

مقایسه‌ی فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های تک لایه، دولایه و سه لایه با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود

غلامحسن پایگانه^۱، جواد شهبازی کرمی^۲، کرامت ملک زاده فرد^۳

چکیده

در این مقاله برای اولین بار فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های یک، دو و سه لایه توسط روش اجزای محدود و در نرم افزار ABAQUS/Explicit 6.10 شبیه‌سازی و بین فرایندها مقایسه انجام شده است. در هر سه مدل، ابعاد هندسی، مواد و پارامترهای ورودی فرآیند یکسان نگه داشته شد تا بتوان پارامترهای خروجی (ارتفاع انشعاب و کاهش ضخامت) را مورد مقایسه قرار داد. برای صحه‌گذاری نشان داده شد که نتایج مدل‌سازی اجزای محدود و نتایج آزمایشات تجربی دارای هم‌خوانی مناسبی هستند. در مقایسه بین فرایندها، مشخص شد که در حالت‌های دو و سه لایه نسبت به حالت تک لایه ارتفاع انشعاب کم‌تر، درصد کاهش ضخامت، بیش‌تر و عیب چروک خوردگی و کمانش بحرانی‌تر می‌گردد.

کلمات کلیدی: هیدروفرمینگ لوله، شبیه‌سازی اجزای محدود، مقایسه فرآیند هیدروفرمینگ، لوله‌های سه لایه‌ی ساندریچ

۱- مقدمه

(۱) به صورت شماتیک مراحل مختلف این فرآیند را نشان

می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود، پس از قرارگرفتن لوله‌ی خام اولیه درون قالب و بسته‌شدن آن، سنبه‌های هیدرولیکی اعمال نیروی محوری، پیش‌راننده شده و عمل آب‌بندی لوله را انجام می‌دهند. سپس فشار سیال داخلی اعمال شده و سنبه‌های محوری در صورت نیاز تغذیه‌ی محوری لوله را در جهت راندن مواد به درون قالب آغاز می‌کنند که این کار به جهت جلوگیری از نازک‌شدگی احتمالی قطعه در محل انبساط آن می‌باشد.

هیدروفرمینگ لوله یکی از روش‌های جدید و پیشرفته شکل‌دهی است که به صورت گسترده برای تولید قطعات توخالی با هندسه‌ی خاص به کار می‌رود. به جهت اهمیت این فرآیند به‌خصوص در صنایع خودروسازی، نفت و گاز، هوافضا و هسته‌ای به سرعت رو به گسترش است. در این روش با اعمال فشار داخلی هیدرولیک و نیروی محوری، لوله‌ی خام اولیه تغییرشکل داده و به شکل سطح داخلی قالب درمی‌آید. شکل

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

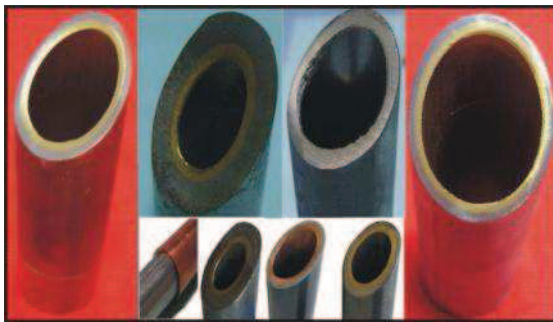
۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی Shahbazi.mech@gmail.com

۳- دانشیار، گروه مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

خارجی یک لایه‌ی مقاوم به تنش ارزان قیمت (نظیر فولاد کربنی، فولاد ضدزنگ) در نظر گرفته می‌شود.

در شرایط فشار بالا و خوردگی، لوله‌های چندلایه مزایای اقتصادی زیادی نسبت به لوله‌های تک‌لایه دارند [۳]. لوله‌های دو و سه‌لایه خواص مفید مقاومت در برابر نیروهای مکانیکی، مقاومت در برابر خوردگی و انتقال حرارت برای ما ایجاد می‌کنند که لوله‌های تک‌لایه قادر به تأمین آن نمی‌باشند.

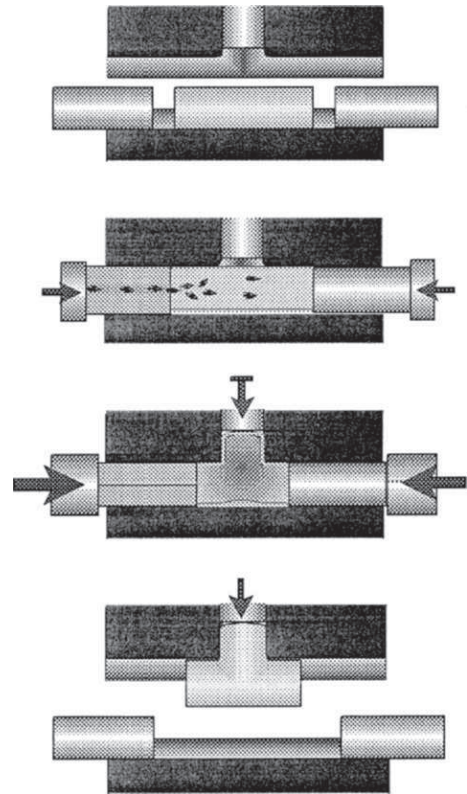
کاربرد این لوله‌ها در صنایع کشتی‌سازی، کارخانه‌های تولید مواد شیمیایی و هسته‌ای، سیستم‌های حرارتی و برودتی، خطوط انتقال زیر دریا، سیستم‌های با خوردگی بالا (کندانسور، اواپراتور، خطوط انتقال آمونیاک و اسیدهای خورنده)، مبدل‌های حرارتی نیروگاه‌ها، صنایع غذایی و سردخانه‌ها مشاهده شده است [۳].



شکل (۲): انواع لوله‌های دولایه [۳]

ایده‌ی لوله‌های سه‌لایه برای اولین بار توسط نویسندگان این مقاله ارائه می‌گردد. بدیهی است در صورت موفقیت می‌توان در بسیاری از لوله‌های حرارتی که نباید نشت حرارت رخ دهد و از طرفی نیاز است که لایه‌ی خارجی فلزی باشد، می‌توان از این روش استفاده نموده و لایه‌ی وسط نقش عایق حرارتی را ایفاء نماید. در این مقاله هیدروفرمینگ لوله‌های تک، دو و سه‌لایه توسط روش اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit 6.10 شبیه‌سازی و مقایسه گردیده است. برای صحت‌گذاری بر روی شبیه‌سازی انجام‌شده، نتایج حل عددی این مقاله با نتایج آزمایشات تجربی سایر محققان در زمینه‌ی هیدروفرمینگ لوله‌های تک و دولایه مقایسه و نشان داده شد که نتایج دارای هم‌خوانی مناسب و درصد خطای قابل قبول می‌باشند.

برای رسیدن به هدف موردنظر که مقایسه بین سه نوع فرآیند هیدروفرمینگ می‌باشد، سه مدل شبیه‌سازی ساخته شد که



شکل (۱): شماتیک مراحل فرآیند هیدروفرمینگ لوله [۱]

در مقایسه با روش‌های سنتی شکل‌دهی، هیدروفرمینگ دارای مزیت‌هایی نظیر کاهش تعداد قطعات توسط تولید قطعات یکپارچه، افزایش نسبت استحکام به وزن به علت کاهش وزن قطعات تولیدی، بهبود خواص مکانیکی به علت کارسختی یکنواخت قطعات، امکان ساخت قطعات با هندسه‌ی پیچیده و کاهش تعداد فرآیندهای تولیدی به علت کیفیت سطح خوب محصولات می‌باشد. از جمله قطعات تولید شده به این روش می‌توان به قطعات تولید شده در صنایع خودروسازی (قطعات آگروز، فریم بدنه و شاسی، میل بادامک و اکسل عقب)، صنایع نفت و گاز (اتصالات T، Y و X شکل)، صنایع نظامی (انواع فشنگ، خمپاره و قطعات داخلی اسلحه) و تولید لوازم خانگی و شیرآلات بهداشتی اشاره نمود [۲].

در کاربردهای خاص و محیط‌های کاری پیچیده که لوله‌های تک‌لایه عملکرد مناسبی از خود نشان نمی‌دهند، می‌توان از لوله‌های دو و یا سه‌لایه استفاده نمود.

یک کاربرد خاص لوله‌های دولایه در انتقال سیالات خورنده می‌باشد که نیاز به لوله‌ها و اتصالات از جنس آلیاژهای مقاوم به خوردگی می‌باشد. در این حالت برای لوله‌ی داخلی یک لایه‌ی مقاوم به خوردگی (نظیر CRA، مس یا تیتانیوم) و لوله‌ی

اجزای محدود انجام شده است. مدل هندسی، ابعاد و جنس لوله‌ها در فرایندهای هیدروفرمینگ یک، دو و سه لایه ثابت نگه داشته شده است تا مقایسه بین آن‌ها صحیح باشد.

۱-۲- هیدروفرمینگ لوله‌ی تک‌لایه

هیدروفرمینگ یک لوله از جنس مس بازیخت شده استاندارد (به طول ۱۲۰ میلی‌متر، قطرهای خارجی، داخلی و ضخامت به ترتیب ۲۴ و ۲۱/۴ و ۱/۳ میلی‌متر) که مشخصات فلز مس استفاده شده در جدول ۱ و رابطه‌ی (۱) داده شده است، طبق شکل ۳ شبیه‌سازی شده است.

جدول (۱): خواص مکانیکی مس استفاده شده [۷]

مقدار	خواص مکانیکی
۸/۹۰	چگالی ρ (g/cm^3)
۱۱۹/۸۶	مدول الاستیسیته E (GPa)
۱۱۶	تنش تسلیم σ_y (MPa)
۰/۳۱	ضریب پواسون ν
۰/۴۲۵۷	ضریب استحکام k
۰/۲۵۶۲	توان کرنش سختی n

$$\bar{\sigma} = k\bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

توجه شود که شعاع گوشه‌ی قالب ۳ میلی‌متر و جنس لوله‌ها همگن فرض شده است.

برای سرعت بیش‌تر تحلیل و با استفاده از مزایای تقارن، نصف کل هندسه مدل شده و شرایط مرزی مناسب برای گره‌هایی که در صفحه‌ی تقارن می‌باشند، در نظر گرفته شده است.

قالب صلب به صورت کامل مقید شده و تمام درجات آزادی آن سلب شده است. سنبه‌های محوری نیز مقید شده و فقط درجه آزادی حرکت در راستای محور Z آن باقی مانده است که به جهت تغذیه‌ی محوری لوله‌ها می‌باشد.

مدل هندسی شامل یک قالب صلب، لوله و دو سنبه‌ی محوری برای آب‌بندی و اعمال نیروی محوری می‌باشد.

برای لوله‌ها از المان پوسته‌ای S4R استفاده شده است. با استفاده از مدل پوسته‌ای زمان تحلیل به شدت کاهش می‌یابد که مزیت اصلی این مدل می‌باشد.

پارامترهای ورودی نظیر هندسه، جنس لوله‌ها و ابعاد قالب یکسان در نظر گرفته شد تا بتوان مقایسه صحیحی بر روی نتایج خروجی این سه فرآیند انجام داد.

در این فرآیند ممکن است عیوبی نظیر ترکیدگی، چروکیدگی و کمانش در قطعات تولیدی ایجاد گردد. اگر فشار داخلی زیاد بوده و تغذیه‌ی محوری کم باشد، ضخامت جداره‌ی لوله کم شده و احتمال ترکیدگی لوله افزایش می‌یابد. همچنین تغذیه‌ی محوری نامناسب موجب به وجود آمدن عیوبی نظیر چروکیدگی و کمانش لوله می‌گردد. به طور کلی برای تولید قطعات بی‌عیب باید مسیر بارگذاری (فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری) به صورت بهینه انتخاب گردد [۴]. هر سه مدل ساخته شده تحت مسیرهای بارگذاری متفاوت قرار گرفته و نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

وانگ و همکارانش [۵] مقاله‌ای در مورد هیدروفرمینگ لوله‌های دوفلزی منتشر کردند. آن‌ها در این مقاله روش اتصال مکانیکی بین دو لایه لوله، با لایه‌ی داخلی از جنس آلیاژ مقاوم به خوردگی و لایه‌ی خارجی از جنس فولاد ارزان قیمت توسط روش هیدروفرمینگ را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند.

اسلام و همکارانش [۴] اولین مقاله را در زمینه‌ی شکل‌دهی هیدرولیک لوله‌های دولایه برای تولید قطعات T و X شکل ارائه نمودند.

الاسود و همکارانش [۶] هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه را به صورت تجربی و اجزای محدود در نرم‌افزار LS-DYNA و ANSYS بررسی نمودند. آن‌ها هیدروفرمینگ لوله‌ای دولایه از جنس لایه‌ی داخلی مس و لایه خارجی برنج آنیل شده را شبیه‌سازی کرده و آزمایشات گوناگون برای رسیدن به فاکتورهای بهینه برای تولید مقطع X شکل، انجام دادند. همچنین همین محققان در مقاله‌ای دیگر، هیدروفرمینگ لوله‌های تک‌لایه و دولایه را مورد مقایسه قرار دادند [۷].

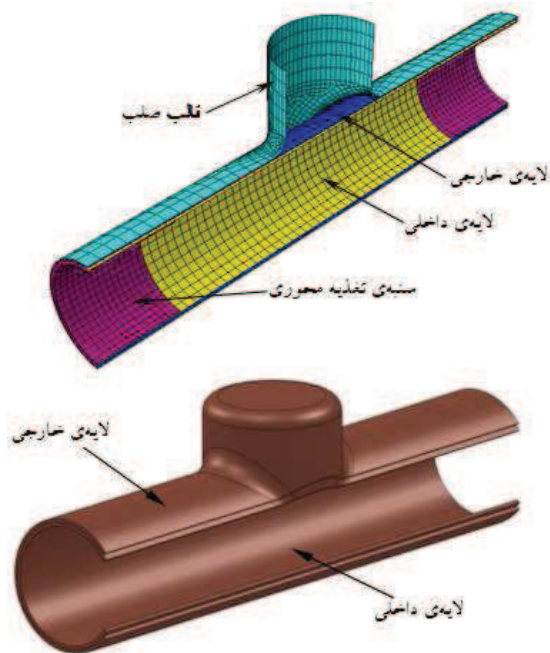
۲- مدل‌سازی فرآیند

از آنجایی که تعیین مسیر بارگذاری از طریق تجربی نیازمند آزمون و خطا بوده و هزینه‌ی زیادی به دنبال دارد، شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند دارای اهمیت زیادی می‌باشد. شبیه‌سازی به منظور درک رفتار تغییرشکل لوله‌ها در طی فرآیند در نرم‌افزار

تماس بین لوله‌ها و تماس لوله‌ی داخلی با سنبه‌ها از روش پنالتی استفاده شده است. ضریب اصطکاک قالب و سنبه‌ها با لوله برابر ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است [۴].

۲-۲- هیدروفرمینگ لوله‌ی دولایه

در این حالت تمامی پارامترهای هندسی و مواد استفاده شده مشابه لوله تک‌لایه می‌باشد، با این تفاوت که به جای یک لوله به ضخامت ۱/۳ میلی‌متر، از دو لوله که ضخامت هر کدام ۰/۶۵ میلی‌متر است، استفاده شده است (شکل ۵).

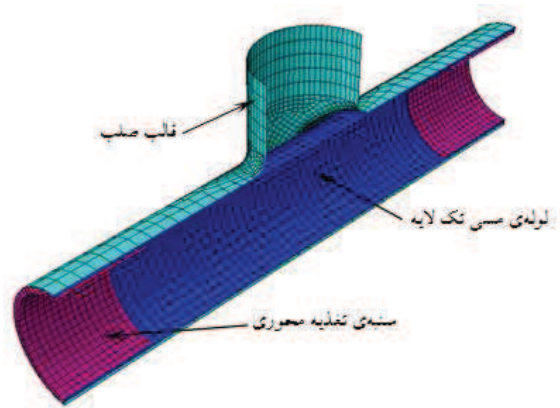


شکل (۵): مدل هندسی دولایه

تماس لوله‌ها با هم و با قالب به روش پنالتی مدل شده است. ضریب اصطکاک بین لوله‌ی خارجی با قالب برابر ۰/۱۵ و ضریب اصطکاک لوله‌ها با هم ۰/۵۷۷ در نظر گرفته شده است [۴].

۲-۳- هیدروفرمینگ لوله‌ی سه‌لایه

ایده‌ی استفاده از لوله‌های سه‌لایه برای اولین بار توسط نویسندگان این مقاله ارائه شده است. این ایده می‌تواند کاربردهای جدیدی در صنایع پیشرفته نظیر هوافضا، نیروگاه‌ها و انرژی هسته‌ای داشته باشد. به عنوان مثال اگر به عنوان لایه‌ی میانی از جنس فورم فلزی استفاده شود می‌توان به خواص



شکل (۳): مدل هندسی تک‌لایه

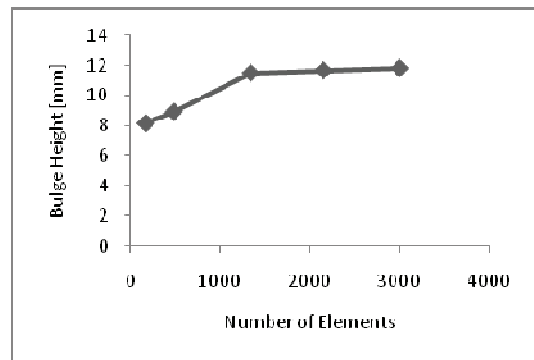
در لوله‌ها اگر نسبت زیر ارضا شود می‌توان از مدل پوسته‌ای استفاده نمود [۸]:

$$\frac{R}{t} \geq 10$$

R: شعاع لوله

t: ضخامت لوله

تعداد المان‌های مناسب در نظر گرفته شده برای لوله ۱۳۵۰ المان می‌باشد که همگرایی آن در شکل ۴ نشان داده شده است.



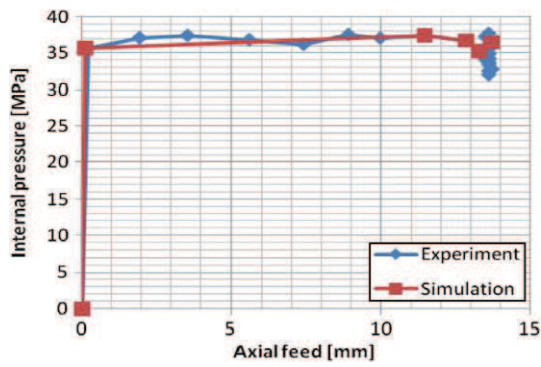
شکل (۴): تاثیر تعداد المان‌ها بر ارتفاع بالج

چون قالب و سنبه‌های محوری صلب فرض شده‌اند، فقط سطح خارجی آن‌ها مدل شده و از المان صلب R3D4 استفاده گردیده است. برای مدل‌سازی رفتار تماس قالب و لوله‌ی خارجی،

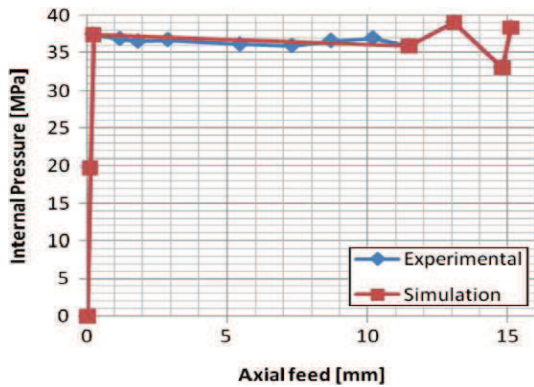
۳- ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی

برای صحت‌گذاری بر روی تحقیقات و شبیه‌سازی اجزای محدود انجام شده در این مقاله، به علت اینکه تا به حال تحقیقی بر روی هیدروفورمینگ لوله‌های سه‌لایه انجام نشده است، شبیه‌سازی انجام شده با نتایج آزمایشات تجربی سایر محققان در زمینه هیدروفورمینگ لوله‌های تک و دولایه مقایسه شده است. نشان داده شد که نتایج مدل‌سازی اجزای محدود و نتایج آزمایشات تجربی دارای همخوانی مناسبی هستند.

مسیر بارگذاری (فشار داخلی و تغذیه محوری) استفاده شده طبق شکل ۷ و ۸ می‌باشد [۷].



شکل (۷): مسیر بارگذاری استفاده شده تک‌لایه [۷]

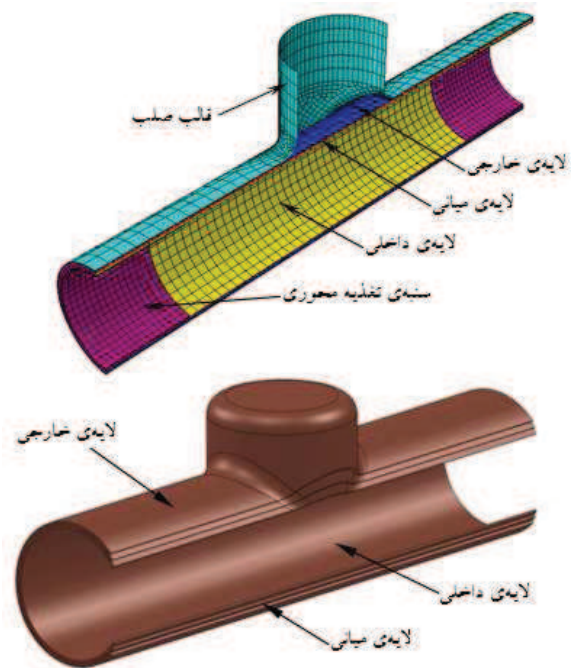


شکل (۸): مسیر بارگذاری استفاده شده دولایه [۷]

برای تصدیق با نتایج تجربی، پارامتر اصلی فرآیند یعنی مقدار ارتفاع بالج در نظر گرفته شده است. طبق شکل‌های ۹ تا ۱۲، میزان ارتفاع بالج طبق جدول ۲ می‌باشد.

مکانیکی و حرارتی خوبی با ساندویچی کردن لوله‌ها دست یافت.

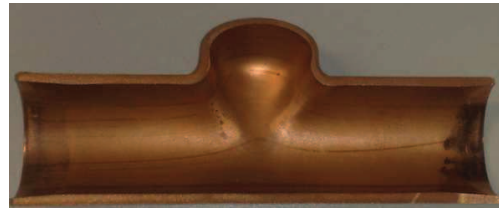
در مدل سه‌لایه ساخته شده در این مقاله، تمامی پارامترهای هندسی و مواد مورد استفاده مشابه لوله‌های تک و دولایه می‌باشد. ضخامت لایه‌های خارجی، میانی و داخلی به ترتیب برابر ۰/۴۵، ۰/۴۵ و ۰/۴۰ میلی‌متر که مجموعاً برابر ۱/۳ میلی‌متر می‌گردد، در نظر گرفته شده است. در این حالت نیز ضریب اصطکاک بین سه‌لایه لوله به روش پنالتی و برابر ۰/۵۷۷ مدل شده است (شکل ۶).



شکل (۶): مدل هندسی سه‌لایه

فشار داخلی و تغذیه محوری مهم‌ترین پارامترهای ورودی برای رسیدن به قطعه نهایی مطلوب می‌باشد. به صورت معمول برای تولید قطعات T و X شکل، در نیمه‌ی ابتدایی فرآیند فشار افزایش شدیدی یافته و در نیمه‌ی دوم فرآیند فشار افزایش کم‌تر و تغذیه محوری افزایش شدیدتری دارد. با اعمال تغذیه محوری در طول فرآیند، حجم داخلی قطعه اندکی کم می‌شود و به همین دلیل بارگذاری فشار داخلی در انتهای فرآیند افزایش خیلی کمی داشته و یا ثابت در نظر گرفته می‌شود تا منجر به ترکیدگی لوله‌ها نگردد.

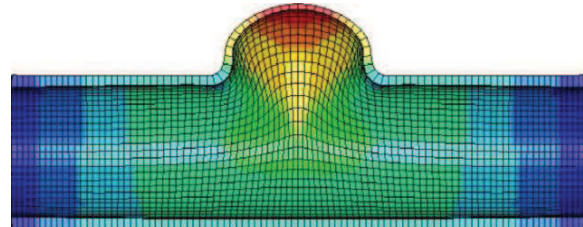
همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، شبیه‌سازی انجام شده در این تحقیق دارای هم‌خوانی مناسب و میزان خطای قابل قبول (حداکثر ۱٪ با تجربی و ۴٪ با شبیه‌سازی مرجع) می‌باشد.



شکل (۹): آزمایش تجربی هیدروفرمینگ لوله تک‌لایه [۷]

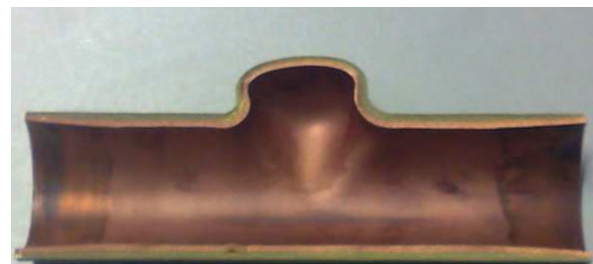
۴- مقایسه بین هیدروفرمینگ تک، دو و سه‌لایه

در این بخش بر پایه‌ی مطالعات و شبیه‌سازی اجزای محدود انجام‌شده، هیدروفرمینگ لوله‌ای تک، دو و سه‌لایه با هم مقایسه می‌گردند.



شکل (۱۰): شبیه‌سازی عددی هیدروفرمینگ لوله تک‌لایه [۷]

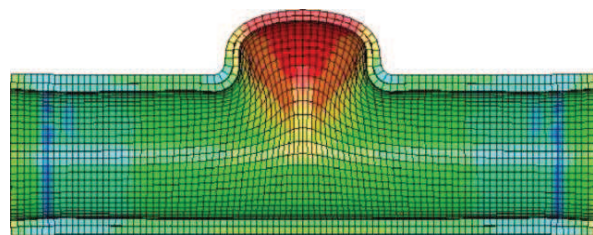
در این سه حالت تمامی پارامترهای ورودی هندسی و مواد لایه‌ها، یکسان در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که ذکر شد، مهم‌ترین پارامتر در تعیین کیفیت محصول نهایی، مسیر بارگذاری (فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری) می‌باشد.



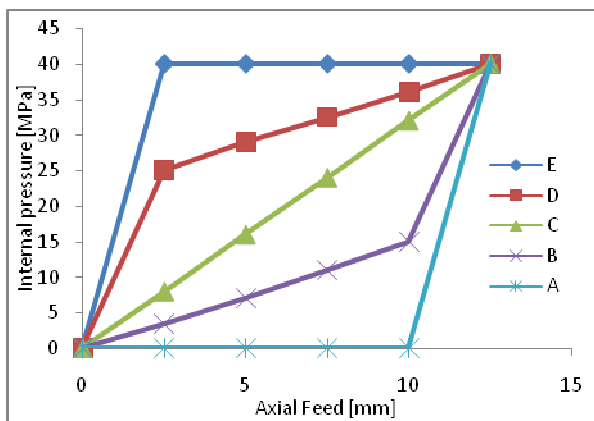
شکل (۱۱): آزمایش تجربی هیدروفرمینگ لوله دولایه [۷]

۴-۱- انواع مسیر بارگذاری

با اعمال مسیرهای بارگذاری متفاوت، شکل‌پذیری قطعات در فرآیند هیدروفرمینگ دارای تغییرات محسوسی می‌باشد. در هیدروفرمینگ قطعات T و X شکل، رسیدن به ارتفاع انشعاب مناسب، توزیع ضخامت خوب بدون چروک‌خوردگی و پارگی نیاز به اعمال یک مسیر بارگذاری مناسب و بهینه دارد. مسیرهای بارگذاری متفاوت در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل (۱۲): شبیه‌سازی عددی هیدروفرمینگ لوله دولایه [۷]



شکل (۱۳): انواع مسیرهای بارگذاری اعمالی

جدول (۲): نتایج ارتفاع انشعاب تجربی و شبیه‌سازی از مرجع [۷]

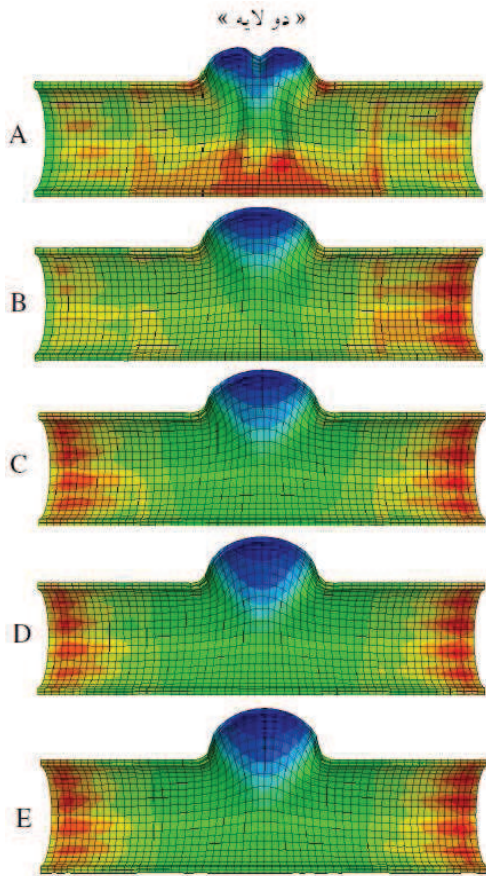
نوع نتایج	تک لایه	دو لایه
ارتفاع انشعاب تجربی (mm)	۱۱/۵۰۵	۹/۶۳۸
ارتفاع انشعاب عددی (mm)	۱۱/۶۱۵	۱۰/۰۵۰

با انجام شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار ABAQUS 6.10 برای لوله‌های تک و دولایه، نتایج طبق جدول ۳ بدست آمده است.

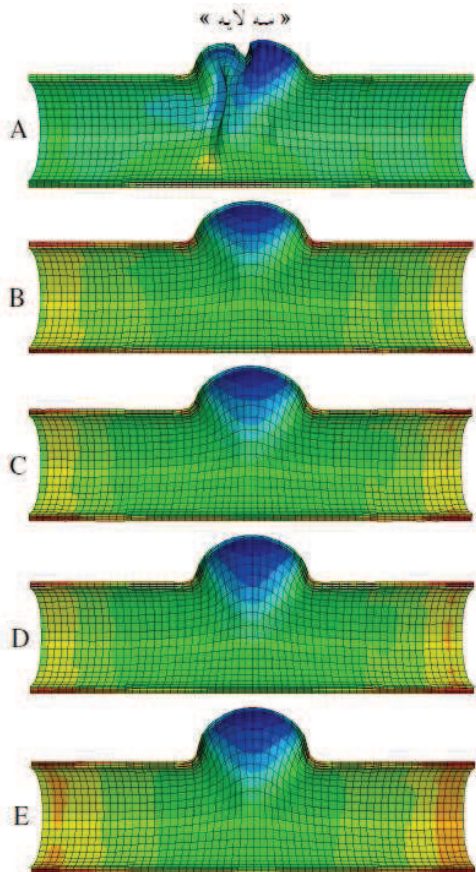
جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود

ارتفاع انشعاب (mm)	تک لایه	دولایه
شبیه‌سازی حاضر	۱۱/۵۱۷	۹/۷۰۴
خطا با تجربی (%)	۰/۱۱	۰/۶۸
خطا با عددی (%)	-۰/۸۵	-۳/۵۶

این مسیرهای بارگذاری شامل سه دسته‌ی کلی می‌باشند. در مسیرهای بارگذاری A و B، افزایش تغذیه‌ی محوری مقدم بر



شکل ۱۵- قطعات دو لایه هیدروفرم شده



شکل ۱۶- قطعات سه لایه هیدروفرم شده

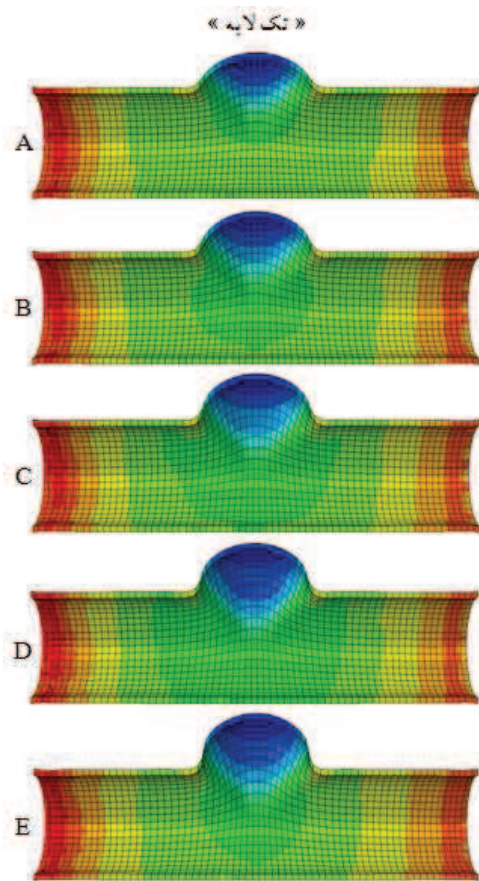
فشار داخلی می باشد، یعنی ابتدا تغذیه ی محوری افزایش یافته و سپس فشار داخلی زیاد می شود.

در مسیر بارگذاری C، فشار داخلی و تغذیه ی محوری دارای تغییرات خطی در طول فرآیند می باشند.

در نهایت در مسیرهای بارگذاری D و E، افزایش فشار داخلی مقدم بر بارگذاری محوری می باشد، یعنی ابتدا فشار داخلی افزایش پیدا کرده و سپس تغذیه ی محوری زیاد می شود [۷].

این پنج مسیر بارگذاری در شبیه سازی اعمال شده و نتایج استخراج شده اند (شکل های ۱۴ تا ۱۶).

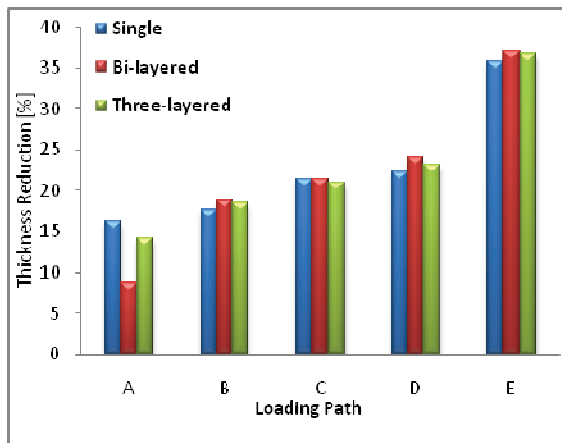
با توجه به شکل های ۱۴ تا ۱۶ مشخص است که در هر سه روش هیدروفرمینگ لوله های تک، دو و سه لایه، در حالتی که فشار داخلی مقدم بر تغذیه ی محوری می باشد (حالت های D و E) قابلیت شکل پذیری بهتر بوده و به ارتفاع انشعاب بلندتری دست خواهیم یافت.



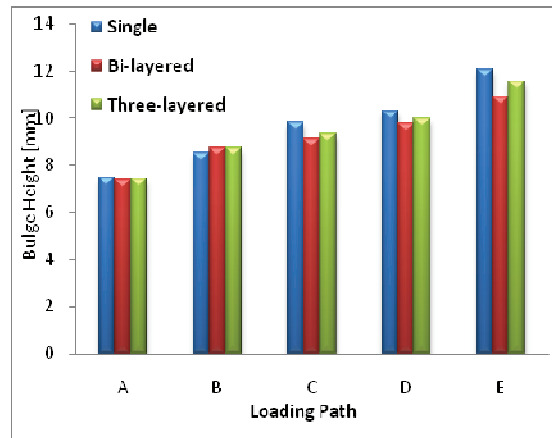
شکل (۱۴): قطعات تک لایه هیدروفرم شده

۲-۴- ارتفاع انشعاب

شکل ۱۷ نمایشگر ارتفاع انشعاب در مسیرهای بارگذاری متفاوت می‌باشد. همانگونه که در شکل های ۱۴ تا ۱۶ نیز مشخص است در مسیر بارگذاری A به علت تغذیه‌ی محوری زیاد و فشار داخلی کم، در قطعه چروک‌خوردگی شدید ایجاد شده است. در مسیر بارگذاری B نیز ارتفاع انشعاب خیلی کم می‌باشد. در مسیر بارگذاری C که فشار و تغذیه‌ی محوری دارای تغییرات خطی می‌باشند، انشعاب به‌صورت صحیح شکل نگرفته و ارتفاع آن نیز کم می‌باشد. در مسیرهای بارگذاری D و E که فشار اولیه زیاد و تغذیه‌ی محوری اولیه کم می‌باشد، انشعاب به درستی شکل گرفته که طبق شکل، مسیر بارگذاری E دارای بیشترین ارتفاع انشعاب بدون چروک‌خوردگی می‌باشد.

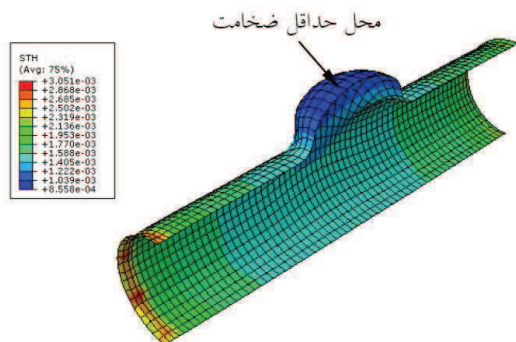


شکل ۱۸- بیشترین درصد کاهش ضخامت در مسیرهای بارگذاری متفاوت



شکل ۱۷- ارتفاع انشعاب در مسیرهای بارگذاری متفاوت

با توجه به نمودار فوق، در مسیرهای بارگذاری D و E که فشار داخلی بالا، مقدم بر تغذیه‌ی محوری می‌باشد، در حالت های دو و سه‌لایه اصطکاک داخلی بین لایه ها بالا رفته و باعث افزایش درصد کاهش ضخامت نسبت به حالت تک‌لایه می‌گردد. محل حداقل ضخامت در شکل ۱۹ نشان داده شده است که کمترین ضخامت مربوط به بالاترین المان انشعاب می‌باشد.



شکل ۱۹- توزیع ضخامت در قسمت‌های مختلف لوله

در مسیرهای بارگذاری D و E که فشار داخلی بالا، مقدم بر تغذیه‌ی محوری می‌باشد، در حالت های دو و سه‌لایه اصطکاک داخلی بین لایه‌ها بالا رفته و باعث کاهش ارتفاع انشعاب می‌گردد. پس در اینگونه مسیرهای بارگذاری، حالت تک‌لایه دارای ارتفاع خیلی بیشتری می‌باشد. در صورتی که در مسیرهای بارگذاری A و B که تغذیه‌ی محوری مقدم بر فشار داخلی می‌باشد، به علت فشار داخلی اولیه کم، اصطکاک بین‌لایه‌ای در حالت‌های دو و سه‌لایه بالا نبوده و حالت تک‌لایه دارای ارتفاع کمتری می‌باشد.

۳-۴- تغییرات ضخامت

شکل ۱۸ نشان‌دهنده کاهش ضخامت لوله‌ها در طی فرآیند هیدروفرمینگ در مسیرهای بارگذاری متفاوت می‌باشد. در

۳-۴- چروک خوردگی

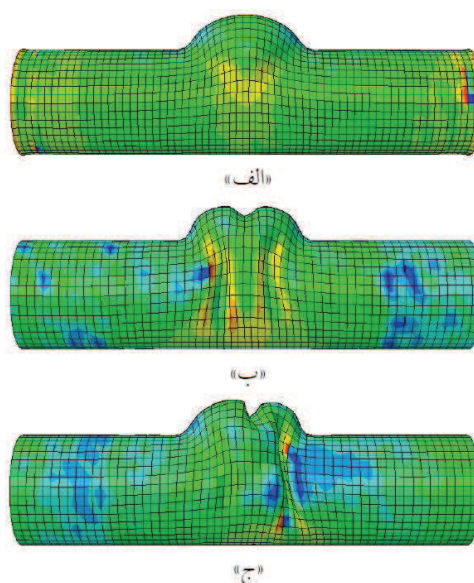
فرآیند، در حالت های دو و سه لایه قادر به جبران چروکها و شکل دادن آنها بر روی سطح قالب نمی باشد.

وقتی مسیرهای بارگذاری B, C, D و E اعمال می شوند هیچگونه چروک خوردگی در سه حالت تک، دو و سه لایه اتفاق نمی افتد. به بیان دیگر، هنگامی که از مسیر بارگذاری مشابه A که در آن فشار داخلی اولیه نسبت به تغذیه ی محوری خیلی کم می باشد، استفاده می نمایم احتمال ایجاد چروک خوردگی در هر سه حالت تک، دو و سه لایه، به شدت افزایش پیدا می کند. نتایج اعمال مسیر بارگذاری A در سه حالت تک، دو و سه لایه در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، شبیه سازی اجزای محدود برای فرآیند هیدروفورمینگ لوله های تک، دو و سه لایه انجام شد. مدل اجزای محدود ساخته شده با نتایج آزمایشات عملی سایر محققان مقایسه شده و نشان داده شد که مدل ساخته شده دارای همخوانی مناسب و درصد خطای قابل قبول با آزمایشات عملی دارد. مسیرهای بارگذاری گوناگون به هر سه مدل تک، دو و سه لایه اعمال گردید و نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفتند.

- مسیرهای بارگذاری D و E که در آنها فشار داخلی اولیه مقدم بر تغذیه محوری بود، باعث بهبود شکل پذیری و افزایش ارتفاع انشعاب در هر سه حالت گردیدند. به هر حال با اعمال این چنین مسیرهای بارگذاری، در حالت تک لایه شاهد ارتفاع انشعاب بیشتری نسبت به حالت های دو و سه لایه خواهیم بود.
- در حالت دو و سه لایه، درصد کاهش ضخامت دارای مقادیر بزرگتری نسبت به حالت تک لایه، خواهد بود. احتمال ایجاد عیوبی نظیر چروک خوردگی و کماتش در هیدروفورمینگ دو و سه لایه، بحرانی تر از حالت تک لایه می باشد.



شکل ۲۰- چروک خوردگی «الف» تک لایه، «ب» دو لایه و «ج» سه لایه

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان علاقمندند از آقای دکتر غلامحسین لیاقت، مهندس رامین درویش، مهندس میثم سروش و مهندس امید مغروری کمال تشکر و امتنان را داشته باشند.

همان طور که در شکل ها نیز مشخص است، هیدروفورمینگ در حالت های دو و سه لایه به عیوبی نظیر چروک خوردگی و کماتش خیلی حساس تر از حالت تک لایه می باشد. این امر به این دلیل می باشد که حداکثر فشار داخلی اعمال شده در انتهای

مراجع

- 1- A. Alaswad, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, Tube hydroforming process: A reference guide, Review Article, Materials & Design, Volume 33, pp. 328-339, 2012.
- 2- Muammer Koc, Hydroforming for advanced manufacturing, woodhead publisher, Cambridge England, 2008
- 3- <http://www.beca-engineering.com/Bimetallic.html>
- 4- M.D. Islam, A.G. Olabi, M.S.J. Hashmi, Feasibility of multi-layered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation, Journal of Materials Processing Technology, Volume 174, Issues 1-3, pp. 394-398, 2006.
- 5- Xuesheng Wang, Peining Li, Ruzhu Wang, Study on hydro-forming technology of manufacturing bimetallic CRA-lined pipe, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 45, Issues 4-5, pp. 373-377, 2005.
- 6- A. Alaswad, A.G. Olabi, K.Y. Benyounis, Integration of finite element analysis and design of experiments to analyse the geometrical factors in bi-layered tube hydroforming, Materials & Design, Volume 32, Issue 2, pp. 838-850, 2011.

- 7- Abed Alaswad, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, Finite element comparison of single and bi-layered tube hydroforming processes, Simulation Modeling Practice and Theory, Volume 19, Issue 7, pp. 1584-1593, 2011.
- 8- Joseph E. Shigley, 2004, Standard handbook of machine design, Third Edition, McGRAW-Hill.