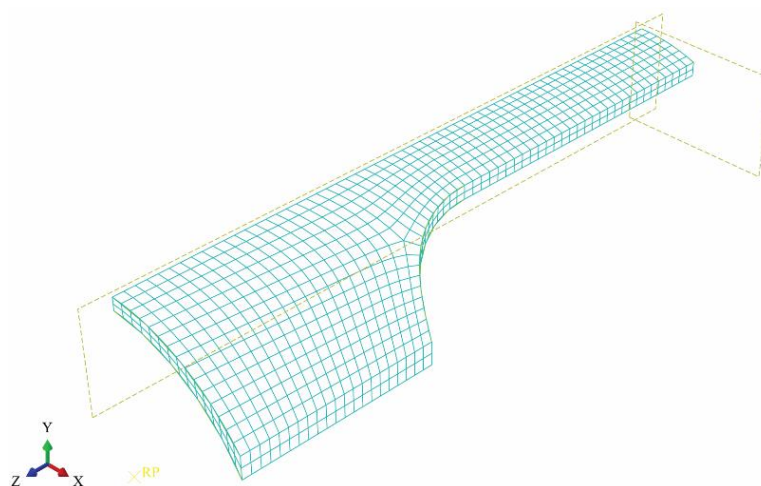
نمونه‌ی آزمون کشش مطابق با ابعاد آورده شده در شکل ۳-۱، از نوع سه بعدی شکل پذیر و به صورت توپر<sup>۱</sup> مدل سازی شد. جهت ساده سازی و کاهش زمان حل و به دلیل وجود تقارن در نمونه (صفحه XY و YZ)، فقط یک چهارم نمونه در نظر گرفته شد که در شکل ۲-۲ قابل مشاهده است. همچنین از مدل سازی فک های ورق گیر به دلیل عدم تاثیر بر نتایج تحلیل صرف نظر شده است.

<sup>۱</sup> Solid

در بخش تعیین گام، حل گر ضمنی انتخاب و خروجی‌های مورد نیاز جهت بررسی تعریف می‌شود. از جمله این خروجی‌ها می‌توان به خروجی طول گیج و خروجی نیرو اشاره نمود.

در ادامه شرایط مرزی (قیود ناشی از تقارن) به قطعه اعمال شده و با تعریف قید جابه‌جایی برای انتهای قطعه، شرایط آزمون کشش، شبیه‌سازی شد. با توجه به نتایج آزمون عملی، جابه‌جایی انتهای نمونه به اندازه‌ای تعریف شد (برای نمونه دریافتی  $2/5 \text{ mm}$  و برای نمونه بازپخت‌شده  $14 \text{ mm}$ ) که از وقوع گلوبی در نمونه اطمینان حاصل شود.

برای رسیدن به شبکه‌بندی مناسب و متقارن نمونه تست کشش به بخش‌های کوچکتر تقسیم و به صورت جداگانه شبکه‌بندی شد. همچنین المان‌ها از نوع C3D8R انتخاب شده و اندازه المان<sup>۱</sup> برابر با ۱ در نظر گرفته شد و تعداد ۱۱۶۴ المان تشکیل شد. در شکل ۲-۲ هندسه و نحوه شبکه‌بندی نمونه قابل مشاهده است.



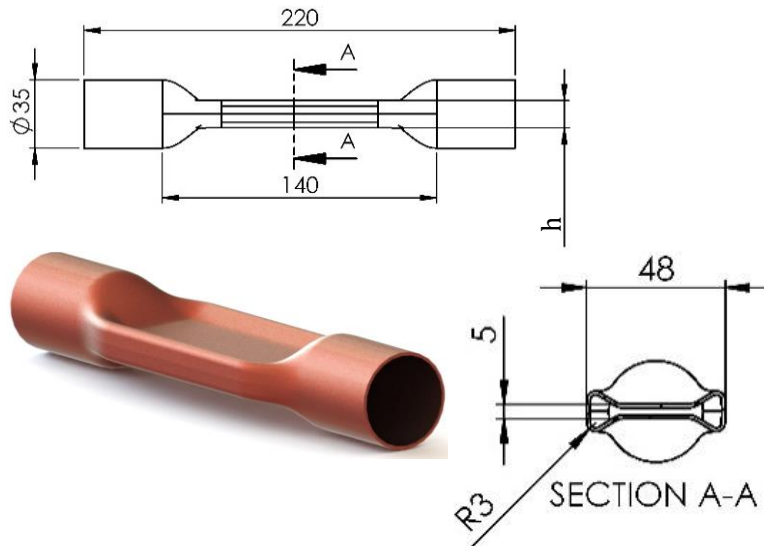
شکل ۲-۲: هندسه و نحوه شبکه‌بندی نمونه

## ۲-۲- تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ لوله

پس از حصول اطمینان از صحت نتایج استخراج‌شده از آزمون کشش برای خواص الاستیک و پلاستیک، تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ لوله انجام شد.

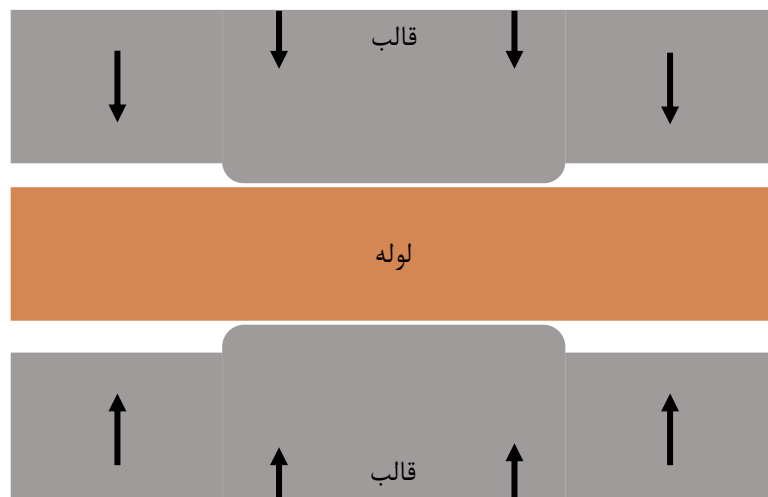
<sup>۱</sup> Approximate Global Size

در شکل ۳-۲ شکل نهایی لوله و ابعاد آن قابل مشاهده است. ارتفاع برآمدگی قسمت میانی لوله با  $h$  نشان داده شده است. مقدار  $h$  در قالب طراحی شده برابر با  $14\text{ mm}$  در نظر گرفته شده است. مقدار  $h$  بزرگتر در نمونه‌های شکل‌دهی شده، نشان‌دهنده پرشدگی بیشتر گوشه‌های قالب می‌باشد.

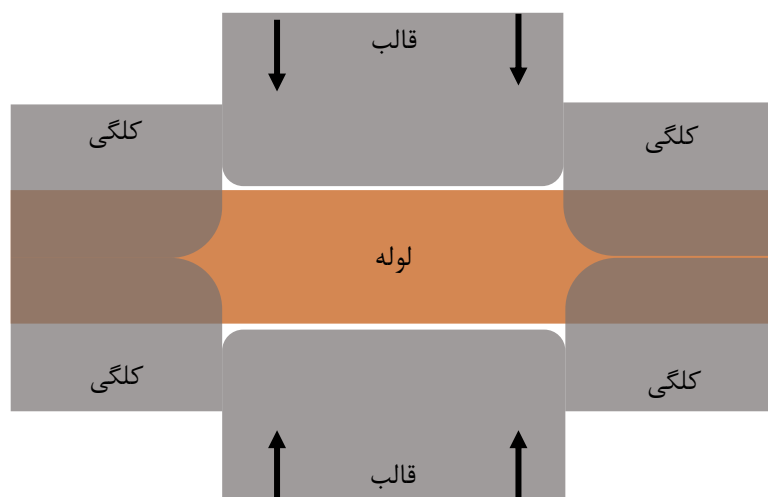


شکل ۳-۲: شکل نهایی لوله و ابعاد آن

برای انجام این فرآیند در روش سنتی هیدروفرمینگ تنها به دو نیمه قالب نیاز می‌باشد، تصویر شماتیک آن در شکل ۴-۲ آورده شده است، در روش سنتی هیدروفرمینگ، ابتدا دو نیمه قالب بسته می‌شوند و در مرحله بعد، فشار سیال داخلی، شکل‌دهی لوله را تکمیل می‌کند. اما در روش پیشنهادی، قالب در حالی که فشار سیال داخل لوله بالا است باز می‌شود، در صورتی که در فشار بالا سطح قالب از دو انتهای لوله جدا شود، لوله منبسط شده و از سنبه‌های تغذیه فاصله می‌گیرد، این امر موجب از دست رفتن آب‌بندی و فشار سیال داخل لوله شده و امکان انجام ادامه فرآیند نخواهد بود. بنابراین لازم است تا هر نیمه قالب شامل یک قسمت میانی و یک قسمت کلگی باشد. در شکل ۵-۲ شماتیک قالب مورد نیاز برای انجام فرآیند به روش پیشنهادی قابل مشاهده است.



شکل ۲-۴: شماتیک روش سنتی فرآیند هیدروفرمینگ



شکل ۲-۵: شماتیک روش پیشنهادی فرآیند هیدروفرمینگ

به منظور کاهش محاسبات و زمان حل، باتوجه به تقارن موجود در فرآیند، فقط یک هشتم اجزای قالب و لوله شبیه سازی شد. اجزای قالب و لوله و نحوه مدل سازی هر کدام در ادامه آورده شده است.

۱- بخش میانی قالب (اینسرت<sup>۱</sup>): حفره مورد نظر شکل دهی در این بخش از قالب قرار گرفته است. این بخش به صورت پوسته صلب ناپیوسته<sup>۲</sup> مدل شد.

<sup>۱</sup> Insert

<sup>۲</sup> Discrete

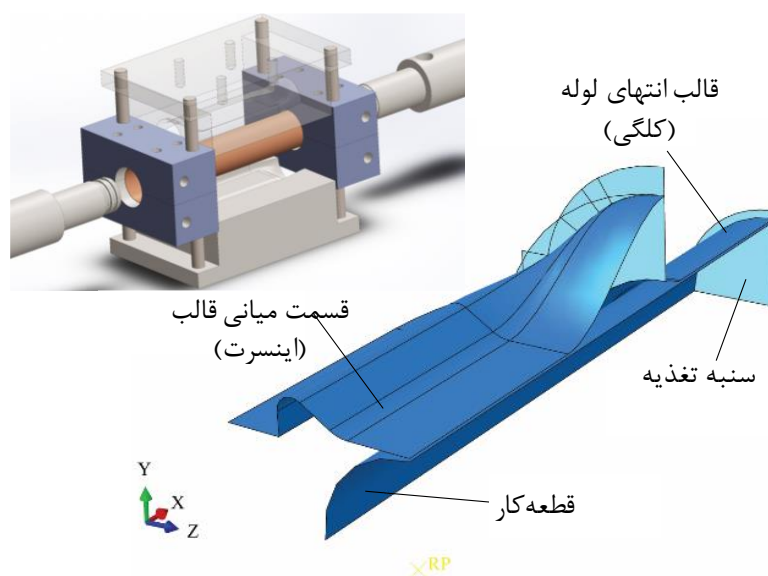


۲- قالب انتهایی لوله (کلگی)<sup>۱</sup>: این بخش در ابتدا و انتهای لوله قرار می‌گیرد و از انبساط لوله در این بخش‌ها جلوگیری می‌کند. این بخش نیز مانند بخش میانی به صورت پوسته صلب ناپیوسته مدل شد.

۳- سنبه تغذیه<sup>۲</sup>: این بخش وظیفه تغذیه لوله به داخل قالب در حین شکل‌دهی را دارد. سنبه‌ی تغذیه به وسیله‌ی یک صفحه صلب تحلیلی در نظر گرفته شد.

۴- قطعه‌کار: قطعه‌کار به صورت پوسته‌ی شکل‌پذیر مدل‌سازی شد.

در شکل ۶-۲ نحوه قرار گرفتن اجزای مدل شده در کنار هم قابل مشاهده است. المان‌های پوسته‌ای با ۷ نقطه انتگرال‌گیری در مقطع و به ضخامت ۱/۲۵ mm انتخاب شد.



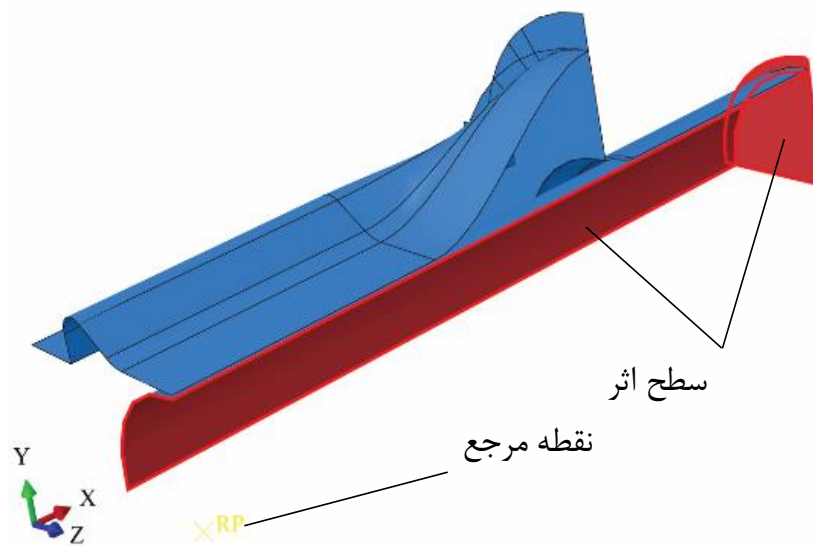
شکل ۶-۲: نحوه قرار گرفتن اجزای مدل شده در کنار هم

سیال داخل لوله و تغییرات فشار آن به کمک حفره سیال<sup>۳</sup> مدل‌سازی و سطح اثر و نقطه مرجع آن تعریف و ضرایب مورد نیاز آن با توجه به خصوصیات سیال مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی اعمال شد [۲۱, ۲۲]. در شکل ۷-۲ سطح اثر و نقطه مرجع تعریف شده نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Head

<sup>۲</sup> Feed

<sup>۳</sup> Fluid Cavity



شکل ۲-۷: سطح اثر و نقطه مرجع برهم کنش حفره سیال

برای حل مسئله، حل گر دینامیک/ صریح مورد استفاده قرار گرفت. با آزمون و خطاهای انجام شده و مقایسه انرژی جنبشی و انرژی داخلی با یکدیگر مشخص شد که اعمال زمان گام  $0/1$  ثانیه و همچنین مقیاس جرمی<sup>۱</sup> با ضریب  $100$  برای کل مدل مناسب خواهد بود. خروجی مربوط به ضخامت ورق برای بررسی نازک شدگی و تغییر ضخامت ورق به عنوان خروجی های میدانی<sup>۲</sup> و خروجی نیرو و جابه جایی قالب میانی، فشار سیال و حجم سیال داخل لوله، نیرو و جابه جایی سنبه تغذیه به عنوان خروجی های وابسته به زمان<sup>۳</sup> تعریف شد. اصطکاک تمامی سطوح از نوع کولمبی<sup>۴</sup> با ضریب  $0/06$  تعیین شد [۲۳].

شرایط مرزی مربوط به تقارن لوله و درجات آزادی آن در راستاهای مختلف، نحوه جابه جایی بخش میانی قالب و سنبه تغذیه در نقطه مرجع آنها و شرط مرزی فشار حفره سیال که بیان گر فشار سیال داخل لوله در طول فرآیند می باشد تعریف شد. به منظور انجام مقایسه و بررسی میزان بهبود شکل دهی، تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ برای دو روش سنتی و پیشنهادی این پایان نامه انجام شد. تفاوت این دو روش در مسیر باز و بست قالب، مسیر حرکت و میزان جابه جایی سنبه تغذیه و مسیر اعمال فشار سیال داخلی می باشد.

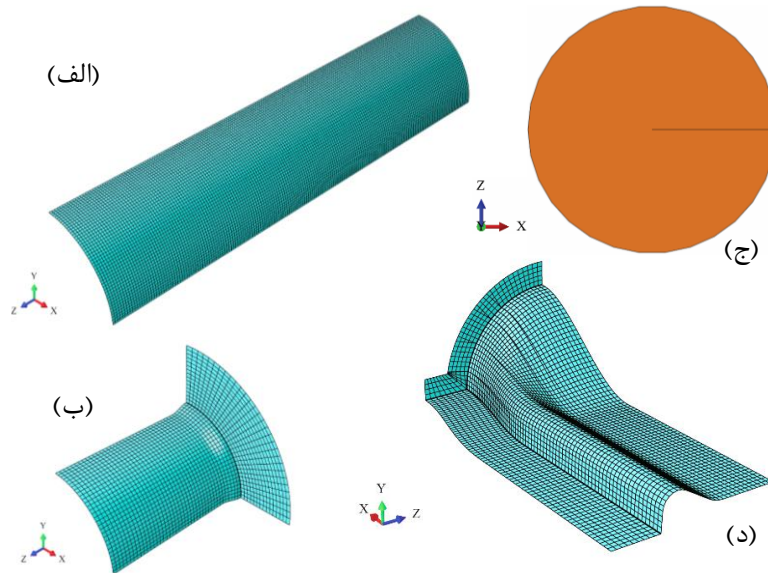
<sup>۱</sup> Mass Scaling

<sup>۲</sup> Field Output

<sup>۳</sup> History Output

<sup>۴</sup> Tangential Behavior

در شکل ۸-۲ نحوه شبکه‌بندی اجزای مدل قابل مشاهده است. همچنین در جدول ۲-۲ مشخصات شبکه‌بندی اجزای مختلف مدل از قبیل اندازه، نوع و تعداد المان آورده شده است.



شکل ۸-۲: شبکه‌بندی قسمت‌های مختلف مدل (الف) لوله (ب) بخش انتهایی قالب (ج) سنبه تغذیه (د) بخش میانی قالب

جدول ۲-۲: مشخصات شبکه‌بندی اجزای مدل

تعداد المان	اندازه المان	نوع المان	قطعه
۸۲۳۵	۰/۶	S4R	لوله
۱۷۴۰	۱	R3D4	بخش انتهایی قالب
۳۵۳۱	۱	R3D4	بخش میانی قالب

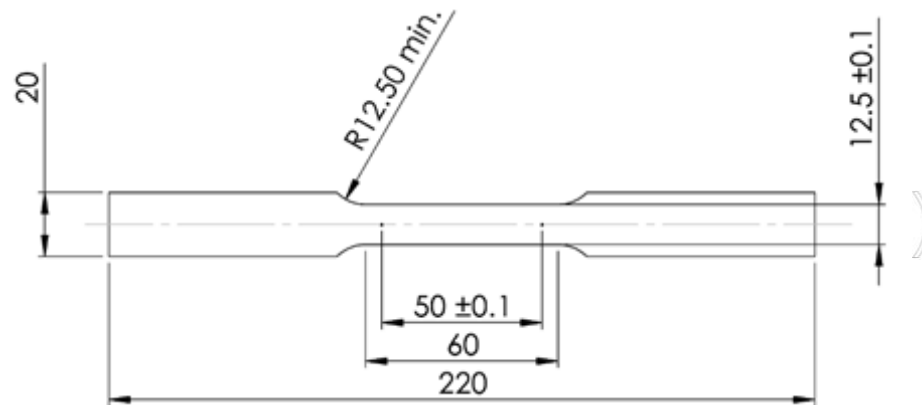


### فصل ۳ روش آزمایشگاهی

در این فصل، ابتدا ماده مورد مطالعه و نحوه استخراج خواص مکانیکی آن به کمک آزمون کشش معرفی می‌شود سپس مراحل طراحی و ساخت قالب شرح داده می‌شود، تجهیزات مورد استفاده در فرآیند هیدروفرمینگ معرفی می‌شود و دست آخر روش انجام فرآیند هیدروفرمینگ و اندازه‌گیری‌های انجام شده روی نمونه شکل داده‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۱-۳- آماده سازی مواد اولیه برای آزمون کشش

برای انجام آزمون کشش، نمونه‌ها با توجه به استاندارد ASTM E 8M-00b [۲۴] آماده‌سازی شدند. برای افزایش دقت نتایج، شش نمونه تهیه شد سپس سه نمونه تحت عملیات بازپخت قرار گرفت. در شکل ۱-۳ ابعاد نمونه تست کشش آورده شده‌است. جهت ماشینکاری پروفیل مورد نظر، از ماشین فرز CNC مدل 4 Series II Interact شرکت Bridgeport استفاده شد. جهت سهولت در انجام ماشینکاری و همچنین ساخت نمونه‌های متقارن، تمامی ۶ نمونه روی هم قرار گرفته و با هم ماشینکاری شد. در شکل ۲-۳ نحوه گیره بندی نمونه روی ماشین قابل مشاهده است.



شکل ۱-۳: ابعاد نمونه آزمون کشش با توجه به استاندارد ASTM E 8M-00b



شکل ۲-۳: نحوه گیره‌بندی نمونه

پس از انجام ماشینکاری، ۳ عدد از نمونه‌ها در دمای  $550^{\circ}\text{C}$ ، به مدت ۲۵ دقیقه تحت عملیات بازپخت قرار گرفتند سپس از کوره خارج شده و در دمای اتاق سرد شدند [۲۵].

در شکل ۳-۳ الف یک نمونه دریافتی بعد از پلیسه‌گیری و تمیزشدن نشان داده شده و شکل ۳-۳ ب نمونه بازپخت شده‌ای را نشان می‌دهد که طول سنجه در آن مشخص شده و لبه‌های آن جهت مقیدشدن در فک‌های دستگاه کشش تخت شده است.



شکل ۳-۳: نمونه‌های آماده‌شده برای آزمون کشش (الف) نمونه دریافتی (ب) نمونه بازپخت‌شده

## ۳-۲- آزمون کشش

ماشین‌های انجام آزمون کشش انواع گوناگونی دارند اما همه آنها شامل تجهیزات مشابهی نظیر بخش گیره‌بندی، بخش اعمال نیرو، بخش سنجش نیرو، جابه‌جایی و ... می‌باشند. در این پایان‌نامه از دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ استفاده شد که در شکل ۳-۴ قابل مشاهده است.

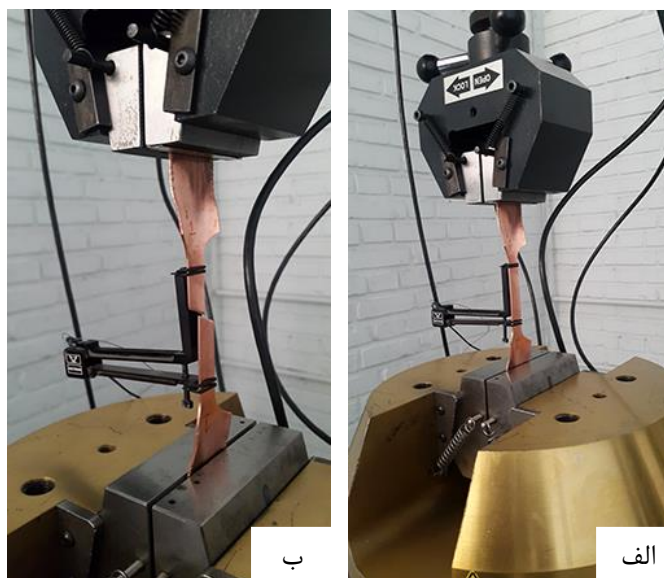


شکل ۳-۴: دستگاه آزمون کشش اینسترون ۸۸۰۲

برای گیره‌بندی با توجه به نوع نمونه و آزمون، فک بالایی دستگاه از نوع مکانیکی و فک پایینی از نوع هیدرولیکی انتخاب شد همچنین برای اندازه‌گیری دقیق تغییر طول در ناحیه مورد نظر از افزایش طول سنج<sup>۱</sup> استفاده شد. همچنین سرعت کشش  $0.32 \text{ mm/s}$  در نظر گرفته شد. شکل ۳-۵-الف نحوه قرارگیری نمونه و استفاده از افزایش طول سنج را نشان می‌دهد. در شکل ۳-۵-ب تصویر نمونه، در پایان آزمون آورده شده است.

در انتهای هر آزمون داده‌های خروجی شامل مقادیر نیرو، جابه‌جایی فک‌ها و جابه‌جایی افزایش طول سنج به صورت فایل متنی ذخیره شد.

<sup>۱</sup> Extensometer



شکل ۳-۵: الف) نحوه قرارگیری نمونه ب) شکست نمونه در پایان آزمون

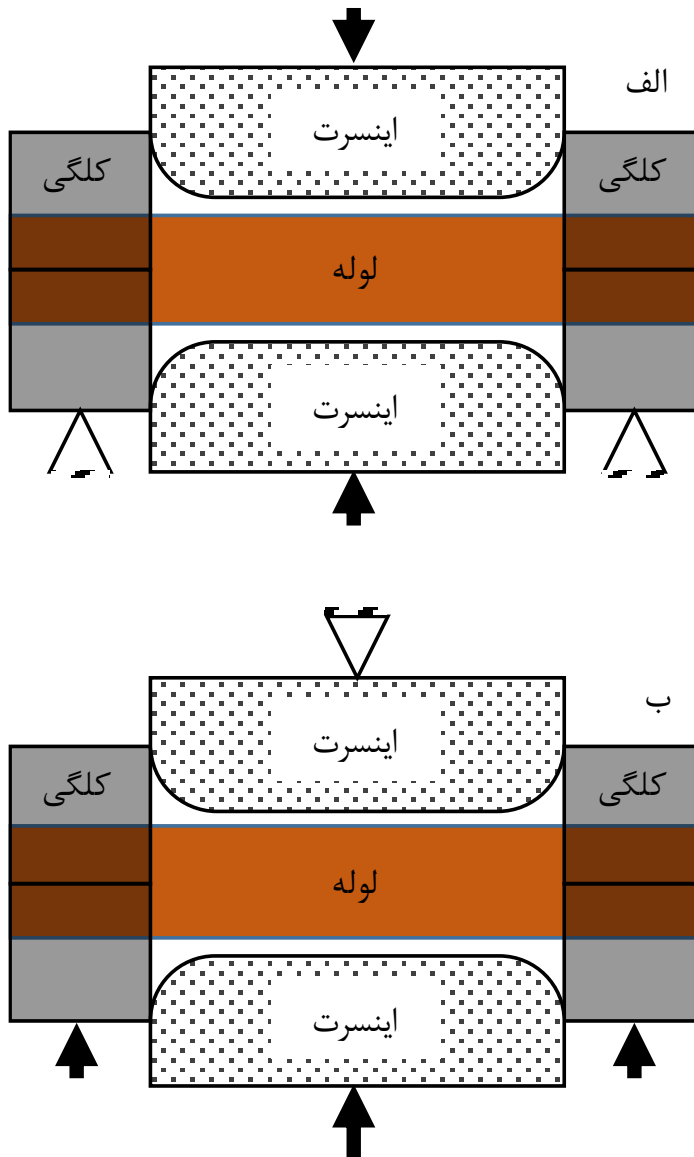
### ۳-۳- طراحی و ساخت قالب

پس از انجام تحلیل المان محدود و حصول اطمینان از ابعاد قالب، قسمت‌های مختلف قالب طراحی شد. در طراحی قالب تلاش شد که اجزای قالب به گونه‌ای طراحی شوند که با کمترین هزینه و جایگزین کردن چند جز، تغییر کاربری قالب امکان‌پذیر باشد. با توجه به هندسه متقارن پروفیل لوله، همانطور که در شکل ۳-۶-الف قابل مشاهده است، لازم بود تا قالب از سمت بالا و پایین به طور همزمان و به یک میزان بسته شود. برای این منظور لازم است تا قالب‌های کلگی ثابت و قالب‌های اینسرت بالا و پایین به وسیله عملگرهای همگام<sup>۱</sup> بسته شوند تا تقارن لوله حفظ شود. در صورت استفاده از پرس برای بستن مجموعه قالب نمی‌توان از تقارن لوله اطمینان حاصل نمود. علاوه بر این نمی‌توان از صفحه پرس، هم به عنوان تکیه‌گاه اجزای ثابت و هم به عنوان وارد کننده نیرو به اجزای متحرک استفاده نمود. بنابراین سازوکار چهارمیله‌ای طراحی شد که با استفاده از آن بتوان با پرس موجود فرآیند را انجام داد. این سازوکار چهارمیله‌ای علاوه بر سنکرونیزه کردن اینسرت‌ها و حفظ تقارن، تکیه‌گاه مناسب را برای بخش‌های ثابت اجزای قالب فراهم می‌کند. با توجه به ثابت بودن یکی از صفحات پرس، جابه‌جایی اجزای قالب پس از اعمال سازوکار چهارمیله‌ای به صورت شکل ۳-۶-ب انجام می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود اینسرت بالایی به صفحه بالایی پرس مقید شده و حرکت صفحه پایینی پرس موجب

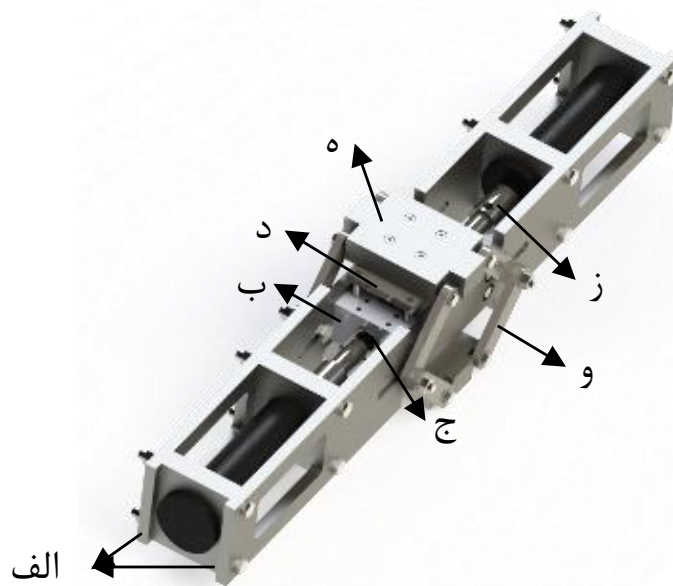
<sup>۱</sup> Synchronize



حرکت اینسرت پایین می‌شود، وجود سازکار چهارمیله‌ای باعث انتقال بخشی از حرکت اینسرت به اجزای ثابت شده و تقارن قالب حفظ می‌شود. در شکل ۳-۷ قالب طراحی شده روی قاب نصب شده‌است. در ادامه، توضیحات مربوط به هر بخش آورده شده‌است.



شکل ۳-۶: شماتیک نحوه بسته شدن قالب هیدروفرمینگ الف) نحوه بسته شدن متقارن با استفاده از عملگرهای همگام ب) نحوه بسته شدن متقارن با استفاده از پرس و سازوکار چهارمیله‌ای



شکل ۳-۷: قالب طراحی شده نصب شده بر روی صفحات قاب الف) صفحات قاب ب) قالب‌های کلگی ج) بوش‌های داخل کلگی د) قالب اینسرت ه) صفحات پشت‌بند اینسرت و) بازوهای سازوکار چهارمیله‌ای ز) سنبه‌های تغذیه

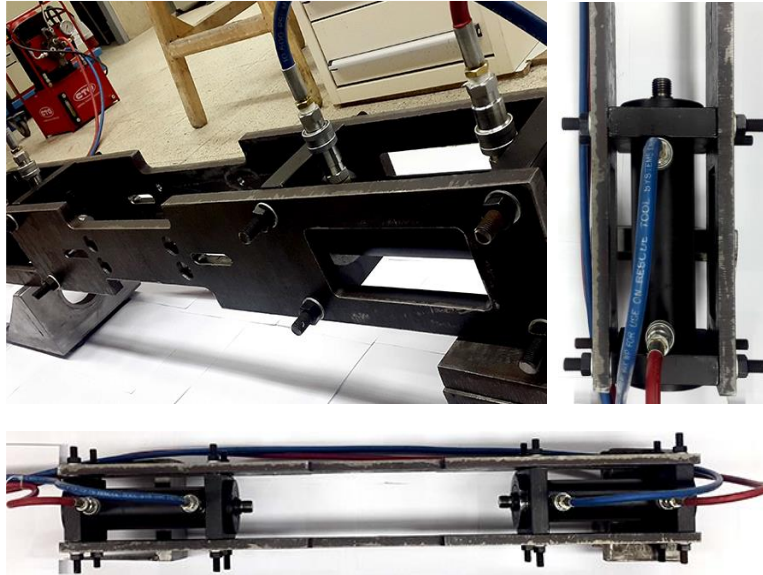
### ۱-۳-۳- صفحات قاب

برای استفاده از جک‌های هیدرولیکی و اعمال نیروی تغذیه محوری لازم است تا جک‌ها بر روی تکیه‌گاهی قرار گیرند. همانطور که در بالا اشاره شد به دلیل سازوکار به‌خصوص قالب در زمان باز و بسته‌شدن نمی‌توان از صفحه پرس به عنوان تکیه‌گاه استفاده نمود. بنابراین صفحات قاب به گونه‌ای طراحی شد که جک‌ها را با حفظ هم‌راستایی مقید سازد. علاوه بر این سوراخ‌هایی بر روی این صفحات تعبیه شد تا قالب‌های کلگی که در طول فرآیند نسبت به این صفحات ثابت هستند بر روی آن مقید شوند. همچنین دو سوراخ لوبیایی به عنوان راهنما برای حفظ تقارن در سازوکار چهارمیله‌ای بر روی صفحات در نظر گرفته شد. شکل ۳-۸ صفحه قاب طراحی شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۸: صفحه قاب طراحی شده

از این مدل دو عدد از جنس فولاد CK45 ساخته و با استفاده از پیچ‌های متری برش خورده سایز M16 گرید ۱۰ به همراه جک‌ها مونتاژ شدند که تصویر آن در شکل ۳-۹ آورده شده است.



شکل ۳-۹: صفحات قاب و جک‌های هیدرولیک تغذیه محوری

### ۳-۳-۲- قالب‌های کلگی

همانطور که در بخش ۲-۲- اشاره شد بخش کلگی از انبساط لوله در طول فرآیند در بخش انتهایی جلوگیری می‌کند. با توجه به هندسه قالب، کلگی به صورت دو کفی بالا و پایین طراحی شد. نیروی جداکننده حاصل از فشار سیال محاسبه شد و با توجه به آن و به اعمال ضریب اطمینان ۲، از چهار پیچ آلنی M12 و رده استحکام 12.9 استفاده شد.

در این رابطه  $F$  نیرو بر حسب نیوتن،  $P$  فشار بر حسب مگاپاسکال و  $A$  سطح اثر فشار بر حسب  $\text{mm}^2$  می‌باشد.

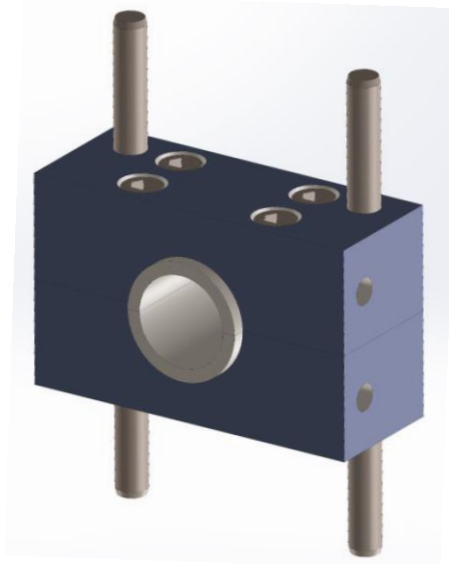
قالب‌های کلگی به وسیله پیچ‌های جانبی به صفحات قاب مقید می‌شوند. برای اطمینان از حرکت صحیح قالب اینسرت، پین‌های راهنما بر روی کلگی تعبیه شدند. به منظور ایجاد امکان استفاده از قالب برای شکل‌دهی نمونه با قطرهای مختلف، سوراخ میانی آن با قطر ۳۸ mm طراحی و از جنس فولاد 34CrNiMo6 ساخته شد. سپس تحت عملیات حرارتی سخت‌کاری شده و جهت ایجاد مقاومت بیشتر در برابر سایش و کاهش ضریب اصطکاک، سطح داخل سوراخ تحت عملیات آبکاری کروم‌سخت قرار گرفت. شکل ۳-۱۰ قالب ساخته شده را به همراه پین‌های راهنما نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۳: قالب کلگی

### ۳-۳-۳- بوش های داخل کلگی

با توجه به سوراخ ۳۸ میلیمتری داخل کلگی‌ها و قطر ۳۵ میلیمتری نمونه مسی، بوش‌هایی برای پر کردن این اختلاف تعبیه شد که در شکل ۱۱-۳ نحوه قرارگیری آن بر روی کلگی قابل مشاهده است.



شکل ۱۱-۳: نحوه قرارگیری بوش داخل کلگی

برای ساخت این بوش‌ها از لوله با جنس فولاد زنگ‌نزن با قطر خارجی ۳۸ mm و قطر داخلی ۳۵ mm که در انتهای آن یک حلقه فولادی جوش داده شده است استفاده شد و بخش داخلی آن برای ایجاد صافی سطح مناسب و یکنواخت، سنباده‌زنی شد. با توجه به انبساط نمونه در انتهای فرآیند و امکان گیر

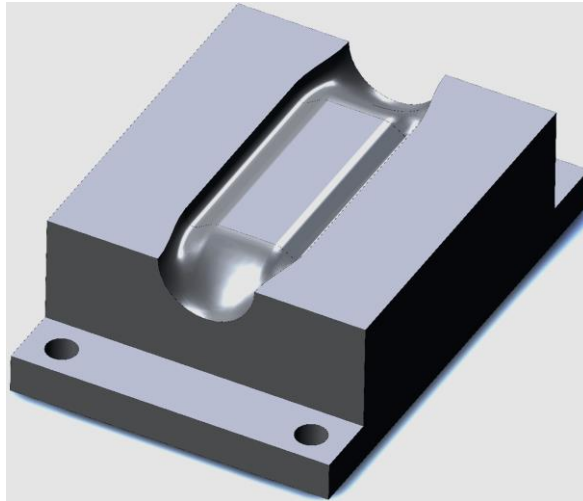
کردن نمونه داخل بوش، بوش ساخته شده از وسط برش خورد و به صورت دو نیمه در داخل کلگی قرار گرفت. شکل ۳-۱۲ بوش ساخته شده از روش فوق را نشان می‌دهد.



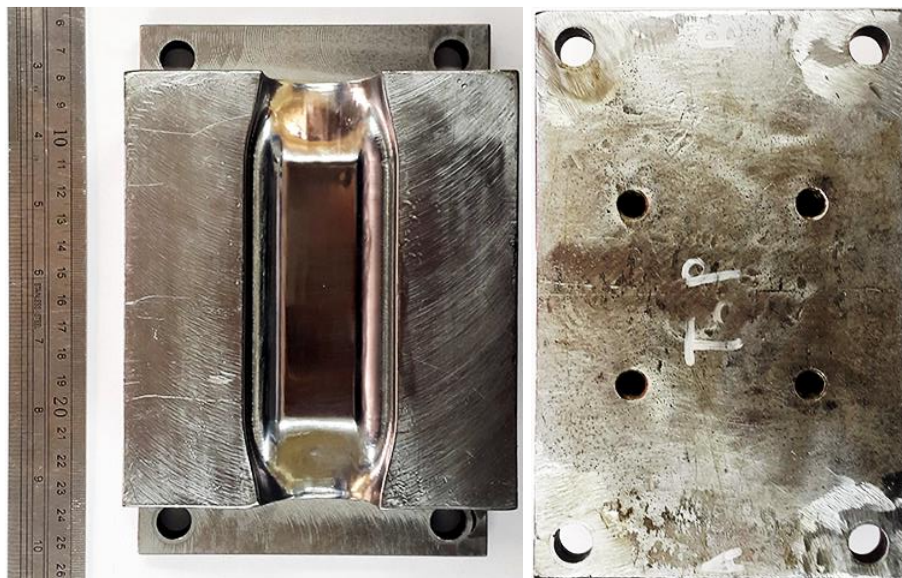
شکل ۳-۱۲: بوش داخل کلگی

#### ۳-۳-۴- قالب‌های اینسرت

در شکل ۳-۱۳ اینسرت طراحی شده قابل مشاهده است، در بخش پشتی اینسرت چهار سوراخ جهت مقید کردن اینسرت به صفحه پشت‌بند در نظر گرفته شد. همچنین چهار سوراخ برای عبور پین‌های راهنما در نظر گرفته شد. مانند بخش کلگی، اینسرت از جنس فولاد 34CrNiMo6 ساخته شد و سپس تحت عملیات حرارتی سختکاری شد و جهت ایجاد مقاومت بیشتر در برابر سایش و کاهش ضریب اصطکاک، سطح داخل حفره تحت عملیات آبکاری کروم‌سخت قرار گرفت که تصویر آن در شکل ۳-۱۴ قابل مشاهده است.



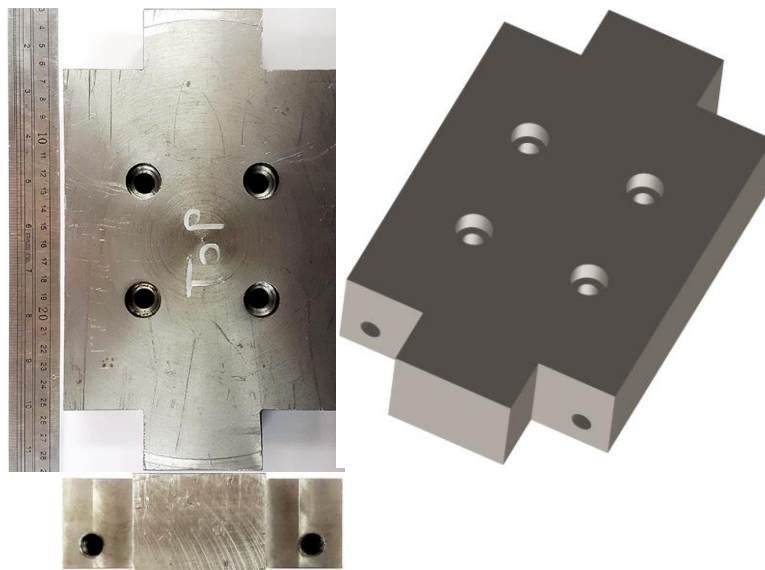
شکل ۳-۱۳: اینسرت طراحی شده



شکل ۳-۱۴: قالب اینسرت

### ۵-۳-۳- صفحات پشت‌بند

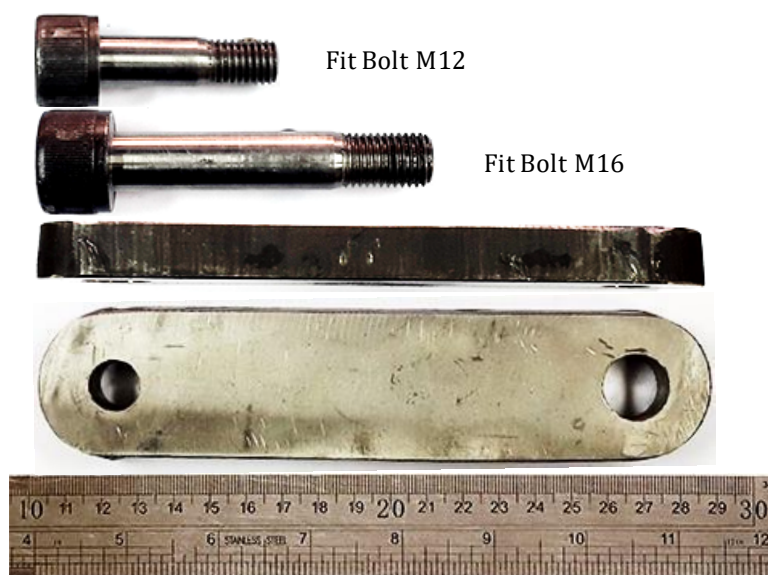
این صفحات که از آن‌ها برای مقید کردن اینسرت‌ها و اتصال سازوکار چهار میله‌ای استفاده می‌شود، پس از طراحی از جنس فولاد CK45 ساخته شد که در شکل ۳-۱۵ آورده شده است.



شکل ۳-۱۵: صفحه پشت‌بند

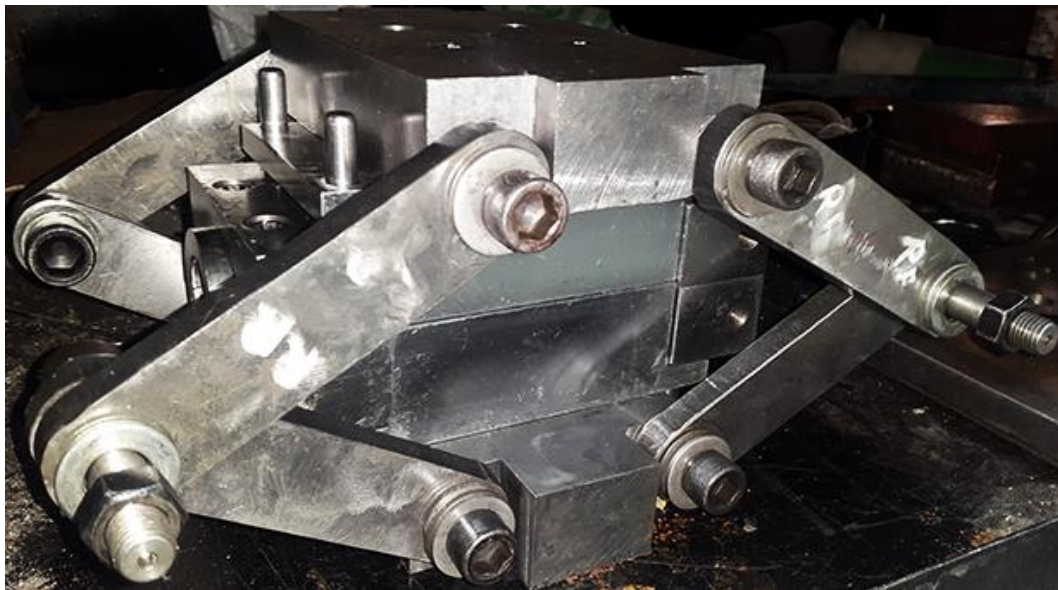
### ۳-۳-۶- سازوکار چهار میله‌ای

بازوها از جنس فولاد 34CrNiMo6 ساخته شد و سپس تحت عملیات حرارتی سختکاری شد و برای اتصال آن‌ها به صفحه پشت‌بند و صفحه قاب از Fit Bolt با اندازه‌های M12 و M16 استفاده شد. شکل ۳-۱۶ اجزای سازوکار چهار میله‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۶: اجزای سازوکار چهار میله‌ای

در شکل ۳-۱۷ اجزای مختلف قالب و نحوه اتصال آن‌ها به یکدیگر قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۷: نحوه اتصال اجزای مختلف قالب

### ۷-۳-۳- سنجه‌های تغذیه

برای جلوگیری از نشتی در طول فرآیند، اورینگ و شیار اورینگ مناسب برای سنجه در نظر گرفته شد، علاوه بر این انتهای نشیمنگاه لوله به شکل مخروطی طراحی شد تا در فشار بالا لوله از آببندی خارج نشود. در شکل ۳-۱۸ بخش‌های مختلف سر سنجه مشخص شده است.



شکل ۳-۱۸: بخش‌های مختلف سر سنجه



سنجه از جنس فولاد 34CrNiMo6 ساخته شد و سپس تحت عملیات حرارتی سختکاری شد. درون سنجه سوراخی جهت انتقال روغن به نمونه در نظر گرفته شد. همچنین جهت اتصال سنجه به جک، در انتهای آن رزوه M27 ایجاد شد. تصویر سنجه در شکل ۱۹-۳ آورده شده است.



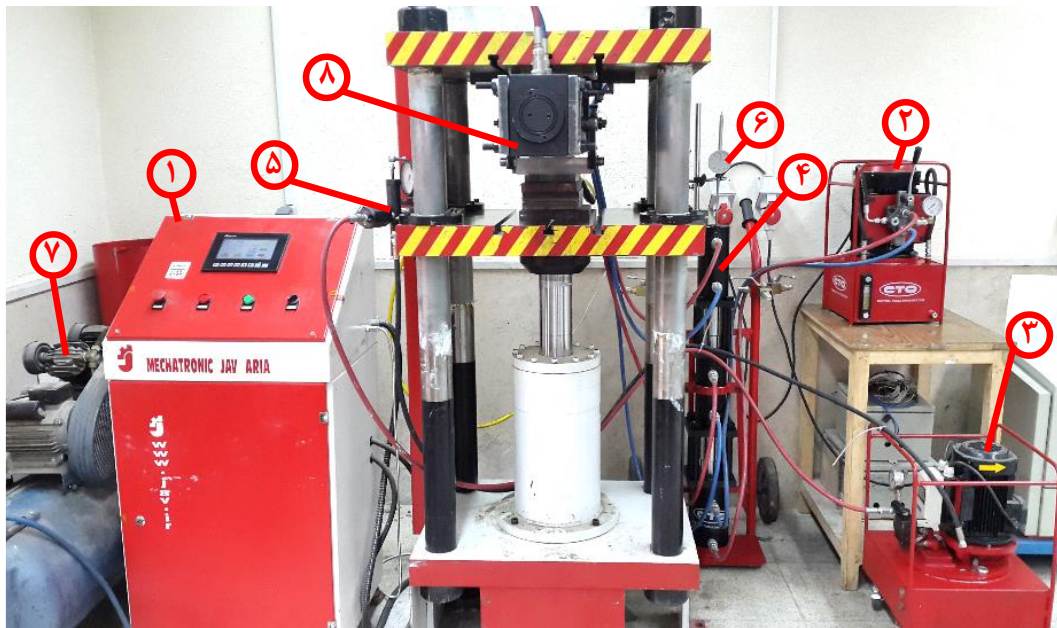
شکل ۱۹-۳: سنجه ساخته شده

#### ۳-۴- تجهیزات مورد استفاده در فرآیند هیدروفرمینگ

شکل ۲۰-۳ نمای کلی از تجهیزات مورد استفاده در فرآیند هیدروفرمینگ را نشان می‌دهد. که عبارتند از:

۱. دستگاه پرس
۲. پمپ هیدرولیک ۳۵۰ bar
۳. پمپ هیدرولیک ۷۰۰ bar
۴. همگام‌کننده<sup>۱</sup>
۵. تجهیزات هیدرولیکی کنترل فشار سیال
۶. ساعت اندازه‌گیری
۷. کمپرسور هوا
۸. مجموعه قالب به همراه جک‌های تغذیه محوری

<sup>۱</sup> Synchronizer



شکل ۳-۲۰: نمای کلی از تجهیزات مورد استفاده در فرآیند هیدروفرمینگ

#### ۱-۴-۳- دستگاه پرس

پرس مورد استفاده در این فرآیند ساخت شرکت مکاترونیک ژاوا آریا و با ظرفیت اسمی ۱۵۰ ton می‌باشد. سرعت حرکت آن قابل کنترل بوده و بین ۰/۱ تا ۱/۱ mm/s می‌باشد. موقعیت صفحات پرس با خطکش دیجیتال تا دقت ۰/۰۰۵ mm قابل اندازه‌گیری است. از این پرس جهت باز و بست قالب در طول فرآیند استفاده می‌شود.

#### ۲-۴-۳- جک‌های هیدرولیک

این جک‌ها ساخت سازمان ابزار مرکزی<sup>۱</sup> بوده و دارای ظرفیت ۱۰ ton و طول کورس ۲۰۰ mm می‌باشد که تصویر آن در شکل ۳-۹ آورده شده است. از این جک‌ها جهت اعمال تغذیه محوری استفاده می‌شود.

#### ۳-۴-۳- پمپ‌های هیدرولیک

در این پژوهش از دو پمپ هیدرولیک ساخت سازمان ابزار مرکزی استفاده شد. در شکل ۳-۲۱ پمپ هیدرولیک ۳۵۰ bar قابل مشاهده است. این پمپ مجهز به یک شیر کنترل جهت می‌باشد و به وسیله آن می‌توان جک‌های هیدرولیکی را کنترل نمود.

<sup>۱</sup> Central Tools Organization (CTO)



شکل ۳-۲۱: پمپ هیدرولیک ۳۵۰ bar

در شکل ۳-۲۲ پمپ هیدرولیک ۷۰۰ bar آورده شده است. این پمپ مجهز به یک شیر هیدرولیکی ساده است که به وسیله آن می‌توان جک‌های یک‌طرفه را کنترل نمود. در این پژوهش از این پمپ جهت اعمال فشار به روغن داخل نمونه استفاده شد.

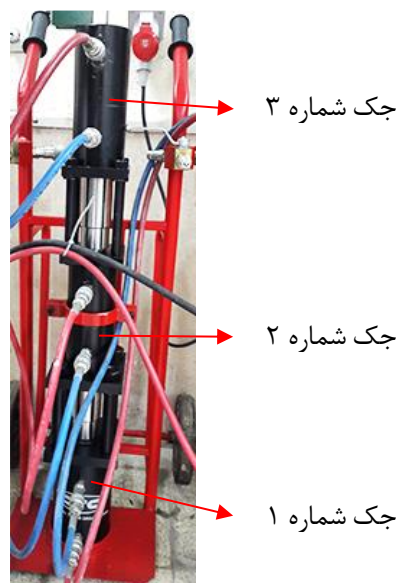


شکل ۳-۲۲: پمپ هیدرولیک ۷۰۰ bar

#### ۳-۴-۴- همگام‌کننده

به دلیل وجود تقارن در قالب، لازم است تا تغذیه محوری در طول فرآیند یکسان باشد. از این دستگاه جهت هماهنگ کردن حرکت جک‌های هیدرولیک استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳-۲۳

مشخص است این دستگاه از سه جک هیدرولیک تشکیل شده است که شفت آن‌ها به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است، سیال از پمپ هیدرولیک وارد جک شماره ۱ می‌شود، حرکت این جک به وسیله شفت یکپارچه به جک‌های ۲ و ۳ انتقال می‌یابد و باعث جابه‌جایی یکسان در آن‌ها می‌شود، بنابراین حجم سیال خروجی از این دو جک با هم برابر خواهد بود. با اتصال جک ۲ و ۳ به جک‌های تغذیه محوری که در بخش ۲-۴-۳- به آن‌ها اشاره شد، این دو جک حرکت هماهنگ و یکسانی خواهند داشت. این همگام‌کننده ساخت سازمان ابزار مرکزی می‌باشد.



شکل ۳-۲۳: همگام‌کننده

### ۵-۴-۳- تجهیزات هیدرولیکی

علاوه بر تجهیزات ذکر شده، برای کنترل فشار سیال داخل نمونه از تجهیزات زیر استفاده شد.

۱. فشارسنج: از این وسیله برای اندازه‌گیری فشار داخل نمونه استفاده شد.
۲. شیر کنترل فشار: از این وسیله برای کنترل فشار داخل نمونه استفاده شد. خط فشار به ورودی بالا یا پایین شیر متصل می‌شود و فشار سیال به وسیله پیچ سمت چپ شیر قابل کنترل است و به وسیله خروجی سمت راست شیر، سیال اضافی تخلیه می‌شود.
۳. شیر یک‌طرفه و کنترل جریان: عبور جریان در این شیر در یک جهت آزاد بوده و در جهت دیگر با پیچ تعبیه شده بر روی آن قابل کنترل خواهد بود. از این شیر برای برگشت روغن به پمپ هیدرولیک استفاده شد.

۴. شیلنگ‌های فشار قوی: از این شیلنگ‌ها برای انتقال سیال بین پمپ هیدرولیک، تجهیزات کنترلی، سنبه‌ها و جک‌ها استفاده شد.

۵. اتصال سه راهی: از این وسیله برای اتصال مانومتر به سایر اجزا استفاده شد. در شکل ۳-۲۴ نمای کلی مجموعه‌ی تجهیزات کنترل فشار سیال قابل مشاهده است.



شکل ۳-۲۴: مجموعه تجهیزات کنترل فشار سیال

۶. کوپلینگ اتصال سریع: از این وسیله برای ایجاد ارتباط سریع و راحت بین دو مسیر جریان هیدرولیک استفاده می‌شود. از این قطعه برای مسدود کردن سوراخ عبور روغن یکی از سنبه‌ها استفاده شد. (روغن هیدرولیک از طریق سوراخ یکی از سنبه‌ها وارد لوله می‌شود و کوپلینگ اتصال سریع سوراخ سنبه دیگر را مسدود نگه میدارد.)

### ۶-۴-۳- ساعت اندازه‌گیری

یکی از متغیرهای فرآیند هیدروفرمینگ، میزان تغذیه محوری می‌باشد، برای این منظور نیاز است تا جابه‌جایی جک‌ها اندازه‌گیری شود. به دلیل محدود بودن فضا در اطراف جک‌ها، اندازه‌گیری جابه‌جایی آن‌ها امکان‌پذیر نیست. بنابراین نسبت جابه‌جایی شفت دستگاه همگام‌کننده به جابه‌جایی جک‌های تغذیه محوری محاسبه شد و با نصب ساعت اندازه‌گیری بر روی دستگاه همگام‌کننده و اندازه‌گیری جابه‌جایی آن، جابه‌جایی جک‌های تغذیه محوری محاسبه شد. با انجام اندازه‌گیری مشخص شد که هر ۱ mm جابه‌جایی در شفت همگام‌کننده باعث جابه‌جایی ۱/۵ میلیمتری در جک‌ها می‌شود. این ساعت

دارای دقت  $0.01$  mm و طول کورس  $115$  mm می باشد و در شکل ۳-۲۵ نحوه قرارگیری آن بر روی دستگاه همگام کننده قابل مشاهده است.



شکل ۳-۲۵: نحوه قرارگیری ساعت اندازه گیری بر روی همگام کننده

### ۳-۵- انجام فرآیند هیدروفرمینگ

#### ۳-۵-۱- آماده سازی نمونه ها

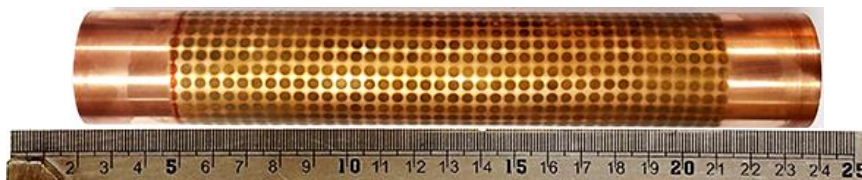
این فرآیند بر روی نمونه‌ی دریافتی و نمونه‌ی بازپخت شده انجام شد. که مراحل آماده سازی آن به شرح زیر است:

۱. ابتدا طول لوله‌های مسی مورد استفاده با استفاده از دستگاه تراش به  $220$  mm رسید.
۲. در صورتی که نمونه از نوع بازپخت شده باشد به روش شرح داده شده در بخش ۳-۱- تحت عملیات بازپخت قرار می گیرد.
۳. نمونه‌ها با استفاده از یک سنباده نرم تمیز شده و مانند شکل ۳-۲۶،  $160$  میلیمتر میانی آن (طول حدودی که دچار تغییر شکل می شود) علامت گذاری شد.



شکل ۳-۲۶: نمونه مسی تمیز شده

۴. جهت بررسی کرنش در انتهای فرآیند فاصله مشخص شده نمونه‌ها با استفاده از شابلون مناسب شبکه‌بندی شد. شکل ۳-۲۷ نمونه شبکه‌بندی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲۷: نمونه شبکه‌بندی شده

۵. به منظور کاهش ضریب اصطکاک و احتمال گسیختگی نمونه از روانکار مولی‌اسلیپ<sup>۱</sup> استفاده شد. این روانکار مخلوط گریسی شامل گرافیت و مولیبدن دی‌سولفاید و دیگر روانکارهای جامد می‌باشد که در شکل ۳-۲۸ الف قابل مشاهده است. همانطور که در شکل ۳-۲۸ ب قابل مشاهده است، سطح نمونه به طور کامل با این روانکار پوشانده می‌شود.



شکل ۳-۲۸: (الف) روانکار مولی‌اسلیپ (ب) نمونه آغشته به روانکار

### ۲-۵-۳- اجرای فرآیند هیدروفرمینگ

همان‌طور که در شکل ۳-۲۹ الف قابل مشاهده است ابتدا نیمه بالایی قالب به همراه صفحات قاب و جک‌ها به وسیله روبند به صفحه بالای پرس بسته شد. سپس نمونه آماده شده درون قالب قرار گرفت

<sup>۱</sup> MOLYSLIP EHT (Extra High Temperature) grease

و کلگی‌ها به صورت کامل بسته شد. در مرحله بعد اینسرت پایین در محل خود قرار گرفته و مکانیزم چهارمیله‌ای به طور کامل بسته شد که در شکل ۳-۲۹-ب قابل مشاهده است.



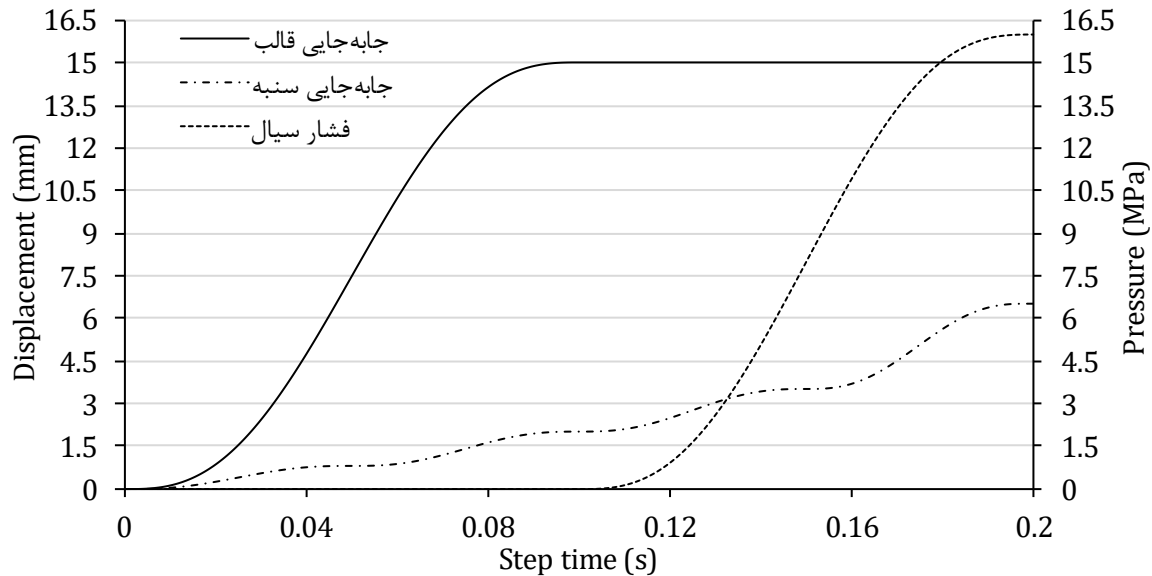
شکل ۳-۲۹: الف) نیمه بالایی قالب و صفحات قاب بسته شده به صفحه بالای پرس ب) قالب آماده شده جهت انجام فرآیند

وجود هوا در سیستم‌های هیدرولیکی موجب بروز مشکلاتی مانند ناپایداری فشار، افزایش موضعی دما، سوختن روغن و آسیب به تجهیزات هیدرولیکی می‌شود. برای تخلیه هوای موجود در سیستم پس از بسته شدن قالب، پمپ ۳۵۰ bar روشن شده و سنبه‌ها حرکت داده شدند تا لوله در نشیمنگاه سنبه قرار گرفته و آببندی صورت گیرد. (موقعیت مناسب جک‌ها که در آن نشیمنگاه سنبه درون لوله قرار می‌گیرد و فشار مضاعف به لوله وارد نمی‌شود قبلاً اندازه‌گیری شده و از طریق ساعت اندازه‌گیری کنترل می‌شود تا در این مرحله تغذیه محوری به نمونه اعمال نشود) شیر کنترل فشار در وضعیت بی‌بار قرار داده می‌شود، سپس به وسیله پمپ ۷۰۰ bar و مجموعه کنترل فشار، روغن از طریق یکی از سنبه‌ها وارد نمونه می‌شود. کوپلینگ اتصال سریع متصل شده به سنبه دیگر باز می‌شود تا هوای درون لوله تخلیه شود، تخلیه تا زمانی ادامه می‌یابد که روغن، بدون حباب از کوپلینگ خارج شود. سپس کوپلینگ اتصال سریع جدا شده تا مسیر مسدود شده و به این ترتیب هوای موجود در تجهیزات هیدرولیک و نمونه تخلیه شود. برای حفظ شرایط هواگیری پمپ هیدرولیک ۷۰۰ bar تا پایان فرآیند روشن نگه داشته می‌شود.

مسیر بارگذاری سیال، سنبه و قالب با توجه به نتایج حاصل از تحلیل المان محدود مانند شکل ۳-۳۰ و شکل ۳-۳۱ اعمال شد. به دلیل محدودیت در کنترل همزمان متغیرها و نبود سیستم‌های کنترلی اتوماتیک در آزمایش‌های عملی، برای اعمال این نمودارها، هر نمودار به پله‌های کوچک زمانی تقسیم شد.

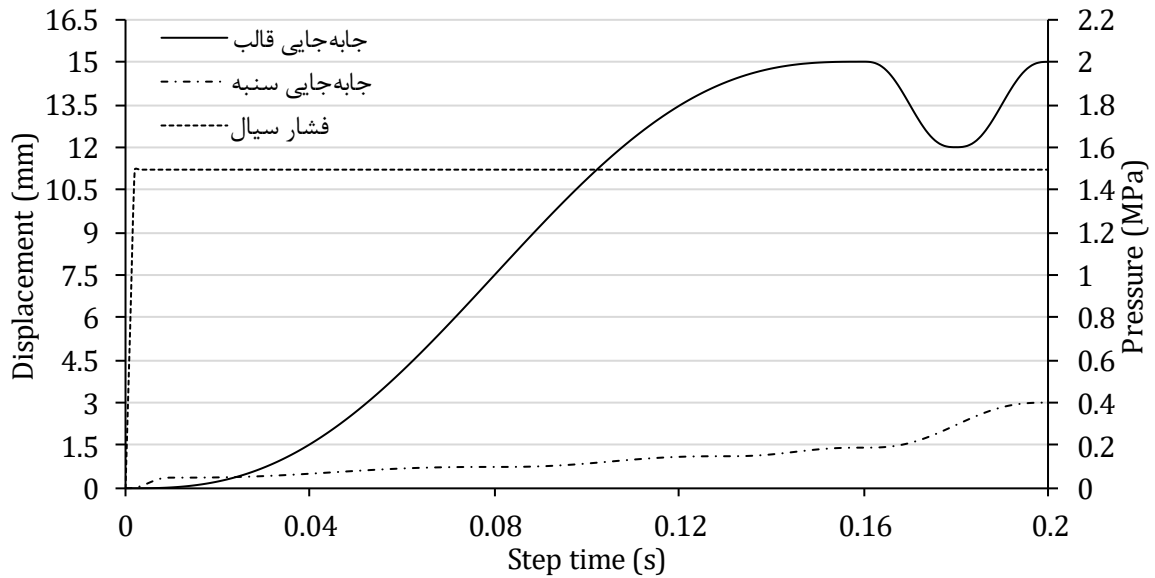


در روش هیدروفرمینگ سنتی ابتدا قالب به وسیله پرس بسته شد و تحت نیروی ۳۰ ton قرار گرفت تا در زمان افزایش فشار داخل لوله، قالب باز نشود. سپس مقادیر فشار سیال و تغذیه محوری (به وسیله مجموعه تجهیزات کنترل فشار و پمپ ۳۵۰ bar و ساعت اندازه‌گیری) به صورت پله‌ای و هم‌زمان اعمال شد. پس از اتمام بارگذاری، ابتدا فشار سیال داخل لوله آزاد شده و سپس روغن داخل لوله با اعمال فشار هوا به وسیله کمپرسور تخلیه شده و قالب باز شد.



شکل ۳-۳: مسیر بارگذاری نمونه بازپخت‌شده برای انجام فرآیند به روش سنتی در فشار ۱۶ MPa

در روش هیدروفرمینگ پیشنه‌ادی، ابتدا فشار سیال تا مقدار مشخصی افزایش یافت سپس مقادیر مسیر حرکت بسته شدن قالب و تغذیه محوری به صورت پله‌ای اعمال شد. در این روش، مرحله‌ای اضافه شد که در آن فشار به صورت پله‌ای افزایش یافت و پس از آن بسته شدن و تغذیه محوری ادامه یافت. یکی دیگر از مراحل اضافه شده در این روش، باز و بسته شدن جزئی قالب پس از افزایش فشار بود. پس از اتمام بارگذاری، ابتدا فشار سیال داخل لوله آزاد شده و مانند روش قبل، روغن تخلیه شده و سپس قالب باز شد.



شکل ۳-۱: مسیر بارگذاری نمونه بازپخت شده برای انجام فرآیند به روش پیشنهادی در فشار ۱/۵ MPa برای اطمینان از نتایج آزمایش ها و همچنین انجام مقایسه بین نتایج، آزمایش ها با شرایط گوناگون انجام شد که در جدول ۳-۱ آمده است.

جدول ۳-۱: شرایط آزمایش های شکل دهی

نوع ماده	روش انجام فرآیند	فشار سیال (MPa)
مس دریافتی	سنتی	۳۰
مس دریافتی	سنتی	۲۶
مس دریافتی	پیشنهادی	۲۶
مس دریافتی	پیشنهادی	۱۴
مس بازپخت شده	سنتی	۱۶
مس بازپخت شده	سنتی	۱۲
مس بازپخت شده	پیشنهادی	۱۲
مس بازپخت شده	پیشنهادی	۱/۵

### ۳-۵-۳- اندازه گیری نمونه شکل داده شده

برای مقایسه حجم لوله های شکل دهی شده ابتدا انتهای لوله به وسیله سلفون مسدود شده و بر روی ترازو با دقت ۰/۰۲ گرم، وزن شد سپس لوله به وسیله آب به طور کامل پر شده و دوباره وزن شد. به

این ترتیب وزن آب داخل لوله محاسبه شد و با توجه به رابطه (۱-۳) حجم داخل لوله محاسبه شد. در این رابطه  $m$  جرم سیال بر حسب گرم،  $\rho$  چگالی بر حسب  $\text{g/mm}^3$  و  $V$  حجم سیال بر حسب  $\text{mm}^3$  می باشد.

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (1-3)$$

همچنین برای اندازه گیری ابعاد نمونه شکل دهی شده از کولیس دیجیتال با دقت اندازه گیری  $0.01 \text{ mm}$  استفاده شد.

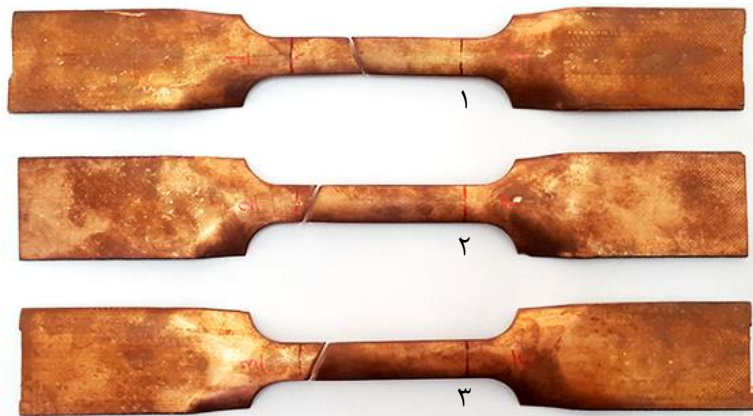


## فصل ۴ نتایج و بحث

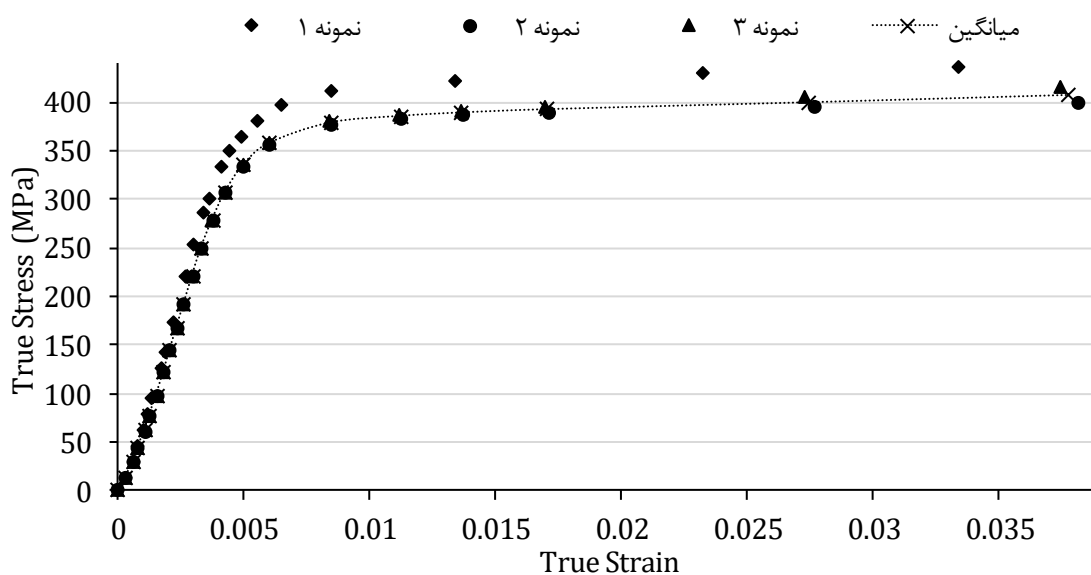
در این فصل نتایج مربوط به آزمون‌های تحلیل المان محدود و آزمون تجربی به همراه نمودار و تصویر ارائه شده است. ابتدا به بررسی نتایج آزمون کشش و تحلیل المان محدود آن پرداخته شده است. سپس نتایج تحلیل المان محدود و آزمایش‌های تجربی فرآیند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان مقایسه‌ای بین نتایج آنها انجام شده است.

### ۴-۱- آزمون کشش

برای حصول اطمینان از نتایج آزمون کشش، برای هر یک از حالات نمونه دریافتی و بازپخت شده، سه نمونه مورد آزمون قرار گرفت و از نتایج به دست آمده میانگین گرفته شد. این نمونه‌ها تا لحظه شکست کشیده شدند. تصویر نمونه‌ها در شکل ۴-۱ آورده شده است. به دلیل مشاهده نشدن نقطه دقیق تسلیم، تعیین دقیق تنش تسلیم نمونه‌ها امکان‌پذیر نیست. بنابراین تنش تسلیم بر مبنای کرنش  $0.2\%$  محاسبه شد. شکل ۴-۲ نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمون کشش را برای نمونه دریافتی نشان می‌دهد. مقدار تنش تسلیم و استحکام نهایی در جدول ۴-۱ آورده شده است. به دلیل تنظیم نبودن صحیح دستگاه در حین آزمون اول و تفاوت قابل ملاحظه‌ی نتایج آن با آزمون دوم و سوم، نتایج این آزمون در میانگین لحاظ نشد.



شکل ۱-۴: نمونه‌های دریافتی شکسته شده تحت آزمون کشش



شکل ۲-۴: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمون کشش نمونه‌های دریافتی (آزمون اول به دلیل خطای ایجاد شده در آن از میانگین حذف شد.)

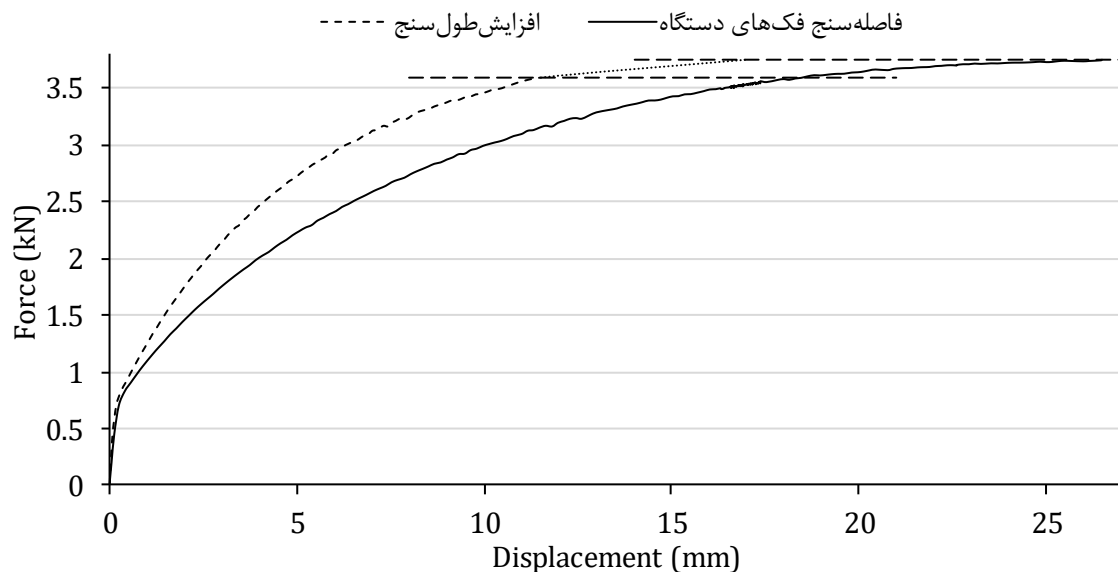
جدول ۱-۴: خواص مکانیکی نمونه‌های دریافتی

نمونه	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
۱	۳۳۳	۴۳۷
۲	۳۰۷	۴۰۰
۳	۲۹۴	۴۱۵
میانگین	۳۰۰	۴۰۸

در شکل ۳-۴ نمونه‌های بازپخت‌شده شکسته‌شده تحت آزمون کشش قابل مشاهده است. همان‌طور که در بخش ۲-۳ اشاره شد، برای اندازه‌گیری تغییر طول در ناحیه مرجع نمونه از افزایش طول سنج استفاده شد که توانایی اندازه‌گیری تغییر طول تا  $12/5 \text{ mm}$  را دارا می‌باشد. اما به دلیل بالا بودن نسبت ازدیاد طول در نمونه‌های بازپخت‌شده نمی‌توان تا لحظه شکست نمونه از افزایش طول سنج استفاده نمود، بنابراین افزایش طول سنج در حین آزمون، قبل از رسیدن به انتهای کورس از قطعه جدا شد و ادامه تغییرات طول به وسیله فاصله‌سنج موقعیت فک‌های دستگاه کشش اندازه‌گیری شد. این فاصله‌سنج ازدیاد طول را علاوه بر طول مرجع در مابقی نمونه نیز نشان می‌دهد. در شکل ۴-۴ نمودار نیرو-جابه‌جایی حاصل از افزایش طول سنج و فاصله‌سنج فک‌های دستگاه آورده شده است.



شکل ۳-۴: نمونه‌های بازپخت‌شده شکسته‌شده تحت آزمون کشش

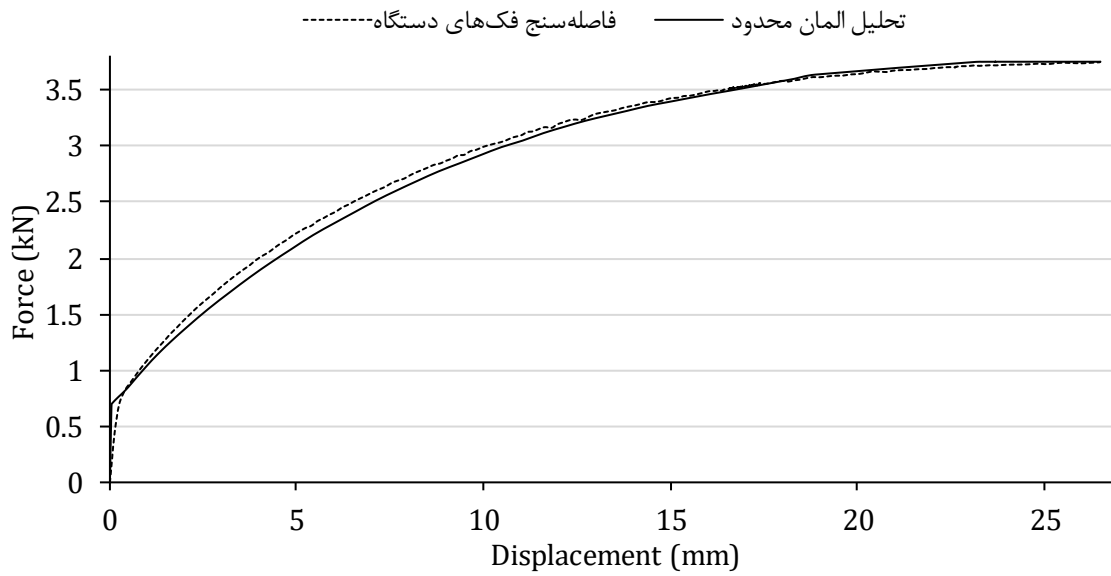


شکل ۴-۴: نمودار نیرو-جاب‌جایی حاصل از افزایش طول سنج و فاصله سنج فک‌های دستگاه (نمونه ۶)

همان‌طور که در نمودار مشخص است، نمودار حاصل از افزایش طول سنج ناقص می‌باشد و نیاز است تا مابقی این نمودار تا نقطه شکست به نحوی از نمودار فاصله سنج فک‌های دستگاه محاسبه شود. با توجه به اینکه نیرو در هر لحظه در نمونه آزمون کشش یکسان است، بنابراین با استفاده از تناسب جاب‌جایی در نیروی یکسان، نقطه انتهایی نمودار افزایش طول سنج نسبت به نقطه انتهایی نمودار فاصله سنج فک‌ها محاسبه شد. قسمت نقطه‌چین نمودار افزایش طول سنج با به کارگیری این تناسب تکمیل شده است.

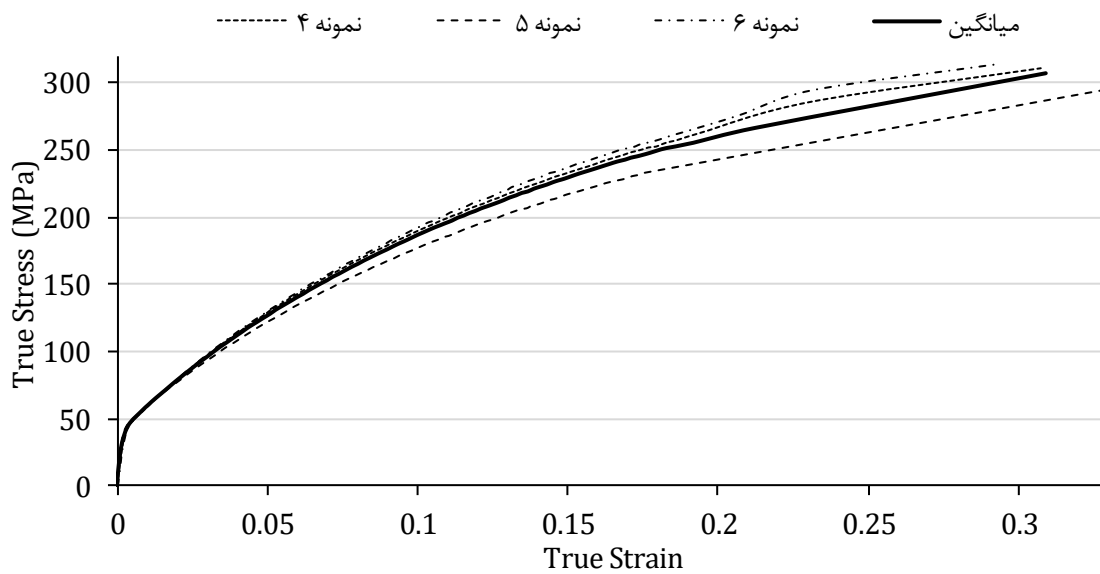
برای صحت‌سنجی روش استفاده شده برای اصلاح نمودار افزایش طول سنج، ابتدا تنش و کرنش پلاستیک با توجه به این نمودار محاسبه شد و سپس با استفاده از آن تحلیل المان محدود آزمون کشش انجام شد. در پایان تحلیل، با استفاده از خروجی‌های نیرو و تغییر طول کل نمونه کشش، نمودار نیرو-جاب‌جایی ترسیم شد که در شکل ۴-۵ آورده شده است. با توجه به انطباق این نمودار و نمودار نیرو-جاب‌جایی فاصله سنج فک‌ها، صحت روش استفاده شده برای تخمین نقطه پایانی نمودار نیرو-جاب‌جایی حاصل از افزایش طول سنج مشخص می‌شود.





شکل ۴-۵: مقایسه نمودار نیرو-جاب‌جایی حاصل از تحلیل المان محدود و فاصله‌سنج فک‌های دستگاه (نمونه ۶)

در شکل ۴-۶ نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمون کشش برای نمونه بازپخت‌شده قابل مشاهده است. مقدار تنش تسلیم و استحکام نهایی نمونه‌ها در جدول ۴-۲ آورده شده است.



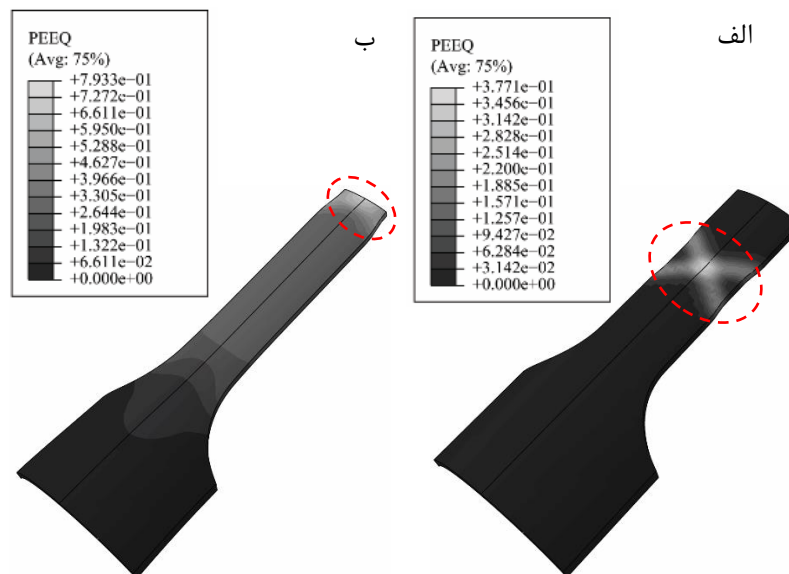
شکل ۴-۶: نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمون کشش نمونه‌های بازپخت‌شده

جدول ۲-۴: خواص مکانیکی ماده‌ی بازپخت‌شده

نمونه	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
۴	۴۹	۳۱۱
۵	۴۳	۲۹۵
۶	۴۴	۳۱۵
میانگین	۴۵	۳۰۷

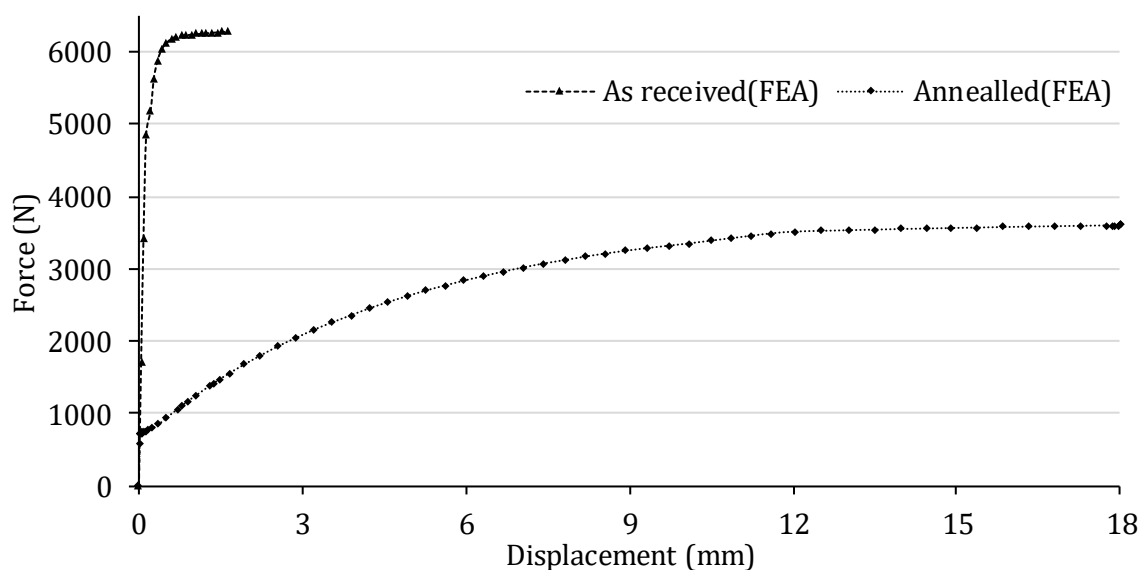
#### ۲-۴- مقایسه نتایج تحلیل المان محدود و آزمون تجربی آزمون کشش

آزمون کشش مجازی<sup>۱</sup>، برای اطمینان از درستی خواص ماده استخراج شده از آزمون کشش انجام می‌شود. در شکل ۴-۷ تصویر تحلیل المان محدود آزمون کشش نمونه دریافتی و بازپخت‌شده به همراه محل وقوع گلویی آورده شده است. همچنین نمودار نیرو-جابجایی حاصل از تحلیل المان محدود آزمون کشش در شکل ۴-۸ قابل مشاهده است.

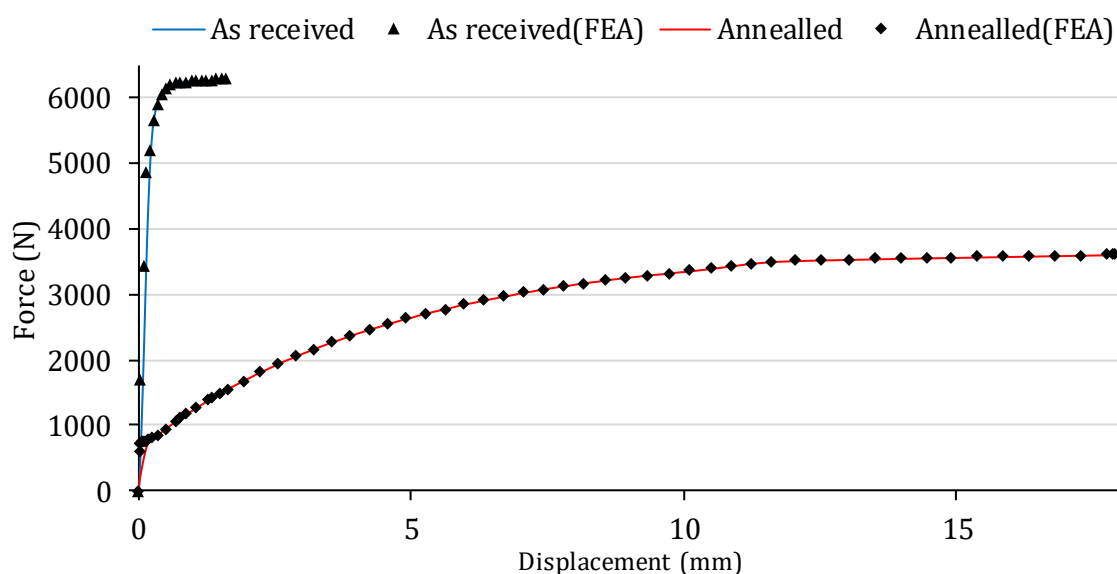


شکل ۴-۷: کرنش معادل ایجاد شده در نمونه در لحظه گلویی شدن (الف) نمونه دریافتی (ب) نمونه بازپخت‌شده

<sup>۱</sup> Virtual Tensile Test



شکل ۴-۸: نمودار نیرو-جاب‌جایی میانگین تحلیل المان محدود آزمون کشش نمونه دریافتی و بازپخت‌شده همانطور که در شکل ۴-۹ مشخص است، مقایسه نمودار نیرو-جاب‌جایی میانگین حاصل از تحلیل المان محدود با نمودار نیرو-جاب‌جایی میانگین حاصل از افزایش طول سنج نشان داد، اطلاعات تنش و کرنش پلاستیک میانگین به درستی وارد تحلیل شده است و می‌توان از این اطلاعات برای تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ استفاده نمود.



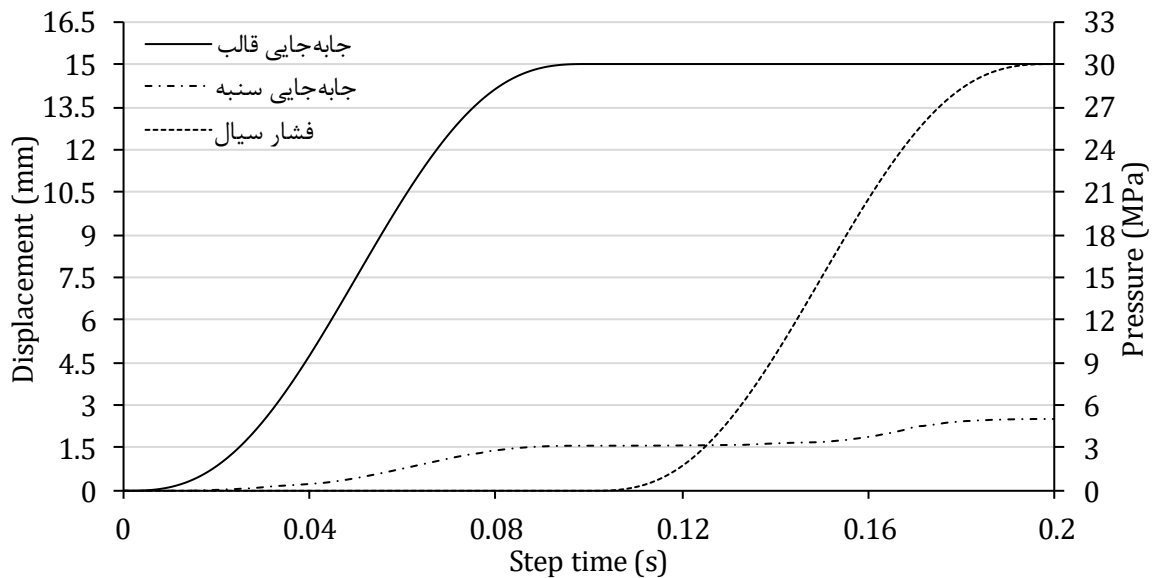
شکل ۴-۹: مقایسه نمودار نیرو-جاب‌جایی میانگین حاصل از تحلیل المان محدود و نمودار نیرو-جاب‌جایی حاصل از افزایش طول سنج در دو حالت دریافتی و بازپخت‌شده

### ۳-۴- تحلیل المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ

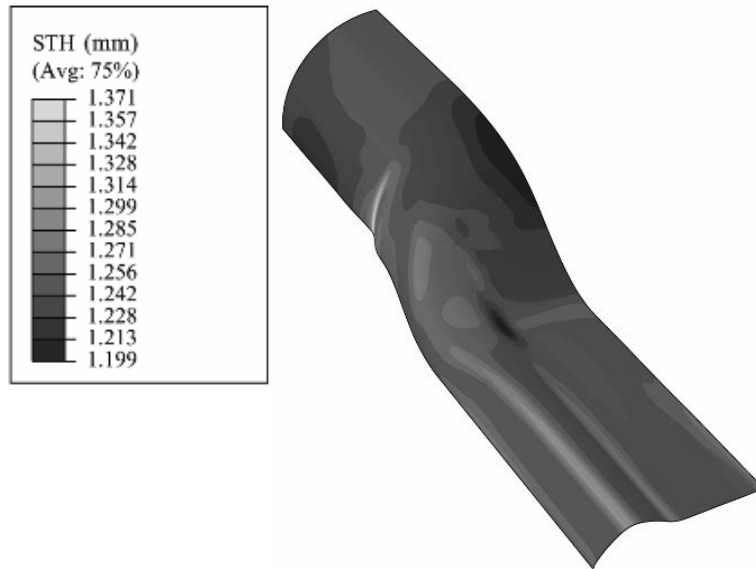
در این بخش نتایج تحلیل المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ در فشارهای مختلف، به روش سنتی و پیشنهادی این پایان‌نامه آورده شده و مورد مقایسه قرار گرفته‌است.

#### ۱-۳-۴- شکل‌دهی نمونه دریافتی برای رسیدن به ارتفاع $h$ یکسان به روش سنتی و پیشنهادی

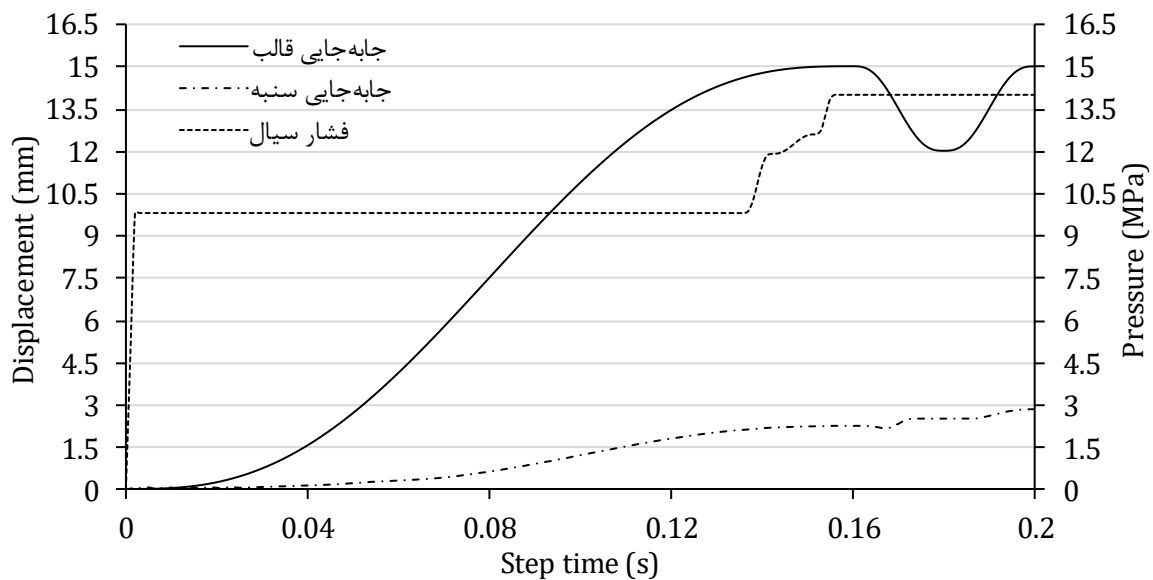
ابتدا تحلیل هیدروفرمینگ لوله به روش سنتی بر روی نمونه دریافتی انجام شد، و پس از انجام آزمون و خطا، فشار سیال داخل لوله  $30 \text{ MPa}$  انتخاب شد. مسیر بارگذاری سیال، سنبه تغذیه و قالب در شکل ۴-۱۰ آورده شده است. در شکل ۴-۱۱ توزیع ضخامت نمونه قابل مشاهده است.



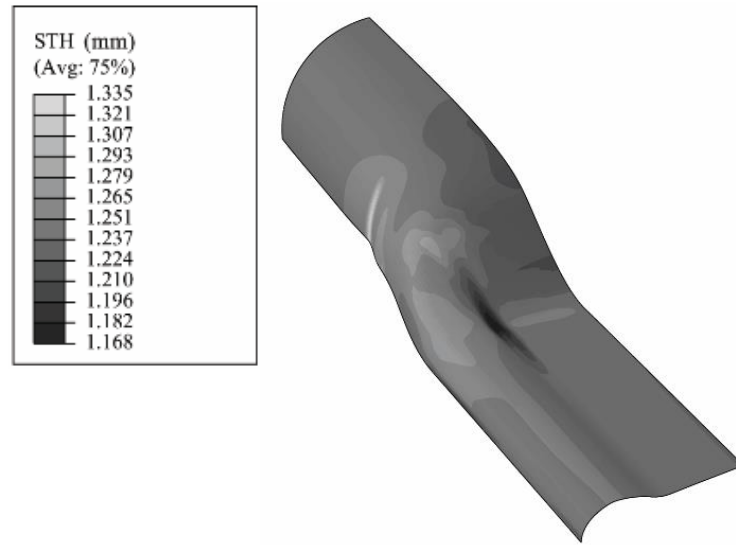
شکل ۴-۱۰: مسیر بارگذاری نمونه دریافتی برای انجام فرآیند به روش سنتی در فشار  $30 \text{ MPa}$



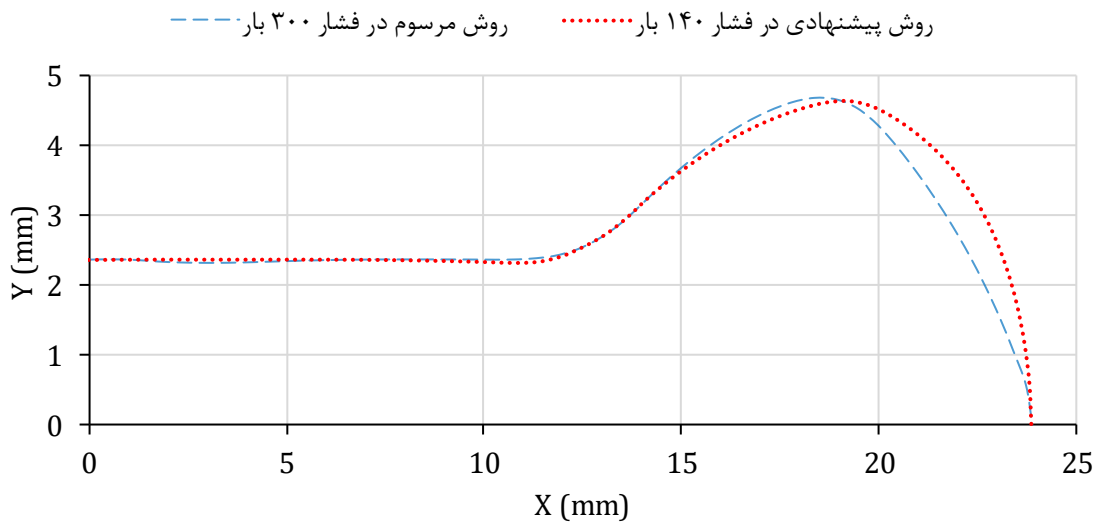
شکل ۴-۱۱: توزیع ضخامت در نمونه دریافتی تغییر شکل یافته به روش سنتی تحت فشار ۳۰ MPa در مرحله بعد هیدروفرمینگ به روش پیشنهادی با انجام آزمون و خطا به گونه‌ای صورت گرفت تا ارتفاع  $h$  حاصل از آن، با حالت سنتی در فشار ۳۰ MPa برابر باشد. مشخص شد با استفاده از روش پیشنهادی و اعمال فشار ۱۴ MPa می‌توان به ارتفاع  $h$  یکسانی با حالت سنتی در فشار ۳۰ MPa رسید. مسیر بارگذاری این نمونه در شکل ۴-۱۲ و توزیع ضخامت آن در شکل ۴-۱۳ آورده شده‌است.



شکل ۴-۱۲: مسیر بارگذاری نمونه دریافتی برای انجام فرآیند به روش پیشنهادی در فشار ۱۴ MPa



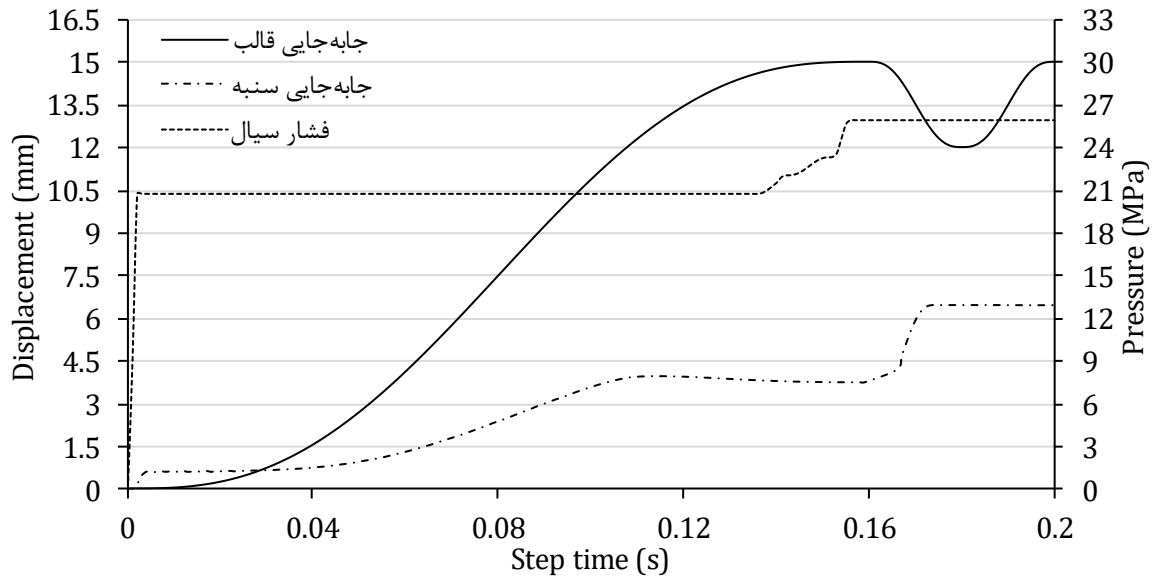
شکل ۴-۱۳: توزیع ضخامت در نمونه دریافتی تغییر شکل یافته به روش پیشنهادی تحت فشار ۱۴ MPa ارتفاع  $\frac{h}{2}$  برای دو حالت سنتی و پیشنهادی جهت انجام مقایسه در شکل ۴-۱۴ آورده شده است. مشخص شد برای رسیدن به ارتفاع  $\frac{h}{2}$  یکسان (۴/۶۵ mm)، روش پیشنهادی در فشار کمتر (۵۳٪ فشار روش سنتی) شکل گرفته می شود.



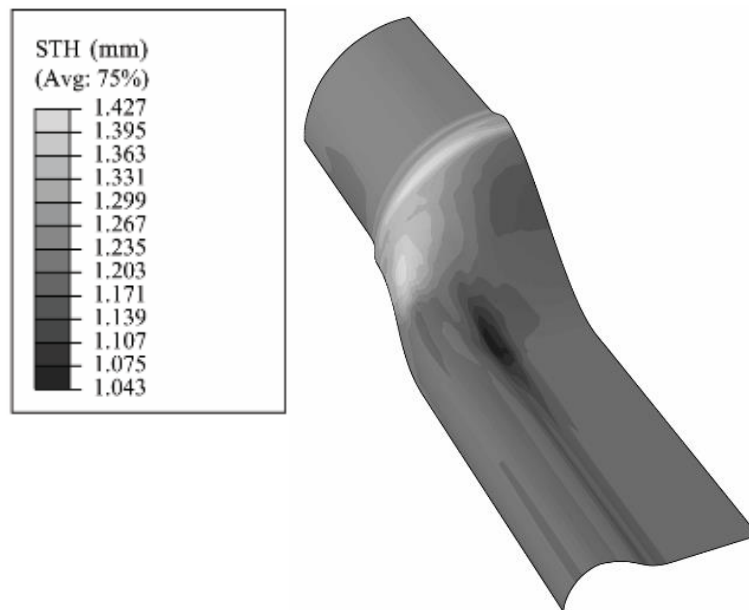
شکل ۴-۱۴: ارتفاع  $\frac{h}{2}$  نمونه‌ی دریافتی در شکل دهی به روش سنتی در فشار ۳۰ MPa و روش پیشنهادی در فشار ۱۴ MPa

### ۲-۳-۴- شکل دهی نمونه دریافتی در فشار یکسان به روش سنتی و پیشنهادی

پس از انجام آزمون و خطا، و انتخاب مسیر بارگذاری مناسب، فرآیند به روش پیشنهادی بر روی نمونه دریافتی انجام شد. از نتایج چنین به دست می‌آید که فشار ۲۶ MPa برای رسیدن به بیشترین ارتفاع مناسب می‌باشد. تصاویر مرتبط با این تحلیل در شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶ آورده شده است.

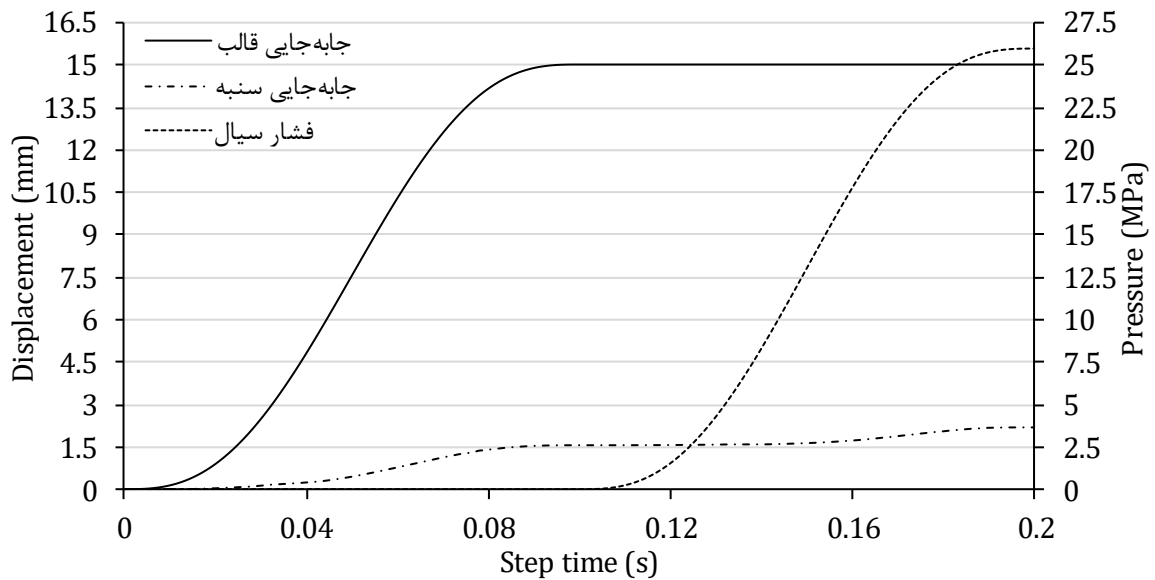


شکل ۴-۱۵: مسیر بارگذاری نمونه دریافتی برای انجام فرآیند به روش پیشنهادی در فشار ۲۶ MPa

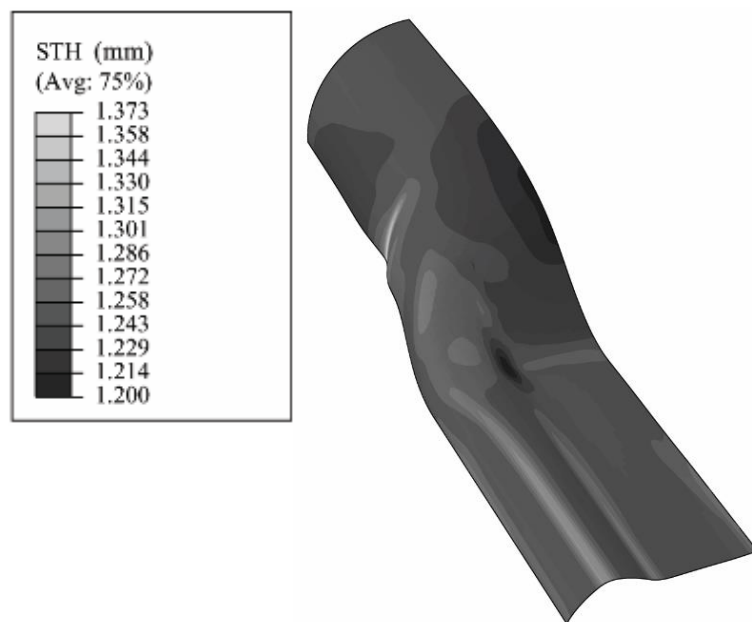


شکل ۴-۱۶: توزیع ضخامت در نمونه دریافتی تغییر شکل یافته به روش پیشنهادی تحت فشار ۲۶ MPa

در مرحله بعد فرآیند به روش سنتی در فشار ۲۶ MPa انجام شد تا با روش پیشنهادی انجام شده، مقایسه شده و میزان بهبود شکل‌دهی مشخص شود. تصاویر مربوط به این فرآیند در شکل ۴-۱۷ تا شکل ۴-۱۸ آورده شده‌است.



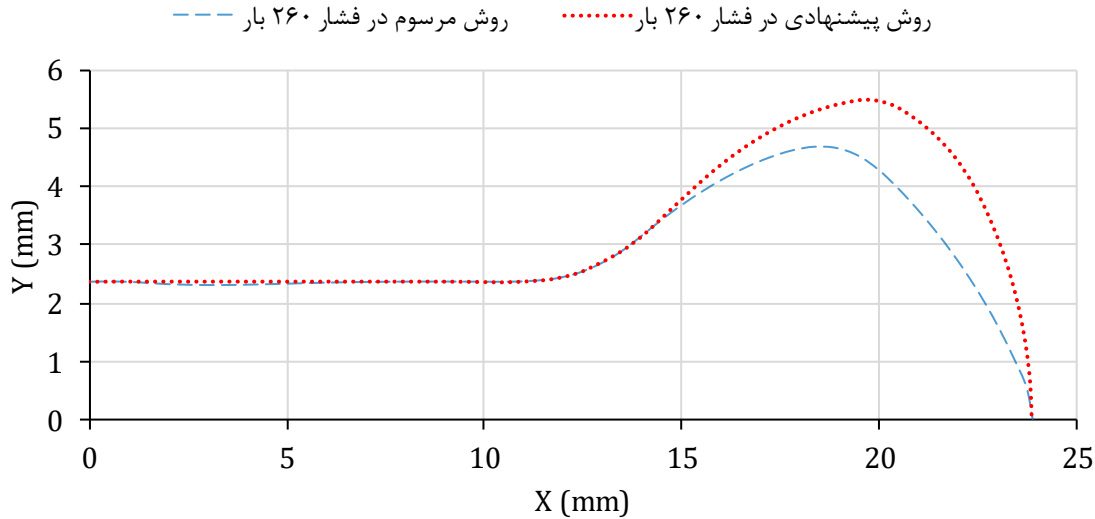
شکل ۴-۱۷: مسیر بارگذاری نمونه دریافتی برای انجام فرآیند به روش سنتی در فشار ۲۶ MPa



شکل ۴-۱۸: توزیع ضخامت در نمونه دریافتی تغییر شکل یافته به روش سنتی تحت فشار ۲۶ MPa  
در شکل ۴-۱۹ ارتفاع  $\frac{h}{2}$  در دو حالت پیشنهادی و سنتی قابل مشاهده است. همان‌طور که مشخص است بیشینه ارتفاع  $\frac{h}{2}$  در روش سنتی و پیشنهادی به ترتیب حدود ۴/۷ mm و ۵/۵ mm می‌باشد. این امر



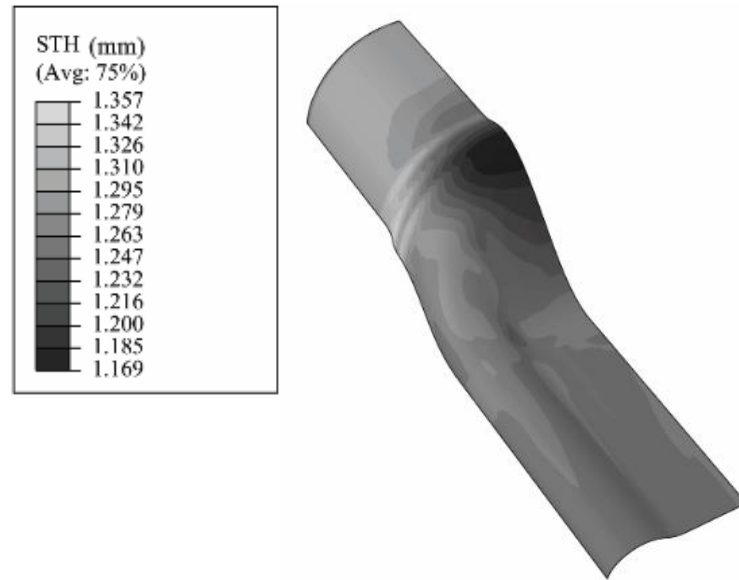
نشان‌دهنده بهبود ۱۷ درصدی شکل‌دهی لوله مسی دریافتی با استفاده از روش پیشنهادی در این پایان‌نامه می‌باشد.



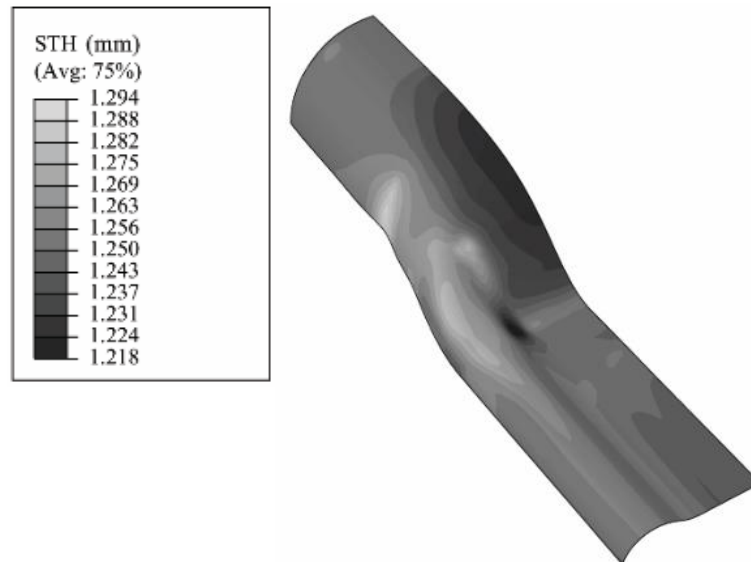
شکل ۴-۱۹: مقایسه ارتفاع  $\frac{h}{2}$  نمونه‌ی دریافتی در شکل‌دهی به روش سنتی و پیشنهادی در فشار ۲۶ MPa

۳-۳-۴- شکل‌دهی نمونه بازپخت شده برای رسیدن به ارتفاع  $h$  یکسان به روش سنتی و پیشنهادی

مانند بخش ۳-۳-۱- در این بخش فرآیند هیدروفرمینگ به دو روش سنتی و پیشنهادی به روی نمونه بازپخت‌شده انجام شد، با این تفاوت که فشار برای روش سنتی ۱۶ MPa و برای روش پیشنهادی ۲۶ MPa در نظر گرفته شد. نمودارها و تصاویر مربوط به آن‌ها در شکل ۳-۳۰ و شکل ۳-۳۱ و همچنین شکل ۳-۲۰ و شکل ۳-۲۱ آورده شده است. شکل ۳-۲۲ ارتفاع  $\frac{h}{2}$  نمونه را در دو حالت سنتی و پیشنهادی نشان می‌دهد. برای رسیدن به ارتفاع  $\frac{h}{2}$  (۴/۷ mm)، روش پیشنهادی در فشار کمتر (۹۰٪ فشار روش سنتی) شکل گرفته می‌شود.

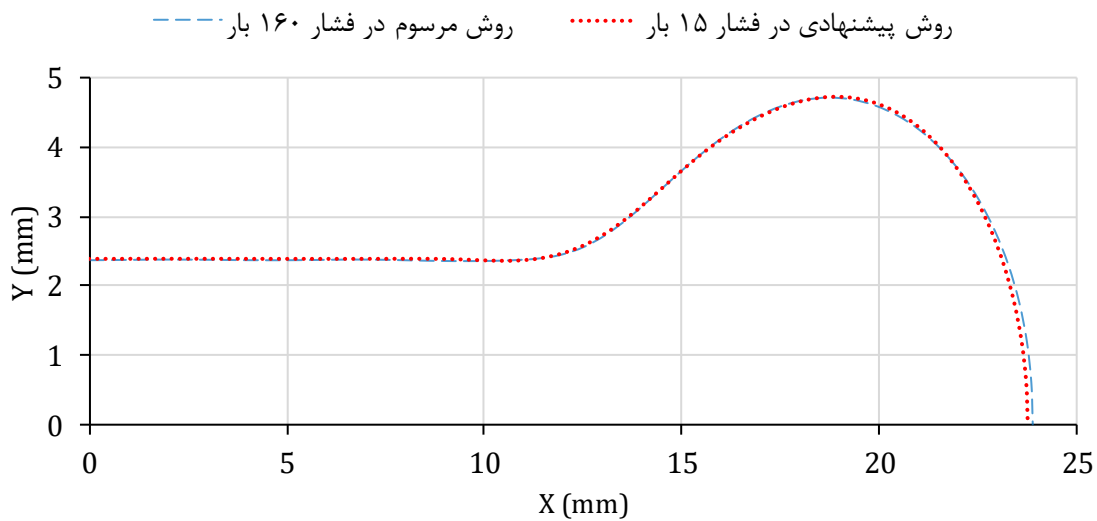


شکل ۴-۲۰: توزیع ضخامت در نمونه بازپخت‌شده‌ی تغییر شکل یافته به روش سنتی تحت فشار ۱۶ MPa



شکل ۴-۲۱: توزیع ضخامت در نمونه بازپخت‌شده‌ی تغییر شکل یافته به روش پیشنهادی تحت فشار

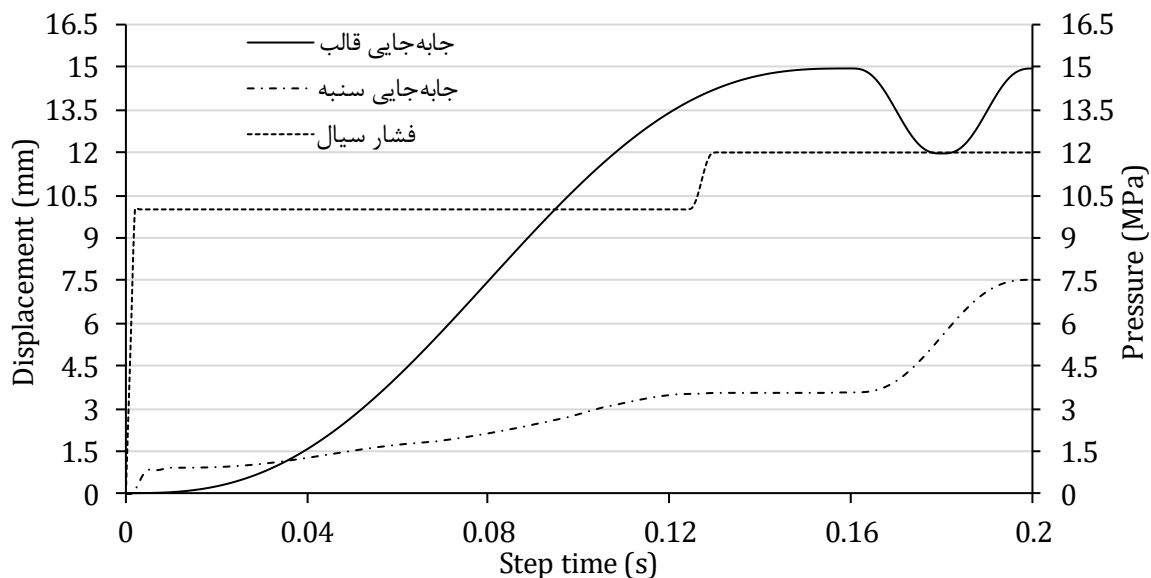
۱/۵ MPa



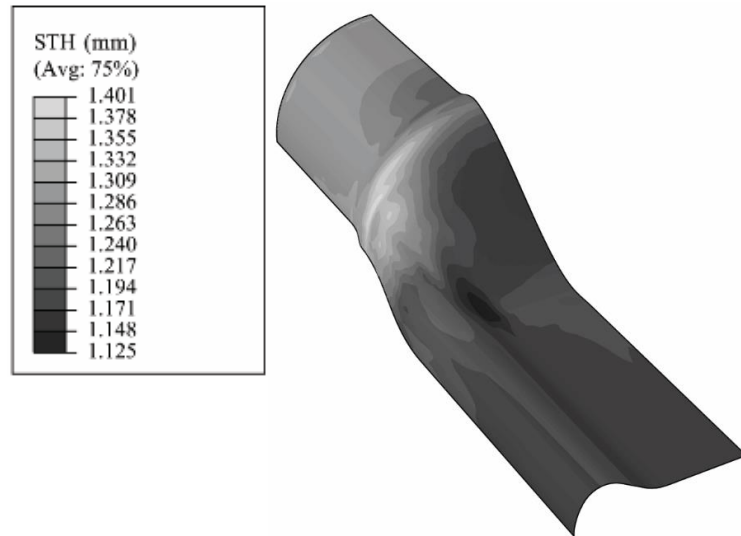
شکل ۴-۲۲: ارتفاع  $\frac{h}{2}$  نمونه‌ی بازپخت‌شده در شکل‌دهی به روش سنتی در فشار ۱۶ MPa و روش پیشنهادی در فشار ۱/۵ MPa

#### ۴-۳-۴- شکل‌دهی نمونه بازپخت شده در فشار یکسان به روش سنتی و پیشنهادی

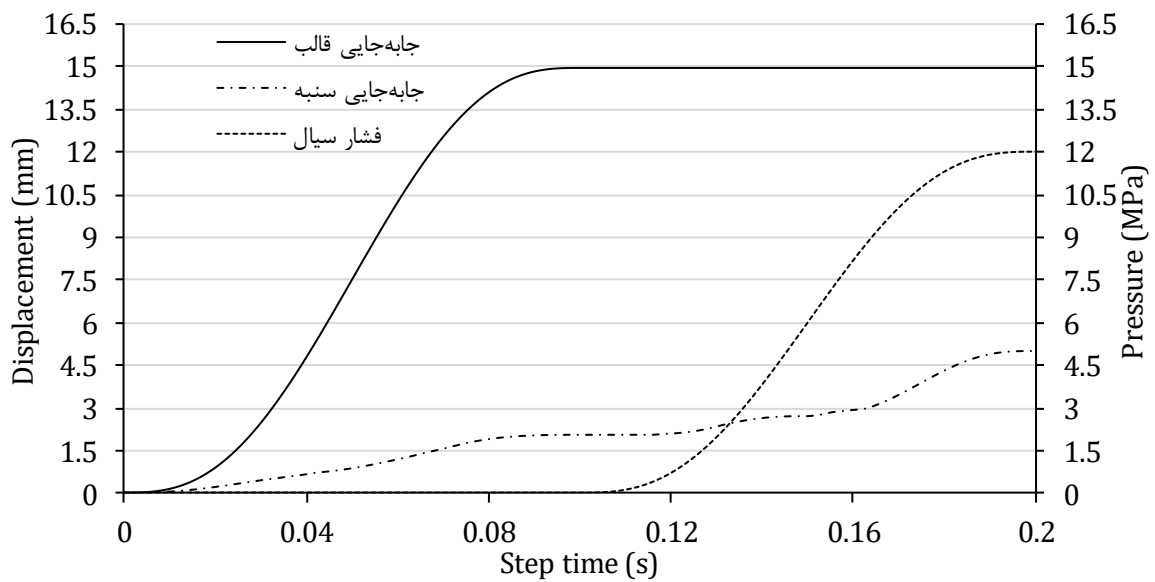
مانند بخش ۴-۳-۲- آزمایش‌ها در فشار یکسان به دو روش سنتی و پیشنهادی بر روی نمونه بازپخت‌شده انجام شد، به دلیل استحکام کمتر نمونه دریافتی، فشار سیال ۱۲ MPa در نظر گرفته شده‌است. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۴-۲۳ تا شکل ۴-۲۶ آورده شده است.



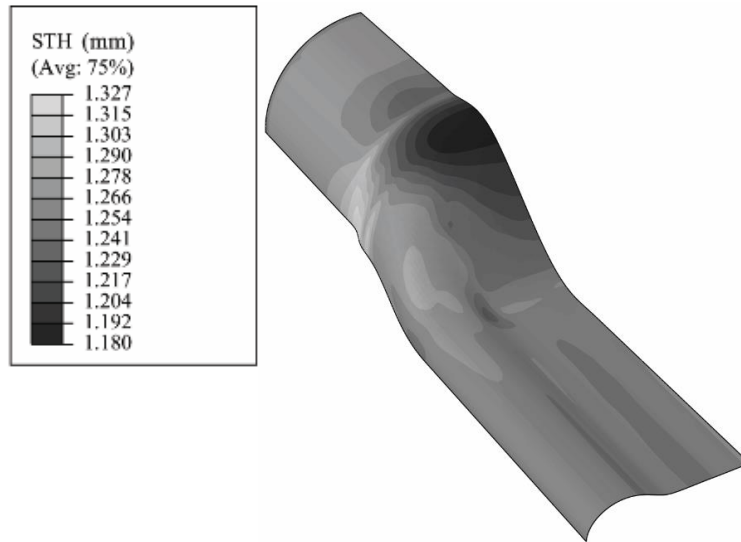
شکل ۴-۲۳: مسیر بارگذاری نمونه بازپخت‌شده برای انجام فرآیند به روش پیشنهادی در فشار ۱۲ MPa



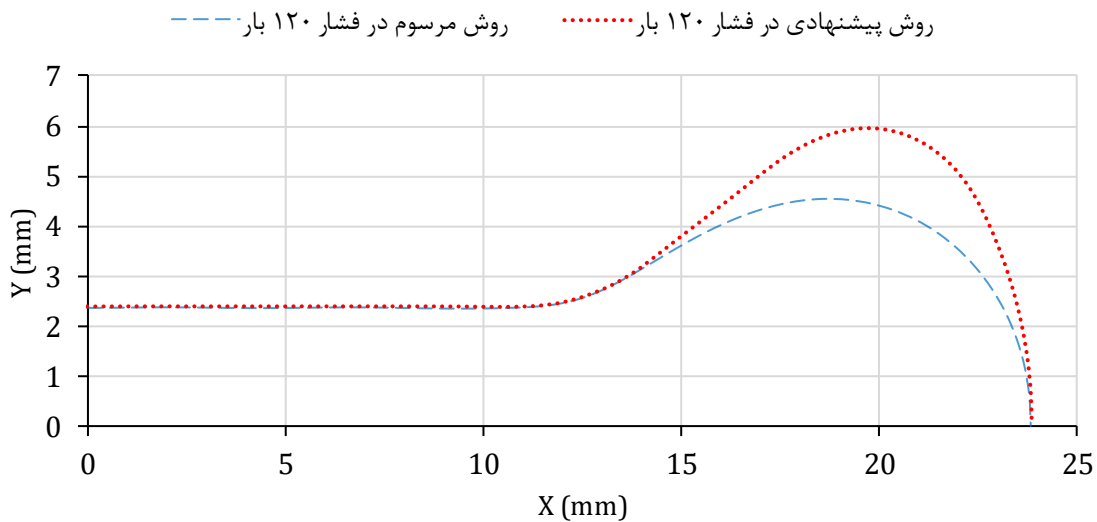
شکل ۴-۲۴: توزیع ضخامت در نمونه بازیخت‌شده‌ی تغییر شکل یافته به روش پیشنهادی تحت فشار ۱۲ MPa



شکل ۴-۲۵: مسیر بارگذاری نمونه بازیخت‌شده برای انجام فرآیند به روش سنتی در فشار ۱۲ MPa



شکل ۴-۲۶: توزیع ضخامت در نمونه بازپخت‌شده‌ی تغییر شکل یافته به روش سنتی تحت فشار ۱۲ MPa در شکل ۴-۲۷ مقایسه ارتفاع  $\frac{h}{2}$  نمونه شکل‌دهی شده به روش سنتی و پیشنهادی آورده شده است. با توجه به شکل، بیشینه ارتفاع  $\frac{h}{2}$  با استفاده از روش پیشنهادی و روش سنتی به ترتیب برابر با ۵/۹ mm و ۴/۵ mm می‌باشد. این امر بهبود حدود ۳۰ درصدی شکل‌دهی لوله مسی بازپخت‌شده را با استفاده از روش پیشنهادی این پایان‌نامه نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۷: مقایسه ارتفاع  $\frac{h}{2}$  نمونه‌ی بازپخت‌شده در شکل‌دهی به روش سنتی و پیشنهادی در فشار ۱۲ MPa

## ۴-۴- فرآیند هیدروفرمینگ

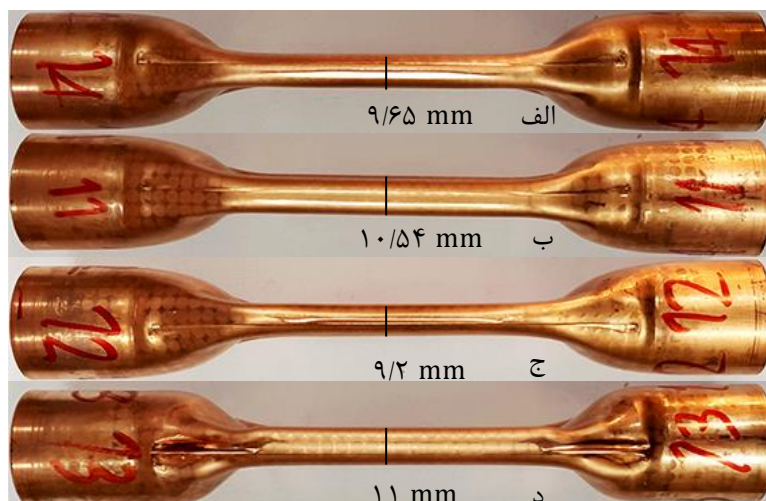
آزمایش‌های تجربی با استفاده از داده‌های به دست آمده از تحلیل المان محدود فرآیند انجام شد. ارتفاع  $h$  و حجم لوله در آزمایش‌های مختلف اندازه‌گیری شد. نمونه‌ای از لوله‌های شکل‌دهی شده در شکل ۴-۲۸ و شکل ۴-۲۹ آورده شده است.



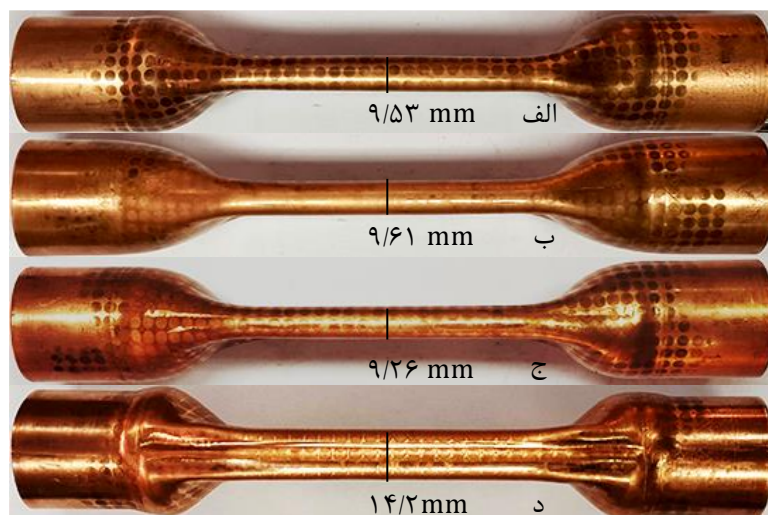
شکل ۴-۲۸: نمونه‌ی بازپخت‌شده‌ی تولیدشده به روش هیدروفرمینگ سنتی در فشار ۱۲ MPa



شکل ۴-۲۹: نمونه‌ی بازپخت‌شده‌ی تولیدشده به روش هیدروفرمینگ پیشنهادی در فشار ۱۲ MPa در شکل ۴-۳۰ و شکل ۴-۳۱ ارتفاع  $h$  نمونه‌های دریافتی و بازپخت‌شده مورد مقایسه قرار گرفته‌است.



شکل ۴-۳: مقایسه ارتفاع h نمونه‌های دریافتی الف) روش سنتی با فشار ۳۰ MPa (ب) روش پیشنهادی با فشار ۱۴ MPa (ج) روش سنتی با فشار ۲۶ MPa (د) روش پیشنهادی با فشار ۲۶ MPa



شکل ۴-۳۱: مقایسه ارتفاع h نمونه‌های بازیخت شده الف) روش سنتی با فشار ۱۶ MPa (ب) روش پیشنهادی با فشار ۱/۵ MPa (ج) روش سنتی با فشار ۱۲ MPa (د) روش پیشنهادی با فشار ۱۲ MPa

#### ۴-۵- مقایسه نتایج تحلیل المان محدود و آزمون تجربی فرآیند هیدروفرمینگ

در جدول ۴-۳ و جدول ۴-۴ نتایج تحلیل المان محدود و آزمون تجربی فرآیند هیدروفرمینگ مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۳-۴: مقایسه نتایج تحلیل المان محدود و آزمون تجربی فرآیند هیدروفرمینگ نمونه دریافتی

شماره آزمون	روش انجام فرآیند	فشار سیال	نوع آزمون	ارتفاع h (mm)	خطا	حجم لوله (mm <sup>3</sup> )	خطا
۱	روش سنتی	۳۰۰	تحلیل المان محدود	۹/۴	٪ ۲/۵	۱۱۵۴۱۴	٪ ۱/۱
۲	روش سنتی	۳۰۰	تجربی	۹/۶۵		۱۱۴۱۰۰	
۳	روش پیشنهادی	۱۴۰	تحلیل المان محدود	۹/۲۸	٪ ۱۱/۹	۱۱۶۲۲۷	٪ ۱
۴	روش پیشنهادی	۱۴۰	تجربی	۱۰/۵۴		۱۱۷۵۰۰	
۵	روش پیشنهادی	۲۶۰	تحلیل المان محدود	۱۰/۹۶	٪ ۰/۳	۱۱۶۶۵۱	٪ ۱/۸
۶	روش پیشنهادی	۲۶۰	تجربی	۱۱		۱۱۸۸۰۰	
۷	روش سنتی	۲۶۰	تحلیل المان محدود	۹/۴	٪ ۲/۱	۱۱۴۵۷۰	٪ ۱/۹
۸	روش سنتی	۲۶۰	تجربی	۹/۲		۱۱۲۴۰۰	

جدول ۴-۴: مقایسه نتایج تحلیل المان محدود و آزمون تجربی فرآیند هیدروفرمینگ نمونه بازپخت شده

شماره آزمون	روش انجام فرآیند	فشار سیال	نوع آزمون	ارتفاع h (mm)	خطا	حجم لوله (mm <sup>3</sup> )	خطا
۹	روش سنتی	۱۶۰	تحلیل المان محدود	۹/۴۲	٪ ۱/۱	۱۱۱۷۷۲	٪ ۲
۱۰	روش سنتی	۱۶۰	تجربی	۹/۵۳		۱۱۴۱۰۰	
۱۱	روش پیشنهادی	۱۵	تحلیل المان محدود	۹/۴۲	٪ ۲	۱۱۴۹۴۵	٪ ۰/۴
۱۲	روش پیشنهادی	۱۵	تجربی	۹/۶۱		۱۱۴۵۰۰	
۱۳	روش پیشنهادی	۱۲۰	تحلیل المان محدود	۱۱/۸۸	٪ ۱۶/۳	۱۱۲۹۴۳	٪ ۱۲/۱
۱۴	روش پیشنهادی	۱۲۰	تجربی	۱۴/۲		۱۲۸۶۰۰	
۱۵	روش سنتی	۱۲۰	تحلیل المان محدود	۹/۱	٪ ۱/۷	۱۱۳۶۶۳	٪ ۰/۴
۱۶	روش سنتی	۱۲۰	تجربی	۹/۲۶		۱۱۳۲۰۰	

همان طور که در جداول بالا مشخص است، نتایج آزمون تجربی با تقریب مناسبی صحت نتایج تحلیل المان محدود را نشان می‌دهد. اختلاف ایجاد شده میان نتایج آزمون تجربی و تحلیل المان محدود می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد که در ادامه به آنها اشاره شده است.



۱. داشتن اطلاعات بیشتر و دقیق‌تری از خواص لوله مورد آزمایش، می‌تواند به دقیق‌تر شدن تحلیل المان محدود کمک کند.
  ۲. همچنین دقت هندسه قالب مدل‌سازی شده، با قالب ساخته شده در واقعیت اندکی متفاوت است، این امر موجب ایجاد اختلاف بین نتایج آزمون تجربی و تحلیل المان محدود می‌شود و هر قدر میزان پرشدگی قالب افزایش یابد، خطای ناشی از آن مشهودتر خواهد شد. (آزمون ۱۳ و ۱۴)
  ۳. پرس مورد استفاده جهت باز و بست شدن قالب، فقط در مسیر بسته شدن قالب قابلیت کنترل داشت. بنابراین دقت پیاده‌سازی مسیر بارگذاری جابه‌جایی قالب در روش پیشنهادی (که در حین آن قالب اندکی باز می‌شود) کاهش یافت. (آزمون ۳ و ۴)
- بنابراین برای انطباق بیشتر نتایج تحلیل المان محدود و آزمون تجربی، از یک سو باید جزئیات بیشتری از فرآیند در شبیه‌سازی المان محدود مد نظر قرار داده شود و از سوی دیگر بایستی با بهبود آزمایش‌ها، شرایط مناسب و کنترل شده‌تری برای انجام فرآیند ایجاد کرد.
- با توجه به نتایج تحلیل المان محدود و آزمون‌های تجربی، مشخص شد که بهبود شکل‌دهی و پرشدگی گوشه‌های قالب ناشی از دلایل زیر است.
۱. با توجه به تاثیر اصطکاک بر پرشدگی گوشه‌های قالب [۸]، اعمال فشار سیال داخلی از ابتدای فرآیند و قبل از بسته شدن قالب، باعث انبساط آزاد<sup>۱</sup> لوله درون قالب می‌شود. این امر باعث کاهش میزان تماس قالب و لوله و کاهش اصطکاک شده و در پی آن ماده با مقاومت کمتری جریان یافته و موجب بهبود شکل‌دهی و یکنواختی ضخامت می‌شود.
  ۲. افزایش فشار داخلی پس از بسته شدن کامل قالب موجب افزایش پرشدگی گوشه قالب می‌شود [۶]. همچنین انبساط آزاد بیش از حد لوله در فشار داخلی بالا می‌تواند باعث نازک‌شدگی و وقوع ترکیدگی شود، که با افزایش فشار پس از بسته شدن کامل قالب می‌توان از وقوع آن جلوگیری کرد.

---

<sup>۱</sup> Free Bulging

۳. باز شدن اندک قالب در انتهای فرآیند و در فشار سیال داخلی زیاد، موجب جریان یافتن بیشتر ماده در گوشه‌های قالب و افزایش پرشدگی این نواحی شده و همچنین به دلیل حفظ تماس قالب و نواحی دیگر لوله از انبساط آزاد و ترکیدن لوله جلوگیری می‌شود.

## فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### ۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، مطالعه شکل‌دهی لوله فلزی با ترکیب شکل‌دهی به کمک سیال فشار بالا و پایین پرداخته شد. در این راستا ابتدا آزمون کشش تک محوره طراحی و اجرا شد. در این آزمون ۶ عدد نمونه‌ی دمبلی‌شکل مانند شکل ۳-۳ مطابق با استاندارد ASTM E 8M-00b ساخته شد و سپس ۳ عدد از آنها تحت عملیات بازپخت قرار گرفت. نمودار تنش- کرنش مربوط به نمونه‌های دریافتی و بازپخت‌شده از نتایج آزمون استخراج شد. برای اطمینان از نحوه اعمال خواص مکانیکی ماده در تحلیل المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ، تحلیل المان محدود آزمون کشش انجام شد و انطباق نتایج آن با آزمون کشش عملی، صحت خواص اعمال شده در نرم‌افزار را نشان داد. سپس با استفاده از این خواص، تحلیل المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ به روش پیشنهادی این پایان‌نامه به روی نمونه‌های دریافتی و بازپخت‌شده انجام شد. جهت انجام مقایسه و بررسی میزان بهبود شکل‌دهی در روش پیشنهادی، تحلیل المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ به روش سنتی نیز انجام شد. مقایسه این دو روش نشان داد که شکل‌دهی لوله با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ به روش پیشنهادی این پایان‌نامه موجب بهبود پرشدگی قالب می‌شود. به طوریکه ارتفاع  $h$  در پایان فرآیند، در لوله دریافتی ۱۷ درصد و در لوله بازپخت‌شده ۳۰ درصد بیشتر شد. در مرحله بعد مجموعه قالب و صفحات قاب آن مانند شکل ۳-۱۷ طراحی و ساخته شد. برای کاهش اصطکاک و فرسایش قالب، سطوح در تماس با لوله تحت عملیات آبکاری کروم‌سخت قرار گرفت.

تجهیزات و اتصالات مورد نیاز برای انجام فرآیند هیدروفرمینگ طراحی و اجرا شد که در شکل ۳-۲۰ نمای کلی مجموعه قابل مشاهده است. لوله‌های مسی برای انجام فرآیند به طول رسانده شد و نیمی از آنها تحت عملیات بازپخت قرار گرفت. سپس با توجه با آزمون‌های انجام شده در تحلیل المان محدود، آزمایش‌های تجربی انجام شد. با مقایسه ارتفاع  $h$  و همچنین حجم لوله در پایان فرآیند مشخص شد نتایج آزمایش‌های تجربی و تحلیل المان محدود با دقت خوبی بر هم منطبق بود. در آزمایش‌های تجربی ارتفاع  $h$  در پایان فرآیند، در لوله دریافتی ۲۰ درصد و در لوله بازپخت شده ۵۳ درصد بیشتر شد.

## ۲-۵- پیشنهادها

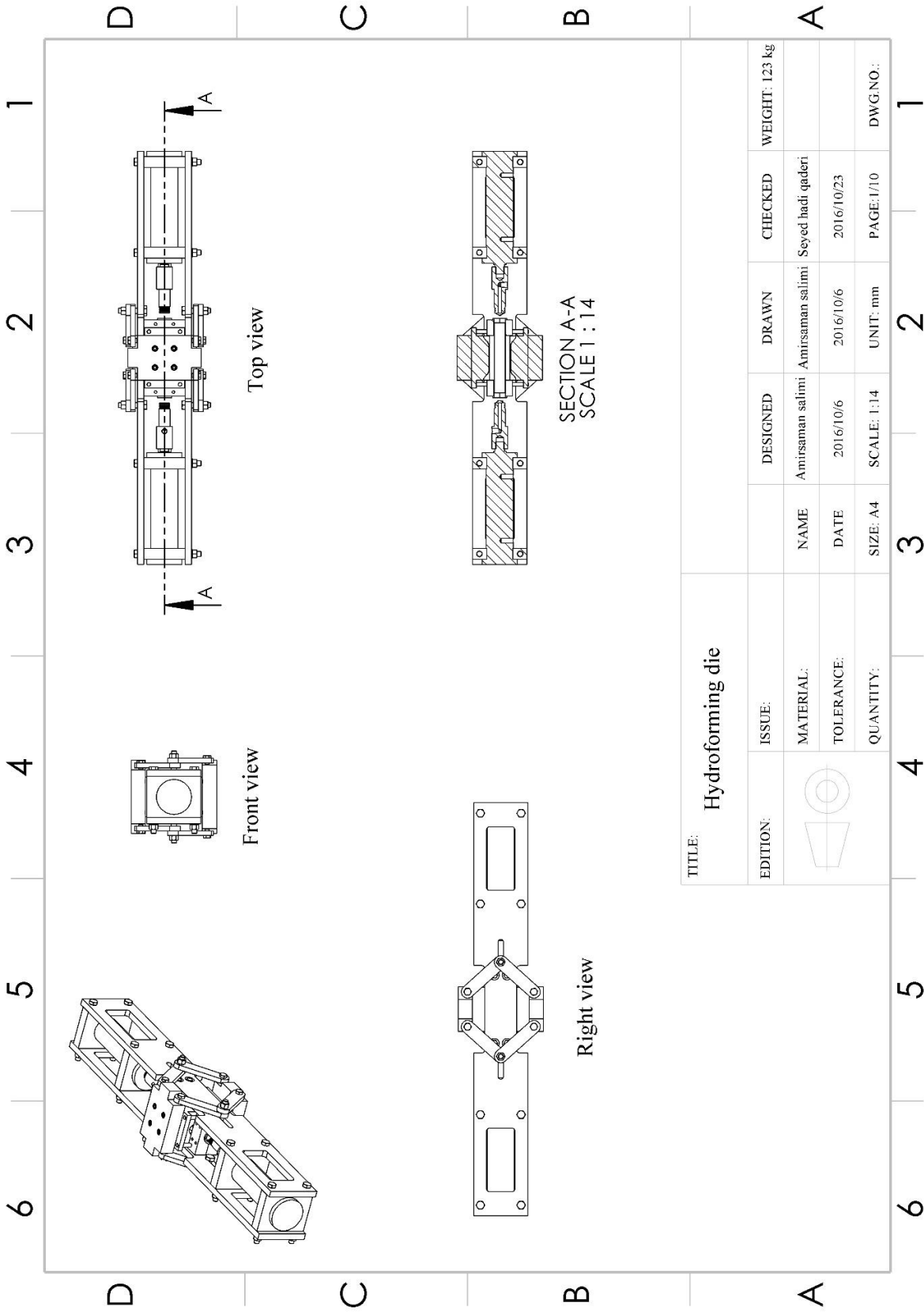
به منظور ادامه پژوهش در این زمینه، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود.

۱. خواص نمونه اعمال شده در تحلیل المان محدود این فرآیند، تنها از آزمون کشش استخراج شد. پیشنهاد می‌شود برای افزایش دقت تحلیل المان محدود، خواص بیشتری از نمونه مورد آزمایش از جمله منحنی حد شکل‌دهی یا منحنی حد شکل‌دهی تنشی، اثر ناهمسانگردی و ... در تحلیل اعمال شود.
۲. در پایان‌نامه حاضر روشی جدید برای شکل‌دهی در فرآیند هیدروفرمینگ ارائه شد، پیشنهاد می‌شود برای بهبود و افزایش شکل‌دهی این فرآیند، بهینه‌سازی مسیر جابه‌جایی قالب و سنبه و بارگذاری فشار داخلی مورد بررسی قرار گیرد.
۳. در روش پیشنهادی این پایان‌نامه، قالب تنها یکبار در طول فرآیند باز و بسته شد، پیشنهاد می‌شود اثر باز و بسته شدن قالب بیش از یک مرتبه و همچنین باز و بسته شدن پله‌ای قالب، با فرکانس‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گیرد.
۴. اثر فشار داخلی نوسانی توسط محققان دیگر مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۳]، پیشنهاد می‌شود ترکیب شکل‌دهی با استفاده از فشار نوسانی و روش ارائه شده در این پایان‌نامه مورد مطالعه قرار گیرد.
۵. در بحث آزمایشگاهی، به دلیل کمبود امکانات تجهیزات مورد استفاده، کنترل دقیق حرکت پرس در برگشت مقدور نبود، این امر در بعضی از مواقع موجب ایجاد اختلاف میان نتایج تحلیل المان

محدود و آزمون تجربی شد. پیشنهاد می‌شود برای کنترل دقیق‌تر فرآیند و اعمال مسیرهای بارگذاری پیچیده‌تر از تجهیزات پیشرفته‌تری استفاده شود.

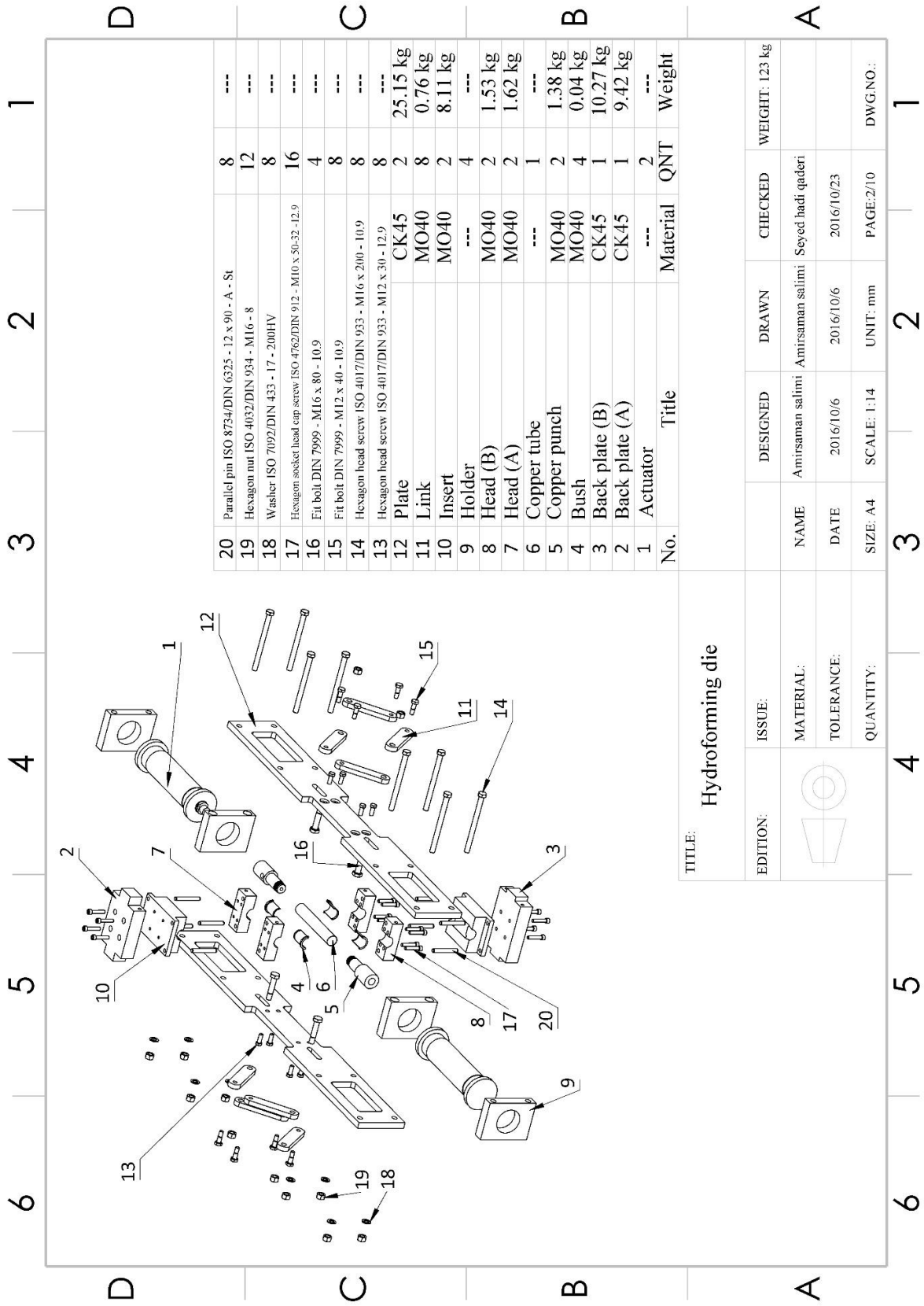


پیوست الف - نقشه‌های قالب و صفحات قاب



TITLE: Hydroforming die

EDITION:	ISSUE:	DESIGNED:	DRAWN:	CHECKED:	WEIGHT: 123 kg
		Amirsaman salimi	Amirsaman salimi	Seyed hadi qaderi	
	MATERIAL:	DATE:	DATE:	DATE:	
		2016/10/6	2016/10/6	2016/10/23	
	TOLERANCE:	SCALE:	SCALE:	PAGE:	DWG.NO.:
		1:14	1:14	1/10	
	QUANTITY:	SIZE:	UNIT:		
		A4	mm		



TITLE: Hydroforming die

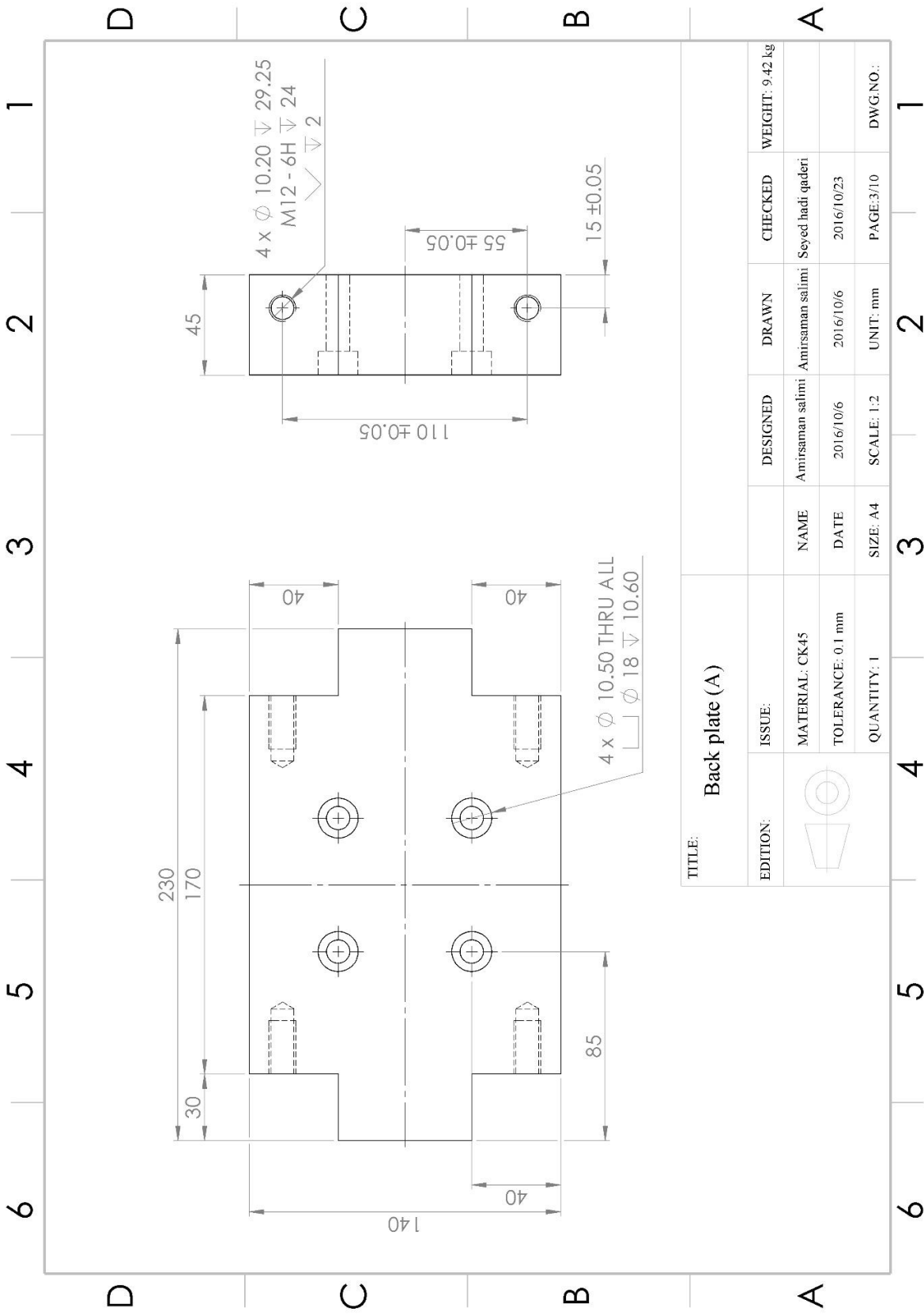
EDITION:	ISSUE:	DESIGNED	DRAWN	CHECKED	WEIGHT: 123 kg
		Amirsaman salimi	Amirsaman salimi	Seyed hadi qaderi	
	MATERIAL:	NAME	DATE	2016/10/23	
		2016/10/6	UNIT: mm	PAGE:2/10	DWG.NO.:
	TOLERANCE:	SCALE: 1:14			
	QUANTITY:				

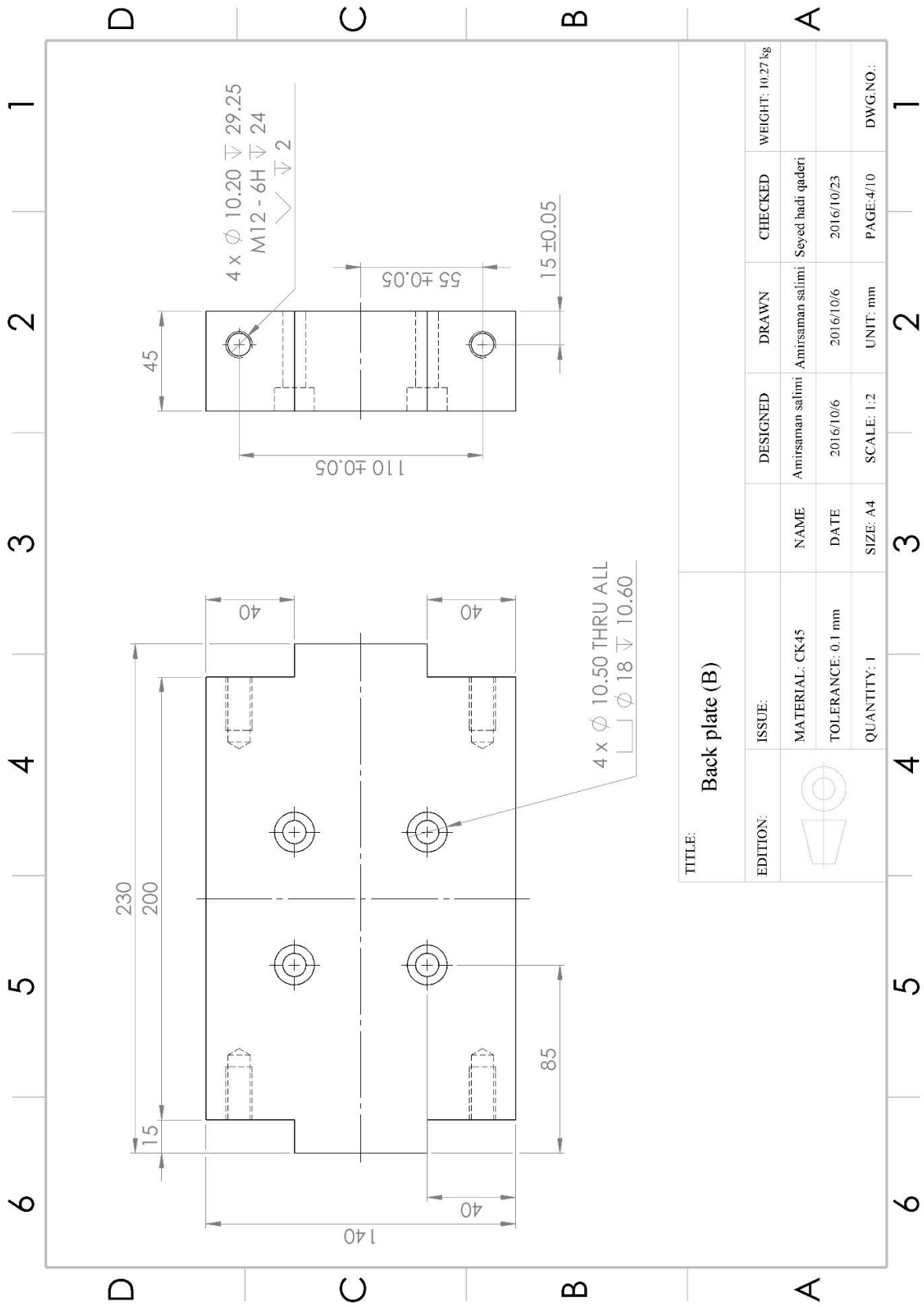
1 2 3 4 5 6

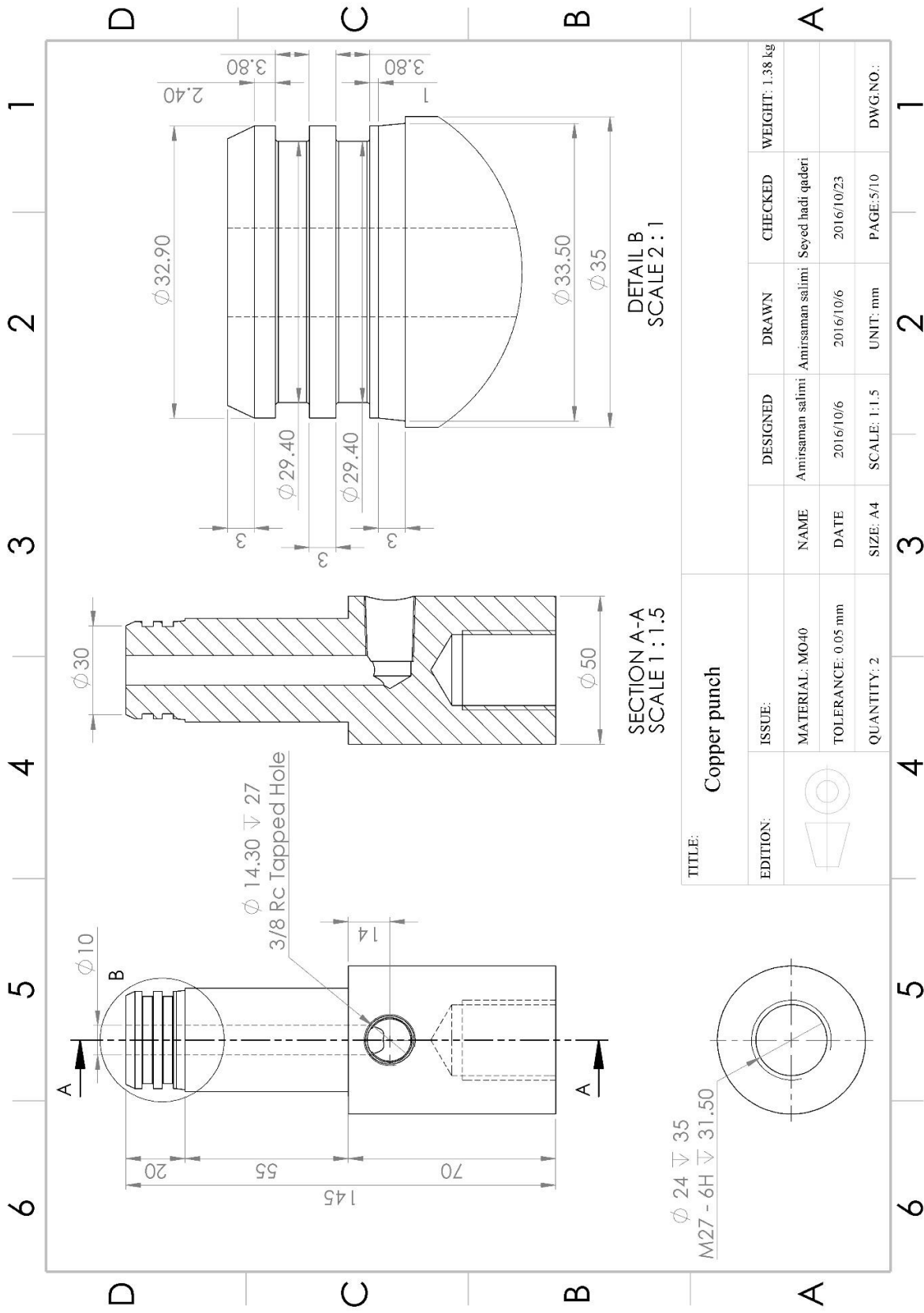
1 2 3 4 5 6

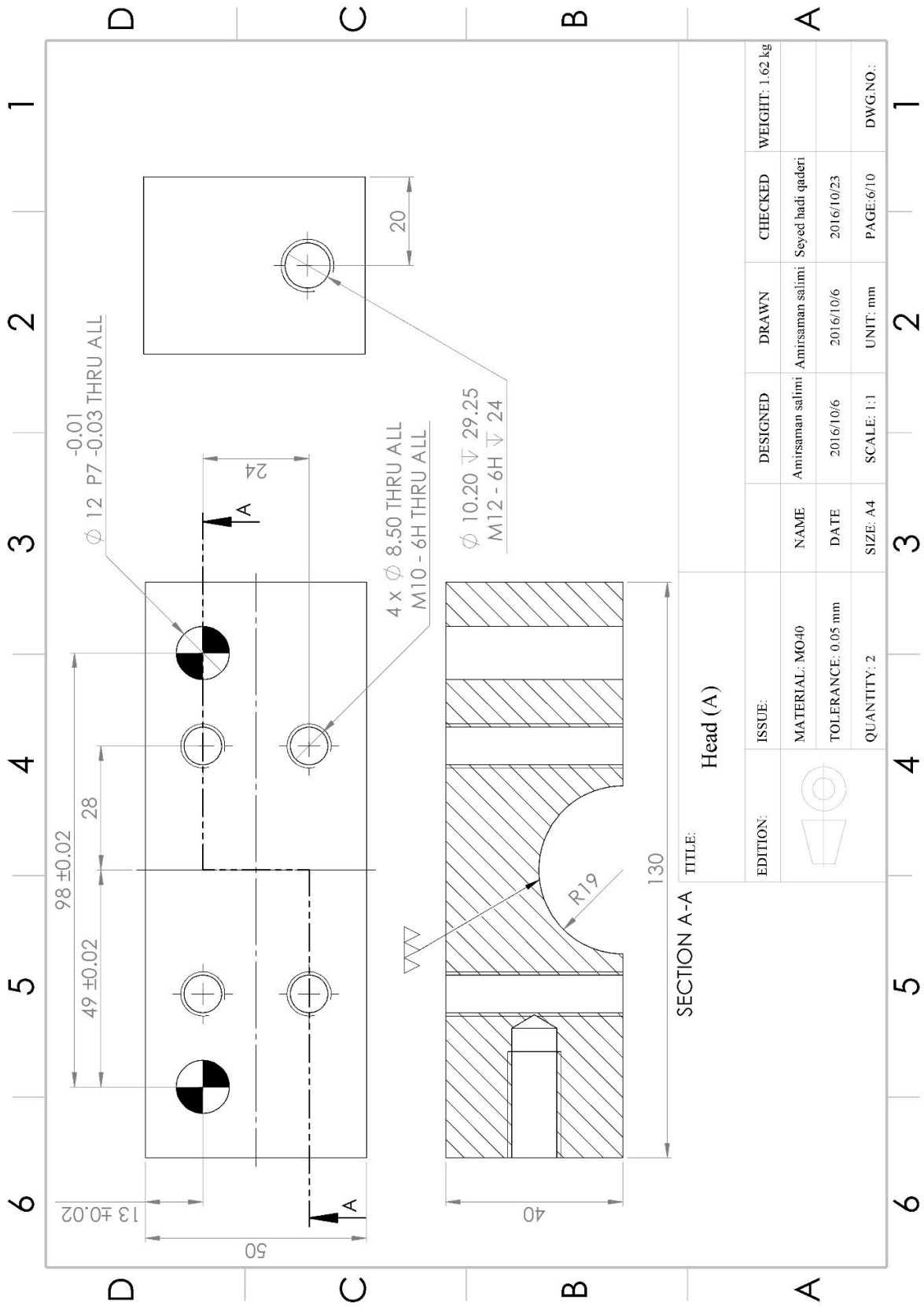
D C B A











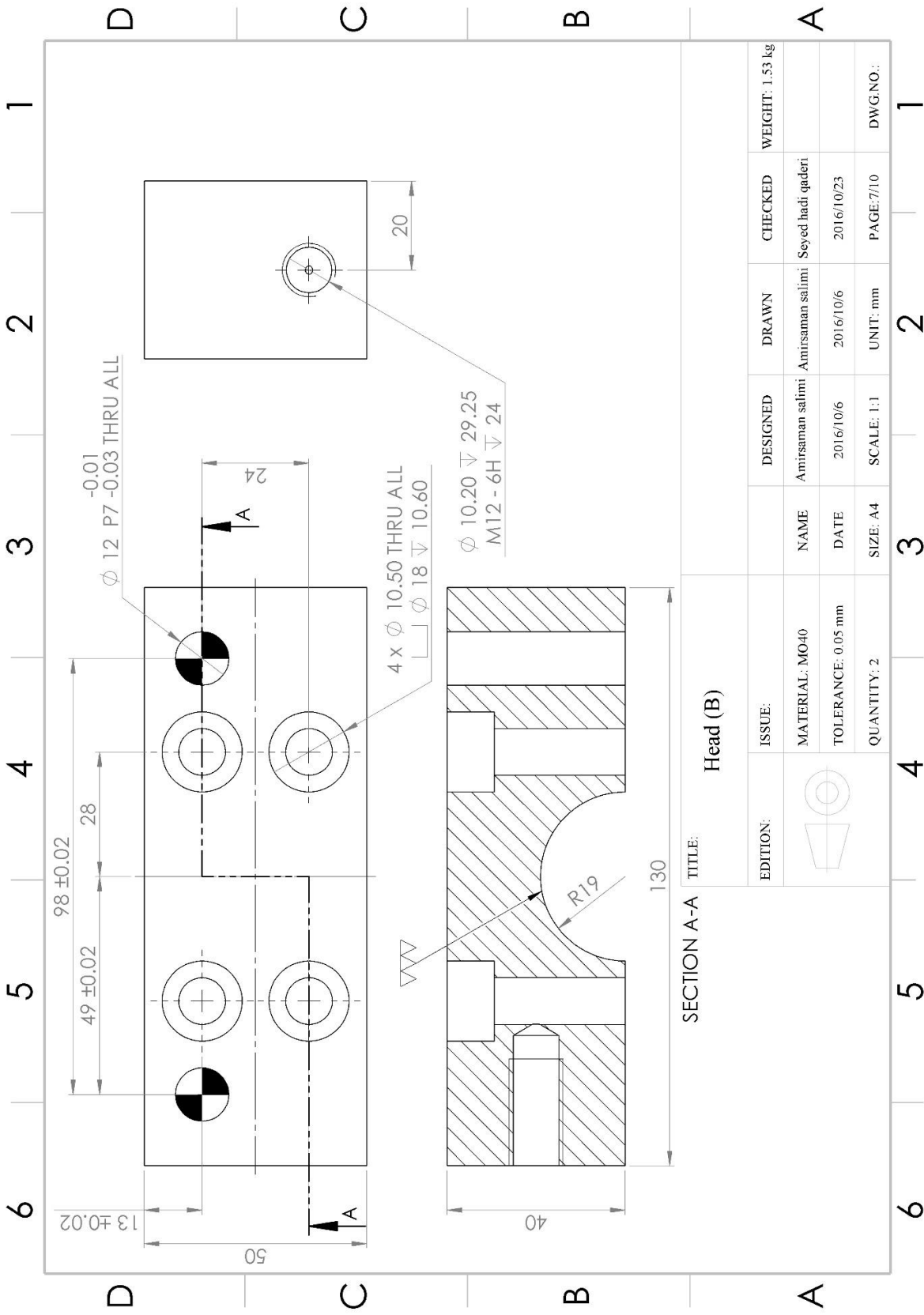
EDITION:	ISSUE:	DESIGNED:	DRAWN:	CHECKED:	WEIGHT:
	MATERIAL: MO40 TOLERANCE: 0.05 mm QUANTITY: 2	Amirsaman salimi	Amirsaman salimi	Seyed hadi qaderi	1.62 kg
		DATE: 2016/10/6	DATE: 2016/10/6	DATE: 2016/10/23	
		SCALE: 1:1	UNIT: mm	PAGE: 6/10	DWG.NO.:

1 2 3 4 5 6 9

D C B A

D C B A

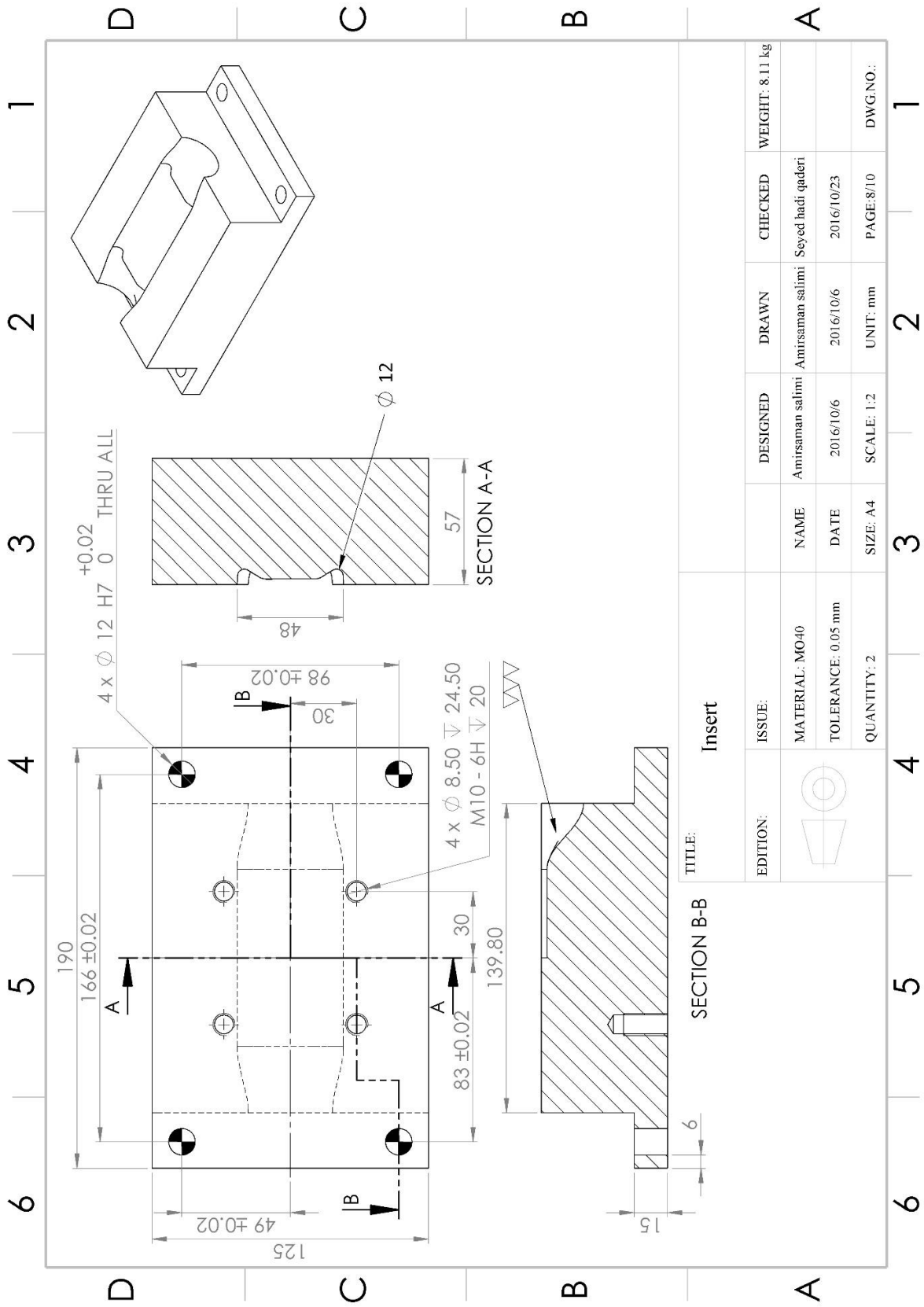
1 2 3 4 5 6

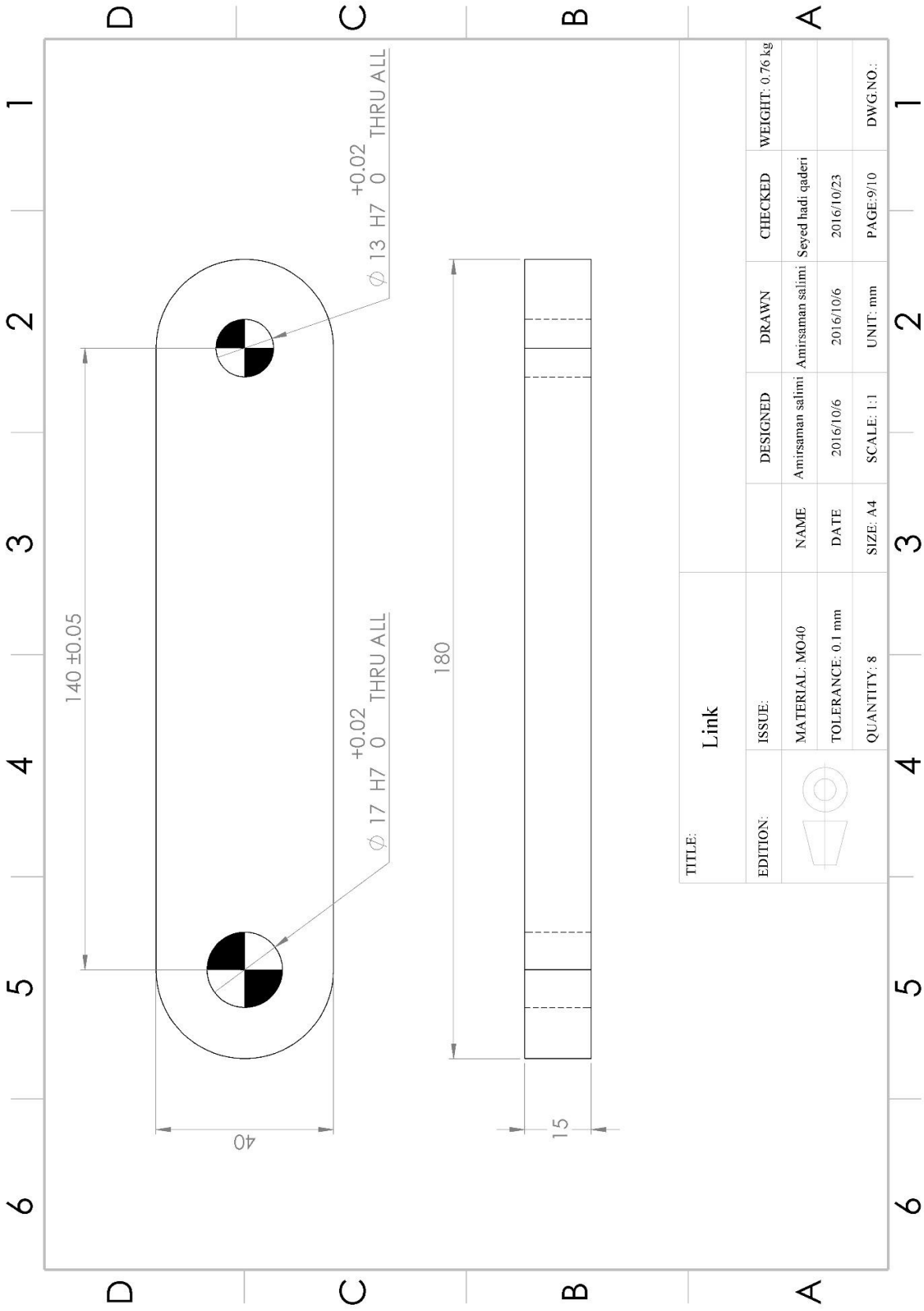


EDITION:	ISSUE:	DESIGNED:	DRAWN:	CHECKED:	WEIGHT:
	MATERIAL: MO40 TOLERANCE: 0.05 mm QUANTITY: 2	Amirsaman salimi 2016/10/6	Amirsaman salimi 2016/10/6	Seyed hadi qaderi 2016/10/23	1.53 kg

SECTION A-A

1 2 3 4 5 6 1 2 3 4 5 6









## منبع ها

1. Grey, J.E., A.P. Devereaux, and W.N. Parker, *Apparatus for making wrought metal T's*, US Patent 2,203,868 June. 1940.
2. Nefussi, G. and A. Combescure, *Coupled buckling and plastic instability for tube hydroforming*. International Journal of Mechanical Sciences, 2002. **44**(5): p. 899-914.
3. Shah, S. and C. Bruggemann. *Hydroforming products and process requirements and implementation*. in *Proceedings of the 2nd Annual Automotive Tube Conference, Dearborn, Michigan*. 1997.
4. Maeno, T., K.-i. Mori, and K. Fujimoto, *Hot gas bulging of sealed aluminium alloy tube using resistance heating*. Manufacturing Review, 2014. **1**: p. 5.
5. Yogo, T., *Hammering parts with hydroforming*. The Tube & Pipe Journal 2010. **October/November**.
6. Nikhare, C., M. Weiss, and P. Hodgson, *FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel*. Computational materials science, 2009. **47**(1): p. 146-152.
7. Aue-U-Lan, Y., G. Ngaile, and T. Altan, *Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification*. Journal of Materials Processing Technology, 2004. **146**(1): p. 137-143.
8. Ahmetoglu, M. and T. Altan, *Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. **98**(1): p. 25-33.
9. Asnafi, N. and A. Skogsgårdh, *Theoretical and experimental analysis of stroke-controlled tube hydroforming*. Materials Science and Engineering: A, 2000. **279**(1): p. 95-110.
10. Trana, K., *Finite element simulation of the tube hydroforming process—bending, preforming and hydroforming*. Journal of Materials Processing Technology, 2002. **127**(3): p. 401-408.
11. Kang, S.-J., H.-K. Kim, and B.-S. Kang, *Tube size effect on hydroforming formability*. Journal of materials processing technology, 2005. **160**(1): p. 24-33.
12. Yuan, S., et al., *Control and use of wrinkles in tube hydroforming*. Journal of Materials Processing Technology, 2007. **182**(1): p. 6-11.
13. Mori, K., T. Maeno, and S. Maki, *Mechanism of improvement of formability in pulsating hydroforming of tubes*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007. **47**(6): p. 978-984.
14. Mohammadi, F. and M.M. Mashadi, *Determination of the loading path for tube hydroforming process of a copper joint using a fuzzy controller*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009. **43**(1-2): p. 1-10.
15. Imaninejad, M., G. Subhash, and A. Loukus, *Loading path optimization of tube hydroforming process*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005. **45**(12): p. 1504-1514.
16. Fiorentino, A., E. Ceretti, and C. Giardini, *Tube hydroforming compression test for friction estimation—numerical inverse method, application, and analysis*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **64**(5-8): p. 695-705.

17. Shahri, S.E., et al., *Ultrasonic tube hydroforming, a new method to improve formability*. Procedia Technology, 2015. **19**: p. 90-97.
18. Bihanta, R., et al., *Global optimisation of the production of complex aluminium tubes by the hydroforming process*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2015. **9**: p. 1-11.
19. Hashemi, S., et al., *Prediction of bulge height in warm hydroforming of aluminum tubes using ductile fracture criteria*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015. **15**(1): p. 19-29.
20. Liu, G., et al., *Analysis on critical conditions of sidewall wrinkling for hydroforming of thin-walled Tee-joint*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015. **97**: p. 42-49.
21. "Bulk Modulus and Fluid Elasticity." *engineeringtoolbox.com*, Web 10 Jan 2017.
22. ABAQUS Documentation, *Ver 6.14* Dassault Systemes Simulia Corporation, 2014.
23. Elyasi, M., M. Bakhshi-Jooybari, and A. Gorji, *A new die design for the hydroforming of stepped tubes*. International journal of material forming, 2010. **3**(1): p. 71-75.
24. ASTM, E., *8M-00b*. Standard test methods for tension testing of metallic materials, 2001: p. 2-3.
25. Davis, J.R., *Copper and copper alloys*. 2001: ASM international.



## Abstract

Tube hydroforming is a relatively new process of tube forming which is taken into consideration by automotive and aerospace industry due to its greater stiffness to weight ratio, lower tooling cost and manufacturing steps. In this process tube is placed in a die and it will fill the die cavity by applying internal fluid pressure and axial feeding. Several researches performed in order to improve formability and efficiency of this process. In this thesis, increasing of tube formability by using a new method of hydroforming process has been investigated. At first a hydroforming die is designed to form an "I" section tube. In order to obtain the mechanical properties of as received and annealed tube a series of uniaxial tensile test is preformed. Finite element analysis of the hydroforming process was carried out using conventional methods and proposed method in this study. Comparing the results of these two analysis, it was found that by using the proposed method of this thesis, at the same fluid pressure, the tube formability of the as received and annealed tubes increased by 17% and 30% respectively. In addition to that it was found that the fluid pressure required to obtain a certain section height is reduced by 53% and 90% for as received and annealed tube respectively. After ensuring the results of analyzes, the hydroforming die was constructed. To maintain the die symmetry during closure, a four-linkage mechanism was used. Tests were carried out according to finite element analysis for as received and annealed tubes for conventional and proposed methods. The section height and volume of the tube were compared with the results of finite element analysis, which consistently correlated with the results.

**Keywords:** Tube forming, Tube hydroforming (THF), Die corner filling, Finite element analysis.





**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering**  
**M.Sc. Thesis in Mechanical Engineering**

**Study on metal tube forming through combined  
low and high pressure hydroforming**

**By:**

**Amirsaman Salimi**

**Supervisor:**

**Dr. Seyed Hadi Ghaderi**

**September 2017**