

## طراحی و ساخت فرایند پرس لوله به فلنج به روش هیدروفرمینگ در لوله‌های سوخت هواپیما

محمد نجاتی<sup>۱\*</sup>، سعید قاسمیان گودگاز<sup>۲</sup>، امین قره‌چاهی<sup>۳</sup>

۱- دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۹)

### چکیده

در این مطالعه به پرس لوله‌های سامانه سوخت هواپیماها از جنس *Al5052-O* داخل فلنج *Al17075-T6* پرداخته شده است. فرایند هیدروفرمینگ با استفاده از فشار روغن جهت ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ و پرس لوله به فلنج استفاده شده است. کار حاضر ابتدا مورد بررسی و طراحی قرار گرفته، سپس با یک روش نوآورانه ابزار خاص برای کنترل ناحیه اعمال فشار هیدروفرمینگ ساخته شده است. جهت بررسی نشی و مشاهده هرگونه عیب مکانیکی، قطعات ساخته شده مورد آزمون‌های آزمایشگاهی تحت فشار بالا قرار گرفته‌اند. همچنین طراحی صورت گرفته با استفاده از روش المان محدود شبیه‌سازی شده است. در این راستا سعی شده تا حد امکان شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت بوده تا نتایج دقیق حاصل گردد. نتایج عددی بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی که قابلیت اندازه‌گیری آنها وجود داشت، مقایسه شده است. در مدلسازی عددی لوله‌های سوخت با قطر و ضخامت مختلف مورد تحلیل قرار گرفته و توزیع تنش و جابجایی بدست آورده شده است. نتایج عددی تطابق بسیار خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد بیشترین تنش باقیمانده در ناحیه تماس لوله و فلنج بیش از ۳۰۰ مگاپاسکال است که آب‌بندی این اتصال را تضمین می‌کند. همچنین اگر فشار هیدروفرمینگ بیش از اندازه بالا باشد حداکثر تنش باقیمانده در ناحیه اتصال کمی کاهش پیدا خواهد کرد. در تحقیق حاضر محدوده فشار مورد نیاز به صورت بهینه محاسبه شده تا تنش باقیمانده‌ی مطلوبی برای آب‌بندی و اتصال حاصل گردد. به طور کلی این مقاله روشی کاملاً علمی و کاربردی برای ایجاد یک اتصال آب‌بند دائمی ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: لوله، فلنج، هیدروفرمینگ، شبیه‌سازی المان محدود، *Al17075-T6*، *Al5052-O*

## Design and manufacture of the pipe-to-flange pressing process using hydroforming in aircraft fuel pipes

Mohammad Nejadi<sup>1\*</sup>, Saeid Ghasemian Godegaz<sup>2</sup>, Amin Gharehchahi<sup>3</sup>

### Abstract

In this study, the pressing of aircraft fuel system pipes made of *Al5052-O* into *Al17075-T6* flanges has been studied. The hydroforming process uses oil pressure to create large deformations and press the pipe to the flange. The present work was first investigated and designed, then a special tool was made with an innovative method to control the hydroforming pressure application area. In order to check for leaks and observe any mechanical defects, the manufactured parts were subjected to laboratory tests under high pressure. The design was also simulated using the finite element method. In this regard, an attempt was made to make the simulation as close to reality as possible in order to obtain accurate results. The obtained numerical results were compared with the laboratory results that were measurable. In numerical modeling, fuel pipes with different diameters and thicknesses were analyzed and the stress and displacement distributions were obtained. The numerical results show a very good agreement with the experimental results. The simulation results show that the maximum residual stress in the contact area of the pipe and flange is more than 300 MPa, which ensures the sealing of this connection. Also, if the hydroforming pressure is too high, the maximum residual stress in the connection area will decrease slightly. In the present study, the required pressure range is optimally calculated to achieve a desirable residual stress for sealing and connection. In general, this article presents a completely scientific and practical method for creating a permanent sealed connection.

**Key words:** Tube, Flange, Hydroforming, Finite Element Simulation, *Al 17075-T6*, *Al 5052-O*

\* نویسنده پاسخگو: محمد نجاتی تلفن: ۰۹۰۳۰۱۹۵۱۲۵ پست الکترونیک: [m.nejati313@gmail.com](mailto:m.nejati313@gmail.com)

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



## مقدمه

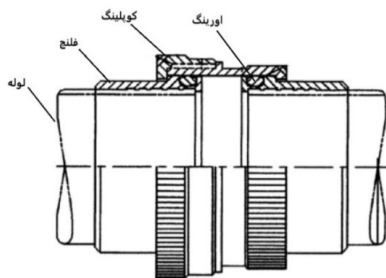
آببندی لوله و فلنج‌های اتصال در سیستم سوخت‌رسانی هواپیماها از اهمیت بالایی برخوردار است. نشستی در این اتصالات، بخصوص اتصال لوله به فلنج ممکن است خسارات جبران ناپذیری را برای وسیله‌ی پرنده و خدمه‌ی آن به همراه داشته باشد. لوله‌های سوخت هواپیما معمولاً از جنس نرم بوده و در صورت قابلیت جوشکاری فلنج بر روی آن‌ها باعث شکنندگی لوله می‌شود. هیدروفرمینگ خلاء تولیدی را با امکان شکل‌پذیری مواد بالاتر از شکل‌دهی سرد معمولی [۱] با هزینه و زمان چرخه کمتر در مقایسه با سایر فناوری‌های شکل‌دهی ورق فلزی تخصصی و غیر سنتی مانند شکل‌دهی فوق‌پلاستیک یا شکل‌دهی خزشی، پر می‌کند [۲]. هیدروفرمینگ نوعی فناوری شکل‌دهی فلزات است که در آن از مایع به عنوان واسطه انتقال نیرو برای تغییر شکل ورق یا لوله به شکل دلخواه استفاده می‌شود. این روش همچنین به عنوان شکل‌دهی هیدرولیکی شناخته می‌شود [۳]. فرآیند هیدروفرمینگ را می‌توان به سه دسته مجزا تقسیم کرد: لوله، ورق و پوسته [۱، ۴-۶]. نمونه‌ای از اینکه چگونه کیفیت می‌تواند با هیدروفرمینگ بهبود یابد این است که افزایش پیچیدگی در فرآیند تولید برای طراحی ساده با حذف خطوط جوش از ساخت و کاهش نقاط ضعف بالقوه در طرح‌های آن‌ها استفاده شود [۷]. با توجه به افزایش تقاضا برای قطعات سبک وزن، فرآیندهای هیدروفرمینگ به طور گسترده برای -ساخت و تولید قطعات در زمینه‌های مختلف از جمله صنایع خودروسازی، هواپیما، هوافضا و کشتی‌سازی استفاده می‌شود [۸]. در زمینه کاربرد هوایی به روش هیدروفرمینگ لوله می‌توان به مراجع [۹-۱۱] اشاره نمود. یوان و همکاران [۱۲] کاربرد هیدروفرمینگ لوله آلومینیومی (LF2M) در صنایع هواپیماسازی و هوافضا را بررسی کردند و پارامترهای موثر در کار آنها مورد بررسی قرار گرفته است.

افشار و همکاران [۱۳] به مطالعه منحنی‌های حد شکل-گیری<sup>۱</sup> از لوله‌های AI7020-T6 تحت فشار داخلی هیدروفرمینگ و تغذیه محوری به صورت عددی و آزمایشگاهی پرداخته‌اند. دی‌گرام حد شکل‌گیری<sup>۲</sup> محاسبه شده با یک سری آزمایش‌های برآمدگی تأیید شده‌اند. طراحی یک ابزار باید ساده و بصره باشد و اجازه نظارت در حین آزمایش، به عنوان مثال

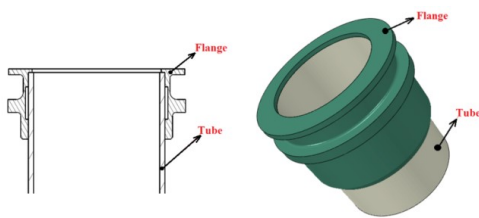
هیدروفرمینگ لوله را بدهد. سیسارووا و همکاران [۱۴] به طراحی و ساخت ابزار آزمایشی برای هیدروفرمینگ شعاعی لوله‌های با ضخامت نازک با انتهای ثابت پرداخته شده است. مزیت اصلی این ابزار امکان نظارت بر آزمایش در حین انجام آن است و متعاقباً امکان استفاده از روش بسیار دقیق و مدرن اندازه‌گیری تغییر شکل توسط سیستم اندازه‌گیری نوری سه بعدی غیر تماسی ARAMIS را فراهم می‌کند. از دیگر مزایای ابزار طراحی شده می‌توان به ساخت ساده، جداسازی آسان، ایمنی و استفاده در کارگاه‌های معمولی بدون نیاز به سیستم‌ها و دستگاه‌های هیدرولیک پیچیده اشاره کرد. برای تکامل سریع فناوری هیدروفرمینگ لوله، از شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده می‌شود [۱۵]. امروزه کدهای صنعتی زیادی برای شبیه‌سازی عددی هیدروفرمینگ لوله وجود دارد. نرم‌افزارهایی همانند ال-اس‌داینآ، آباکوس<sup>۴</sup> [۱۵]، دیفورم<sup>۵</sup> [۱۶]، و رادیوس<sup>۶</sup> بر اساس رویکردهای کلاسیک نمو افزایشی می‌باشند [۱۸]. نرم-افزارهایی همچون FASTFORM، AUTOFORM، HYPERFORM نیز مبتنی بر رویکردهای یک مرحله‌ای هستند [۱۹، ۲۰]. یوان [۲۱] به مطالعه وضعیت فعلی اصول و فرآیندهای هیدروفرمینگ تحت فشار پایین اجزای لوله‌ای، هیدروفرمینگ تحت فشار دوطرفه اجزای ورقی، هیدروفرمینگ بدون قالب پوسته‌های بیضوی و شکل‌دهی محیط گرم سخت‌شونده دوگانه مواد سخت تغییرشکل‌پذیر پرداخته و توجه ویژه‌ای به رفتار تغییر شکل، تنظیم حالت تنش، جلوگیری از نقص و کاربردهای معمول داشته است. در این مطالعه چندین مورد نتایج عددی با کار تجربی مقایسه شده است. اجزای لوله‌ای به طور گسترده در هوافضا، هسته‌ای، ساختمان، صنایع شیمیایی، معدن، کشاورزی، پزشکی و سایر زمینه‌ها کاربرد دارند [۲۲]. به خصوص، در اجزای لوله‌ای هواپیما به عنوان بخشی از سیستم انتقال دهنده سوخت، اتصالات لوله‌ای شکل نقش مهمی در اتصال و آببندی مطمئن سیستم خط لوله ایفا می‌کنند [۲۳، ۲۴]. به طور کلی، اتصالات لوله‌ای شکل از طریق تغییر شکل پلاستیک ساخته می‌شوند. یانگ<sup>۷</sup> و همکاران [۲۵] با ترکیب شبیه‌سازی عددی و بررسی تجربی، رفتار تغییر شکل اتصال لوله‌ای شکل را در فرآیند شکل‌دهی برآمدگی الاستومری بررسی کرده‌اند. لوله متصل شده توسط الاستومر پلی اورتان<sup>۸</sup> (PUE) به داخل شیار غلاف لوله متورم

کوپلینگ‌های انعطاف پذیر رزوه‌دار<sup>۱۳</sup> قابلیت حفظ آب‌بندی را در جابجایی و لرزشهای لوله‌ها دارند. از مهمترین این نوع اتصالات قطعات تولید شده در شرکت ETON هستند این نوع اتصالات حدود ۲ درجه تغییر زاویه و ۱۰ میلی‌متر جابجایی طولی را بدون از دست دادن آب‌بندی و اعمال بار اضافی بر روی لوله تحمل می‌کنند. در شکل ۱ نمونه‌ای از این نوع اتصالات از کاتالوگ ETON نشان داده شده است [۲۸].

آنچه که در این مقاله مورد توجه است فرایند اتصال لوله به فلنج می باشد. در شکل ۲ نمایی از لوله و فلنج روی آن نشان داده شده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌های این نوع اتصالات، متصل ساختن لوله به فلنج می‌باشد. در بعضی از انواع این نوع اتصالات از روش جوشکاری قوسی گاز تنگستن<sup>۱۴</sup> برای اتصال لوله به فلنج استفاده می‌گردد. با این وجود، ایمن‌ترین راه مخصوصاً برای لوله‌های آلومینیومی نرم، پرس یا فرم‌دهی لوله در فلنج می‌باشد، چون جوش دادن باعث تغییر ساختار لوله و حتی ایجاد ترک در آن می‌شود. در میان روش‌هایی که برای پرس وجود دارد یکی از روش‌ها فرم دادن لوله در فلنج استفاده از اکسپندر می‌باشد. در این روش با قرار دادن لوله و فلنج در قالب، اکسپندر در داخل لوله با اعمال گشتاور به صورت آهسته، باز شده و لوله به فلنج پرس می‌نماید.



شکل ۱- اتصال قطعات شرکت ETON [۲۸]



شکل ۲- نمای شماتیک لوله و فلنج پرس شده بر روی آن

می‌شود تا آب‌بندی و اتصال ایجاد گردد. آلوز<sup>۹</sup> و همکاران [۲۶] یک فرایند اتصال مبتنی بر تغییر شکل پلاستیک را برای ساخت یک اتصال لوله‌ای شکل به ورق لوله<sup>۱۰</sup> (ورق فلزی با سوراخ‌هایی جهت جایگذاری لوله) پیشنهاد کردند. ورق لوله داخل یک فرورفتگی دایره‌ای روی لوله فرو می‌رود تا قطر خارجی لوله به آن جفت شود. سپس انتهای آزاد لوله روی فرورفتگی دایره‌ای خود، فشرده شده تا اتصال لوله و ورق لوله تکمیل شود. می‌توان نتیجه گرفت که اتصال لوله‌ای شکل با فرم دادن لوله داخل المانهای هندسی اضافی مانند شیارهای محیطی یا برآمدگی‌ها، تحت بارگذاری موضعی اتصال و آب‌بندی را محقق می‌کند. سان<sup>۱۱</sup> و همکاران [۲۷] بکمک یک مدل المان محدود سه‌بعدی فرایند شکل‌دهی یک لوله از جنس Ti-3Al-2.5V با یک اتصال را با روش سوئیچینگ<sup>۱۲</sup> خارجی، شبیه‌سازی کرده و با نتایج تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد چگونه بار هیدرولیکی شعاعی در طول شکل‌دهی به بارهای محیطی تبدیل می‌شود. کرنش محیطی یک ناحیه آب‌بندی قوسی شکل بین سطوح تماس لوله و اتصال ایجاد می‌کند و آب‌بندی و استحکام اتصال را فراهم می‌کند.

شیوه مرسوم در اتصال فلنج‌ها به لوله پرس کردن می‌باشد. روش متداول برای این کار، له کردن لوله در شیارهای تعبیه شده بر روی فلنج به کمک ابزار به نام اکسپندر (Expander) است. از مهمترین معایب این روش قابل کنترل نبودن میزان له شدگی داخل فلنج و ایجاد خراش روی سطح داخلی لوله می‌باشد. بدین منظور در کار حاضر از روش هیدروفرمینگ برای پرس لوله به فلنج بهره گرفته شده است. این روش با کمک قالب و تزریق روغن به داخل لوله امکان پذیر است که تمامی مراحل طراحی و ساخت در این کار برای اولین بار انجام گرفته است. فرایند تولید و اتصال بین لوله و فلنج نیازمند تحلیل‌های عددی و تجربی بوده و از آنجا که آزمایش‌های تجربی هزینه‌ی بالایی دارند، بهتر است از تحلیل‌های عددی برای تخمین‌های اولیه و یا دقیق استفاده شود. در این مقاله برای تحلیل عددی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است که در زمینه‌ی تحلیل‌های غیرخطی بسیار شناخته شده است.

## پرس لوله به فلنج با روش هیدروفرمینگ

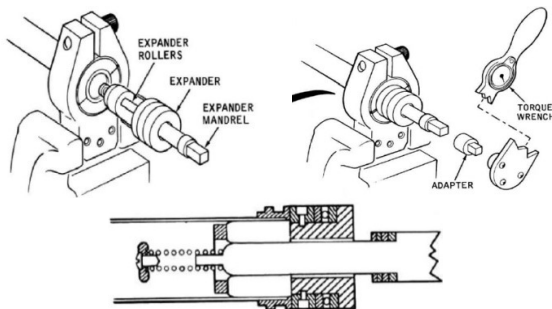
معمول که از یک پمپ با دبی و فشار بالا استفاده می‌کنند در طرح حاضر طراحی به گونه‌ای صورت گرفته است که پرس بدون نیاز به پمپ با دبی بالا انجام خواهد شد.

همانطور که در شکل ۵ (الف) نشان داده شده است ابتدا پرآب تزریق به همراه کانال تزریق داخل لوله و فلنج قرار می‌گیرد. در این مرحله فلنج روی لوله قرار گرفته و هنوز پرس نشده است.

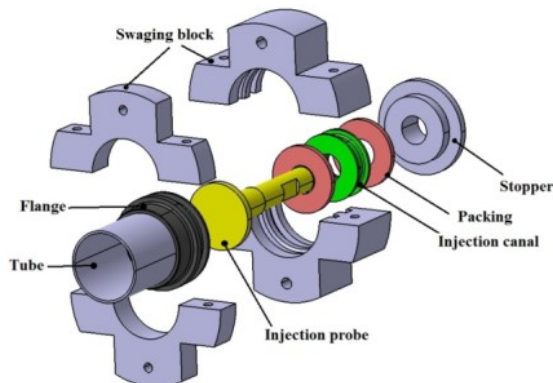
در مرحله بعد blockهای بالا و پایینی و stopper (نگه-دارنده) روی مجموعه بسته می‌شوند (شکل ۵ (ب)). سپس با کمک پمپ هیدرولیک دستی، روغن با فشار مشخصی به داخل لوله منتقل شده و لوله را به فلنج پرس می‌کند. مقدار فشار بر حسب قطر لوله و ضخامت آن متفاوت می‌باشد.

### تست نشتی و عیوب مکانیکی

جهت بررسی نشتی لوله‌های پرس شده به فلنج به روش هیدروفرمینگ، درپوش‌هایی<sup>۱۷</sup> طراحی شده که در دو انتهای لوله بسته می‌شوند (شکل ۶). سپس با استفاده از فشار هیدرواستاتیک به اندازه ۷ bar لوله و فلنج تحت فشار قرار می‌گیرند. در حین آزمون و در پایان آن هیچگونه نشتی مشاهده نشده است.



شکل ۳- اکسپندر برای اتصال فلنج به لوله در اتصالات از نوع گاما [۲۹]

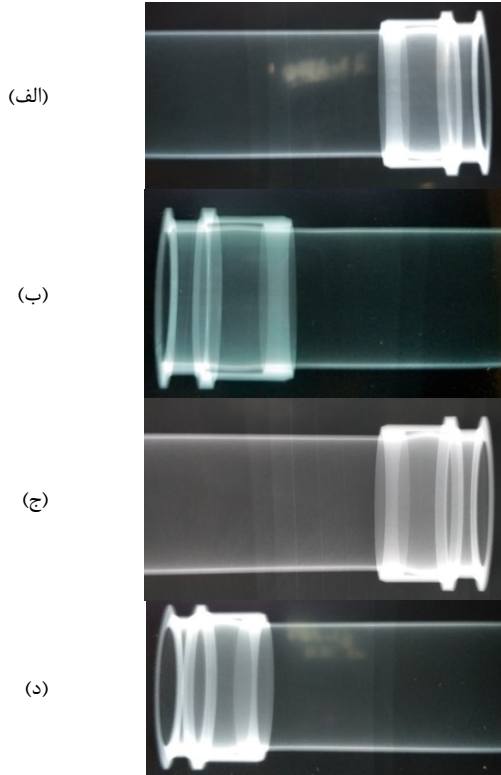


شکل ۴- نمای انفجاری از سیستم هیدروفرمینگ پرس لوله در فلنج

در شکل ۳ شماتیکی از استفاده از اکسپندر برای پرس لوله‌ها به فلنج از نوع گاما<sup>۱۵</sup> نشان داده شده است. در مرجع [۲۹] گشتاور مورد نیاز برای پرس فلنج به لوله‌ها ارائه شده است. در این مرجع نشان داده شده است که با افزایش قطر لوله مقدار گشتاور مورد نیاز زیاد می‌شود این در حالی است که در روش هیدروفرمینگ در کار حاضر با افزایش قطر لوله، فشار خیلی بالایی نسبت به قطرهای کمتر نیاز نمی‌باشد. اساساً با توجه به بزرگ شدن قطر لوله مقدار تنش در لوله با ضخامت و فشار روغن یکسان افزایش یافته و تغییر شکل پلاستیک زودتر رخ می‌دهد. اما از آنجایی که در اکسپندرهای معمول، از لهیدگی جهت آب‌بندی استفاده می‌شود برای ایجاد لهیدگی در قطرهای بزرگتر به نیروی بیشتری احتیاج خواهد بود. از هیدروفرمینگ در اکثر موارد برای فرم-دهی قطعات استفاده شده است و کمتر از آن برای پرس دو قطعه در یکدیگر استفاده می‌شود، چرا که برگشت الاستیک می‌تواند سبب جدا شدن دو قطعه از یکدیگر گردد. اما در تحقیق حاضر طراحی قالب‌ها به گونه‌ای انجام شده است که پس از تغییر شکل پلاستیک لوله، برگشت الاستیک لوله و فلنج سبب باقی ماندن تنش بین لوله و فلنج پس از باربرداری شود. این تنش سبب ایجاد آب‌بندی بین لوله و فلنج می‌گردد.

### روند انجام آزمون‌های تجربی

در کار حاضر سازوکار جدیدی جهت تزریق روغن تحت فشار داخل لوله برای پرس کردن آن داخل فلنج طراحی و ساخته شده است. از مهمترین اعضاء این مجموعه قالب‌ها (block)، پرآب<sup>۱۶</sup> و کانال تزریق می‌باشند. طراحی قالب‌ها و کانال تزریق روغن و کنترل فشار در ناحیه چند میلیمتری در داخل لوله جزء نوآوری‌های روش ارائه شده می‌باشد. در شکل ۴ نمای انفجاری از سیستم طراحی شده برای فرایند هیدروفرمینگ لوله‌ی سوخت به همراه جزئیات آن نشان داده شده است. ضروری است که فرایند هیدروفرمینگ لوله قابلیت دستیابی و حفظ فشار شکل‌دهی مورد نیاز را داشته باشد. در کار حاضر تدابیر مورد نیاز اندیشیده شده است که در حین فرایند قادر به تحمل فشار شکل‌دهی بالا بوده و تمام سیال پر فشار را بدون نشتی حفظ می‌کند. این مهم با استفاده از طراحی پرآب تزریق و آب‌بندی مناسب حاصل شده است. لازم به ذکر است که بر خلاف اکثر فرایندهای هیدروفرمینگ



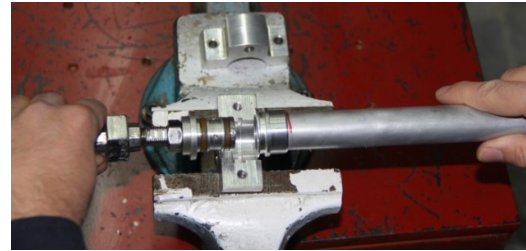
شکل ۷- الف) فشار داخلی ۱۵ MPa، قطاع ۰ درجه، ب) فشار داخلی ۱۵ MPa، قطاع ۴۵ درجه، ج) فشار داخلی ۲۰ MPa، قطاع ۰ درجه، د) فشار داخلی ۲۰ MPa، قطاع ۴۵ درجه

### شبیه‌سازی

استفاده از روش سعی و خطا بصورت تجربی در فرآیند هیدروفرمینگ بسیار هزینه بر و زمانبر است، بنابراین، استفاده از مدل‌سازی عددی برای فرآیند هیدروفرمینگ بسیار کمک کننده در طراحی و به صورت یک بهبود دهنده کارآمد در این فرآیند بوده که موجب اجتناب از هزینه‌ی اضافی برای تهیه مواد و تولید، کوتاه کردن زمان تولید و بررسی و تحقیق روی پارامترهای مختلف طراحی می‌گردد.

یوان [۳] در مطالعه خود در مورد استفاده از حل عددی برای فرآیند هیدروفرمینگ و تعیین ضخامت نهایی ورق و سایر پارامترها به چندین مورد اشاره کرده است.

اجرای این بخش وابسته به پارامترهای مختلفی همچون فشار داخلی، نوع بارگذاری و ... می‌باشد. برای شبیه‌سازی المان محدود، مقادیر دقیقی از خواص، هندسه و شرایط مرزی مورد نیاز می‌باشد. خواص الاستیک-پلاستیک A15052-O و A17075-T6 که در این مقاله به ترتیب برای لوله و فلنج در



(الف)



(ب)



(ج)

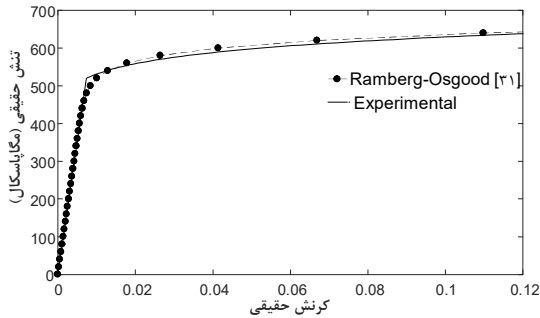
شکل ۵- الف) وارد کردن پرآب داخل لوله، ب) اتصال block های بالا و پایین لوله و فلنج، ج) میز طراحی برای عملیات هیدروفرمینگ



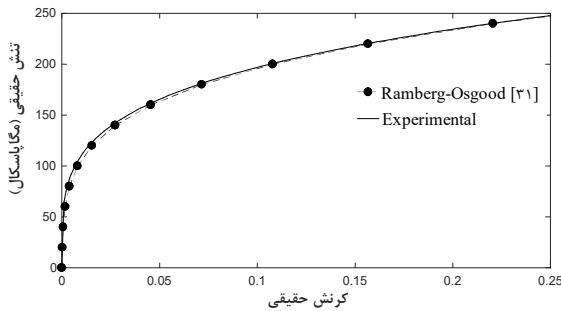
شکل ۶- تست ناشی لوله پرس شده به فلنج به روش هیدروفرمینگ

تست‌های انجام شده برای سایزهای متفاوت ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ اینچ در ضخامت‌های ۰/۰۳۵، ۰/۰۴۹ و ۰/۰۵۸ اینچ انجام شده است. همچنین برای بررسی وجود عیوب مکانیکی همچون ترک بعد از فرآیند پرس لوله به فلنج به روش هیدروفرمینگ، به ازای فشار هیدروفرمینگ ۱۵ و ۲۰ تصاویر رادیوگرافی تهیه شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود هیچگونه ترک و عیبی در لوله و فلنج بعد از عملیات پرس به روش هیدروفرمینگ وجود ندارد.

سازمان<sup>۲۲</sup> استفاده شده است. المان استفاده شده در این کار CAX4R<sup>۲۳</sup> می باشد که یک المان چهار گره ای متقارن محوری می باشد [۳۲]. برای تحلیل در نرم افزار آباکوس از حلگر Implicit (ضمنی) بهره گرفته شده است. ضریب اصطکاک برای آلومینیوم-آلومینیوم ۰/۵۷ می باشد [۳۳].

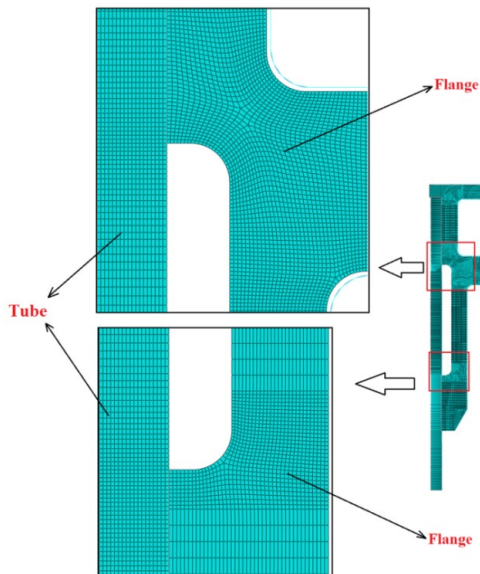


(الف)



(ب)

شکل ۸- منحنی تنش-کرنش الف) AL7075-T6، ب) AL5052-O



نظر گرفته شده اند، مورد استفاده قرار گرفته بصورت تجربی مشخص شده است.

### تست کشش AL5052-O و AL7075-T6

جنس فلنج از آلومینیوم 7075-T6 و جنس لوله ای سوخت از آلومینیوم 5052-O می باشد. نمونه های تست کشش از این دو ماده تهیه شده و خواصی کششی آنها طبق استاندارد ASTM E8-16 [۳۰] بدست آورده شده است. خواص مکانیکی بدست آمده از تست کشش تک محوره از این دو ماده در

جدول ۱ ارائه شده است. در جدول فوق  $E$ ،  $\nu$ ،  $\sigma_y$ ، بترتیب مدول یانگ، ضریب پواسون و تنش تسلیم می باشند. در این مطالعه رابطه تنش-کرنش تک محوره بصورت معادله رامبرگ-آزگود<sup>۱۸</sup> در نظر گرفته شده است [۳۱].

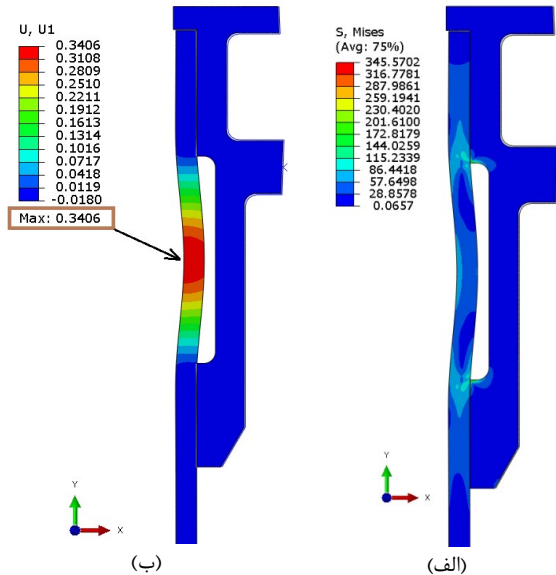
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left( \frac{\sigma}{H} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

جدول ۱- خواص مکانیکی AL5052-O و AL7075-T6 از تست

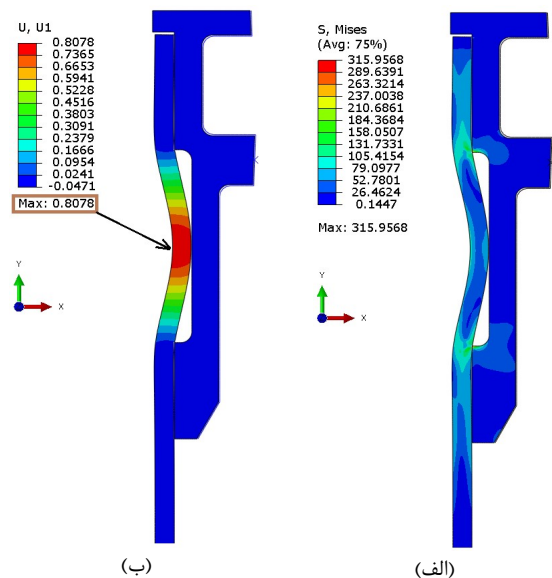
مکانیکی			
$E$ (MPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)	Material
۷۱۰۱۶	۰/۳۳	۵۱۹/۴۸	فلنج: AL 7075-T6
۷۰۳۲۷	۰/۳۳	۵۹/۶۵	لوله: AL 5052-O

که  $\sigma$  و  $\varepsilon$  تنش و کرنش معادل مربوطه به AL7075-T6 و آلومینیوم AL5052-O می باشد. همچنین  $H$  ثابت ماده و  $n$  مولفه ی کار سختی می باشد. با استفاده از روش حداقل مربعات<sup>۱۹</sup> ثابت های  $n$  و  $H$  برای AL7075-T6 بترتیب برابر ۰/۷۴۸ و ۷۵۰/۲۹۴۹ و برای AL5052-O برابر ۰/۲۵۱۱ و ۳۵۲/۱۴۲۹ می باشند. منحنی تنش-کرنش حاصل از تست کشش و همچنین رابطه (۱) در شکل ۸ نشان داده شده است. برای تحلیل المان محدود<sup>۲۰</sup>، بدلیل تقارن محوری بودن مسئله، مدل بصورت متقارن محوری<sup>۲۱</sup> تحلیل شده است که حجم محاسبات عددی را کاهش می دهد. در شکل ۹ نمایی از مشبندی فلنج و لوله به صورت متقارن محوری به همراه بزرگنمایی از حساسیت المان در نواحی حساس در دو قطعه نشان داده شده است. در مش بندی تا جای ممکن از المان با

(ب)  
 شکل ۱۰- الف) مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی، ب) نمای  
 برش خورده از لوله و فلنج بعد از فرایند هیدروفورمینگ



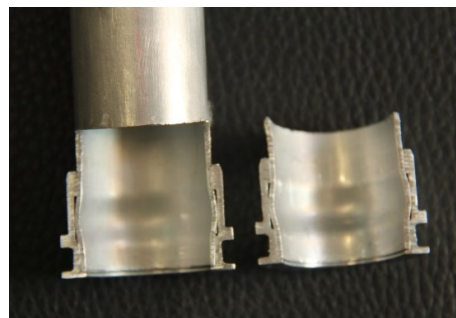
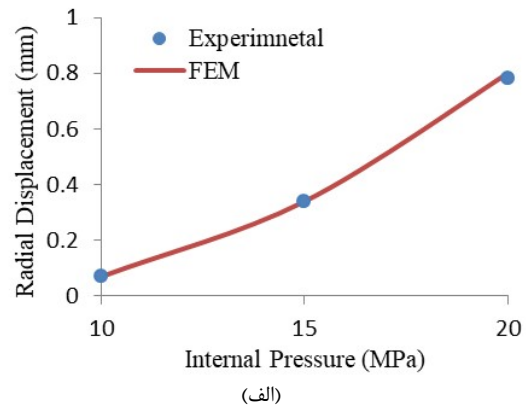
شکل ۱۱- الف) توزیع تنش فون میسز در مدل متقارن محوری، ب)  
 توزیع جابجایی شعاعی لوله، به ازای فشار داخلی ۱۵ MPa



شکل ۹- شمایی از المان بندی کل مدل بصورت متقارن محوری و حساست المان بندی در نواحی اتصال دو قطعه بر اثر بار گذاری (لوله به قطر ۱ اینچ و ضخامت ۰/۰۳۵ اینچ به همراه فلنج)

### بحث و بررسی نتایج

جهت صحت سنجی نتایج عددی، مقایسه‌ای بین نتایج کار حاضر با نتایج تجربی انجام شده است. در این مقایسه مقدار جابجایی شعاعی لوله به قطر ۱ اینچ و ضخامت ۰/۰۳۵ اینچ که به فلنج با فرایند هیدروفورمینگ پرس شده، به ازای مقادیر مختلف فشار داخلی اندازه‌گیری شده است. در منحنی شکل ۱۰ الف) نتایج عددی و تجربی و در شکل ۱۰ ب) نمای برش خورده از کار آزمایشگاهی ساخته شده نشان داده شده است. نتیجه مقایسه ذکر گردد. در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ کانتورهای توزیع تنش و جابجایی شعاعی برای لوله و فلنج به ازای فشار هیدروفورمینگ ۱۵ MPa و ۲۰ MPa نشان داده شده است. کانتورهای نشان داده شده پس از پایان فرآیند هیدروفورمینگ (تخلیه فشار روغن) می‌باشد. همچنین در شکل ۱۳ کانتورهای توزیع تنش و جابجایی شعاعی روی نمای ۱۸۰ درجه‌ای از مدل نشان داده شده است. این شکل‌ها به خوبی نشان می‌دهند که تنش در ناحیه تماس لوله و فلنج به اندازه‌ی کافی بالا بوده تا بتواند آب‌بندی بسیار مطلوبی را بین لوله و فلنج ایجاد نماید.



هیدروفورمینگ را نسبت به روش اکسپندر به صورت زیر برشمرد:

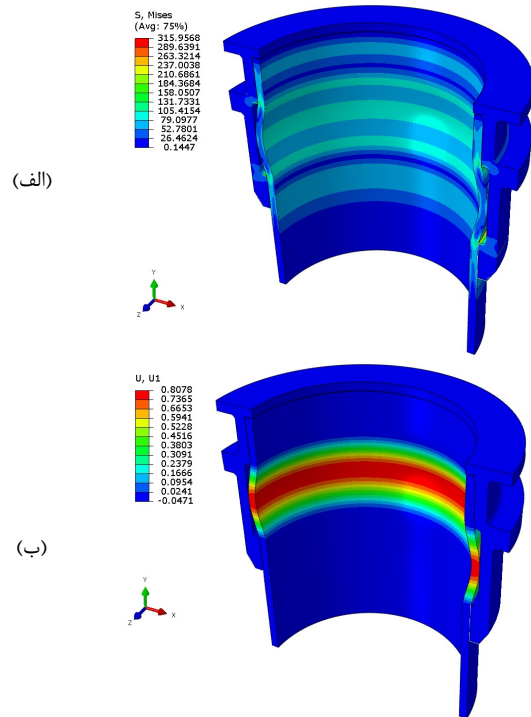
۱. با توجه به این که در روش هیدروفورمینگ نیروی لازم برای فرم دهی لوله داخل شیار به کمک فشار هیدرولیک صورت می گیرد، اتصال لوله به فلنج در کل محیط لوله کاملاً یکنواخت بوده و سبب آببندی با ضریب اطمینان بالا خواهد شد.
۲. در لوله های با ضخامت زیاد امکان پرس با روش هیدروفورمینگ به راحتی وجود دارد چرا که در روش اکسپندر هم به نیروی زیاد نیاز است هم با توجه به یکنواخت نبودن نیروی داخلی، پرس در کلیه نقاط یکنواخت صورت نمی گیرد.
۳. این روش نیاز به تolerانس های هندسی بسیار دقیقی برای پرس با قابلیت اطمینان بالا ندارد.
۴. در روش هیدروفورمینگ امکان به کارگیری فشار هیدرولیک به کمک پمپ دستی و پمپ برقی وجود دارد.
۵. در روش هیدروفورمینگ هیچ گونه خراش یا سائیدگی روی لوله به وجود نمی آید.
۶. امکان اصلاح اتصال در صورتی که پس از تست فشار نشستی مشاهده شود، وجود دارد.

#### پی نوشت ها

- ۱ forming limit curves (FLCs)
- ۲ forming limit diagram (FLD)
- ۳ LS-DYNA
- ۴ ABAQUS
- ۵ DEFORM
- ۶ RADIOSS
- ۷ Yang
- ۸ polyurethane elastomer (PUE)
- ۹ Alves
- ۱۰ Tubesheet
- ۱۱ Sun
- ۱۲ Swaging
- ۱۳ Threaded Flexible Couplings
- ۱۴ TIG (GTAW – Gas Tungsten Arc Welding)
- ۱۵ Installing Gamah tube flanges on fuel line probe
- ۱۶ Cap
- ۱۷ Ramberg-Osgood
- ۱۸ Least-squares method
- ۱۹ Finite Element
- ۲۰ Axisymmetric
- ۲۱ Structural Mesh
- ۲۲ A 4-node bilinear axisymmetric quadrilateral, reduced integration, hourglass control

#### منابع و مراجع

شکل ۱۲- الف) توزیع تنش فون میسز در مدل متقارن محوری، ب) توزیع جابجایی شعاعی لوله، به ازای فشار داخلی ۲۰ MPa



شکل ۱۳- نمای ۱۸۰ درجه ای از مدل متقارن محوری، الف) توزیع تنش فون میسز، ب) جابجایی شعاعی به ازای فشار داخلی ۲۰ MPa

#### نتیجه گیری

از آنجایی که پرس فلنج بر روی لوله های سوخت باید بصورت آببند کامل انجام شود در این مطالعه با استفاده از فرایند هیدروفورمینگ به این هدف رسیده شده است. تنش ارائه شده در قسمت نتایج شبیه سازی به خوبی نشان دهنده این بوده که مقدار تنش پسماند باقی مانده بین لوله و فلنج برای حفظ آببندی کافی است. قبل از انجام فرایند بصورت آزمایشگاهی نیاز به تحلیل عددی بوده تا از توزیع تنش و جابجایی در قطعات یک برآورد اولیه بدست آورده شود. نرم افزار اجزاء محدود آباکوس برای تحلیل عددی این فرایند مورد استفاده قرار گرفته شده است و لوله با سایز قطر و ضخامت های مختلف مورد آنالیز قرار گرفته شده و با این کار مقدار فشار سیال داخلی مورد نیاز برای انجام فرایند بصورت آزمایشگاهی بدست آورده شده است. به طور خلاصه می توان مزایای روش

(2013). Numerical and Experimental Study of Tube Hydroforming for Aerospace Applications. *Key Eng. Mater.*, 554-557, 1779-1786.

[11] Saboori, M., Champliand, H., Gholipour, J., Gakwaya, A., Savoie, J., & Wanjara, P. (2012). Study of True Stress-Strain Curve after Necking for Application in Ductile Fracture Criteria in Tube Hydroforming of Aerospace Material. *Key Eng. Mater.*, 504-506, 95-100.

[12] Yuan, S. J., Lang, L., Wang, X., & Wang, Z. R. (2001). Experiment and numerical simulation of aluminum tube hydroforming. In *2nd International Conference on Hydroforming* (pp. 339-350). Stuttgart, Germany.

[13] Afshar, A., Hashemi, R., Madoliat, R., Rahmatabadi, D., & Hadiyan, B. (2017). Numerical and experimental study of bursting prediction in tube hydroforming of Al 7020-T6. *Mech. Ind.*, 18(4), 1-7.

[14] Cisarova, M., Horak, M., & Peterkova, E. (2016). Design of experimental tool for tube hydroforming. *MM Sci. J.*, 06, 1541-1544.

[15] Elie-dit-cosaque, X., Chebbah, M. S., Naceur, H., & Gakwaya, A. (2012). Analysis and design of hydroformed thin-walled tubes using enhanced one-step method. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 59, 507-520.

[16] Sreenivasulu, B., Prasanthi, G., & Kumar, T. N. (2013). Simulative analysis of tube hydroforming process. *Int. J. Res. Eng. Technol.*, 2(11), 756-763.

[17] Sreenivasulu, B., & Prasanthi, G. (2014). FEA Simulation analysis of tube hydroforming process using DEFORM-3D. *12th Glob. Congr. Manuf. Manag.*, 97, 1187-1197.

[18] Hosford, W., & Caddell, R. (2007). *Metal forming: mechanics and metallurgy* (3rd ed.). Cambridge University Press, New York.

[1] Zhang, S. H. (1999). Developments in hydroforming. *J. Mater. Process. Technol.*, 91(1-3), 236-244.

[2] Jeswiet, J., et al. (2008). Metal forming progress since 2000. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 1(1), 2-17.

[3] Yuan, S. (2023). *Modern Hydroforming Technology* (1st ed.). Springer Singapore.

[4] Schmoeckel, D., Hielscher, C., Huber, R., & Geiger, M. (1999). Metal forming of tubes and sheets with liquid and other flexible media. *CIRP Ann.*, 48(2), 497-513.

[5] Wang, Z., Liu, G., Yuan, S., Teng, B., & He, Z. (2005). Progress in Shell hydroforming. *J. Mater. Process. Technol.*, 167(2-3), 230-236.

[6] Koç, M. (2008). *Hydroforming for advanced manufacturing* (1st ed.). Woodhead Publishing Limited, Cambridge England.

[7] Bell, C., Corney, J. R., Savings, D., & Storr, J. (2015). Assessing the potential benefits of manufacturing gas turbine components by utilizing hydroforming technology. In *13th International Cold Forming Congress* (pp. 1-7). Glasgow, Scotland.

[8] Hashemi, R., Faraji, G., Abrinia, K., & Dizaji, A. F. (2010). Application of the hydroforming strain- and stress-limit diagrams to predict necking in metal bellows forming process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 46, 551-561.

[9] Elyasi, M., Khanlari, H., & Bakhshi-Jooybari, M. (2011). Numerical and experimental study of the effect pressure path in tube hydroforming process. *Key Eng. Mater.*, 473, 579-586.

[10] Farimani, S. M., Champliand, H., Gholipour, J., Savoie, J., & Wanjara, P.

- based on tube deformation measurement. *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, 209, 105187.
- [28] Gamah Couplings. (2024). TF100-72F.
- [29] Technical manual structural repair, T.O. 1F-5E-3. (n.d.). Retrieved from [URL not provided] [Accessed: 27 May 2026]
- [30] ASTM Committee. (2016). \*ASTM E8/E8M-16a: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials\*. ASTM International. doi: 10.1520/E0008\_E0008M-16A
- [31] Ramberg, W., & Osgood, W. R. (1943). Description of stress-strain curves by three parameters.
- [32] Dassault Systèmes. (2012). Abaqus/CAE User's Manual. Retrieved from [URL not provided] [Accessed: 27 May 2026]
- [33] ASM International. (1992). *Friction, Lubrication, and Wear Technology* (Vol. 18).
- [19] Fu, L., Dong, X., & Wang, P. (2009). Study on one-step simulation for the bending process of extruded profiles. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 43(11-12), 1069-1080.
- [20] Nguyen, B., Johnson, K., & Khaleel, M. (2003). Analysis of tube hydroforming by means of an inverse approach. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 125, 369-377.
- [21] Yuan, S. (2021). Fundamentals and Processes of Fluid Pressure Forming Technology for Complex Thin-Walled Components. *Engineering*, 7, 358-366.
- [22] Zhang, Z., Yang, J., Huang, W., Ma, J., & Li, H. (2021). Uncertainty analysis and robust design optimization for the heat-assisted bending of high-strength titanium tube. *Sci. China Technol. Sci.*, 64(10), 2174-2185.
- [23] Yang, J., Li, H., Huang, D., & Li, G. (2020). Deformation-based joining for high-strength Ti-3Al-2.5V tubular fittings based on internal roller swaging. *Int. J. Mech. Sci.*, 171, 105367.
- [24] Yang, J., et al. (2021). Relationship among joined tubular material properties, joining behavior and performance by elastomeric swaging. *Thin-Walled Struct.*, 162, 107561.
- [25] Yang, J., Li, H., Huang, D., Li, G., & Yuan, S. (2020). Forming of thin-walled AA6061-T4 tubular joint by elastomeric bulging: experiment and computation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 107, 25-38.
- [26] Alves, L. M., Afonso, R. M., & Martins, P. A. F. (2021). A new deformation assisted tube-to-tubesheet joining process. *Thin-Walled Struct.*, 163, 107784.
- [27] Sun, A., Shan, M., Zhai, J., Li, P., Zhu, B., & Lin, H. (2024). Connection strength analysis and prediction of external swaging