

## بررسی عددی توزیع ضخامت در فرآیند هیدروفرمینگ گرم لوله‌های آلومینیومی

حسن مسلمی نائینی<sup>۱</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>۲</sup>، سیدجلال هاشمی قیری<sup>۳</sup>، سیدمحمد حسین سیدکاشی<sup>۳</sup>، فرزاد رحمنی<sup>۴</sup>

### چکیده

صنعت خودرو، با توجه به لزوم داشتن ساختاری سبک و ضد خوردگی، نیازمند استفاده از روشهای پیشرفته تولید می‌باشد. به این علت فرآیند هیدروفرمینگ آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم مورد توجه قرار گرفته است. عیب اصلی این آلیاژها شکل پذیری پایین آنها می‌باشد که با بالا بردن دمای فرآیند می‌توان شکل پذیری را افزایش داد. در این مقاله، هیدروفرمینگ لوله‌های آلومینیومی (AA3003) در دماهای مختلف مورد بررسی عددی قرار گرفته است. شبیه‌سازی بوسیله نرم‌افزار اجزای محدود MSC.Marc انجام شده و توزیع ضخامت در ناحیه شکل‌دهی لوله تحت دماهای متفاوت فرآیند مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج در حالت‌های ثابت بودن دو انتهای لوله، آزاد بودن دو انتها و اعمال تغذیه محوری مقایسه شده است.

**کلمات کلیدی:** هیدروفرمینگ گرم لوله، روش اجزای محدود، توزیع ضخامت.

### ۱- مقدمه

شکل پذیری پایین آنها در دمای اتاق و هزینه بالای این مواد

می‌باشد [۱].

به منظور رفع عیب شکل‌پذیری، شکل‌دهی در دماهای بالا بکار می‌رود و منجر به شکل‌پذیری بهتر این آلیاژها می‌شود. شکل‌دهی راحت قطعاً پیچیده، انرژی کمتر مورد نیاز برای شکل‌دهی به دلیل پایین آمدن استحکام ماده در دماهای بالا و در نتیجه کوچکتر شدن تجهیزات از مزیت‌های دیگر هیدروفرمینگ گرم می‌باشد [۲].

امروزه حداکثر دمای هیدروفرمینگ گرم آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم (ورق و لوله) حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد است. استفاده از دماهای بالاتر به علت نبود سیال مناسب امکان‌پذیر نیست [۳].

هیدروفرمینگ لوله فرآیندی است که به خاطر کاربرد گسترده در صنعت خودرو گسترش یافته است. بوسیله این فرآیند می‌توان قطعات پیچیده را با شکل دادن لوله‌های با درز جوش و یا اکستروژن شده تولید کرد. در این فرآیند به وسیله اعمال فشار داخلی و تغذیه محوری از دو انتهای لوله اولیه توسط سنبه‌ها، شکل حفره قالب در لوله ایجاد می‌شود (شکل ۱). آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم استحکام بالا، با نسبت مقاومت به وزن خوب و مقاومت به خوردگی، جایگزین خوبی برای فولاد در قطعات خودرو به شمار می‌روند. عیب اصلی این آلیاژها چقرمگی کم و

۱- استاد، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس: Moslemi@modares.ac.ir

۲- استاد، گروه طراحی کاربردی، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

۴- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

نازک‌شدگی و چروکیدگی از عیوب مهم فرآیند هیدروفرمینگ لوله محسوب می‌شوند. در این مقاله شبیه‌سازی کوپل ترمومکانیکال با هدف تعیین تاثیر دمای فرآیند بر روی توزیع ضخامت محصول نهایی و هم چنین تعیین تاثیر حالت تغذیه محوری بر روی توزیع ضخامت انجام شده است.

## ۲- آزمایش کشش در دماهای بالا

ترکیب شیمیایی لوله آلومینیومی AA3003 به کار رفته در شبیه‌سازی در جدول (۱) آمده است. نمونه‌های آزمایش کشش در امتداد محور ورق و طبق استاندارد ASTM-E8 تهیه شده است. شکل (۲) منحنی‌های تنش- کرنش بدست آمده از آزمایش کشش در دماهای متفاوت را نمایش می‌دهد.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی جنس لوله (%)

Al	Mg	Cu	Mn	Fe	Si	Zn	Ti
bal	0.02	0.07	1.10	0.50	0.21	0.01	0.02

## ۳- مدل سازی فرایند

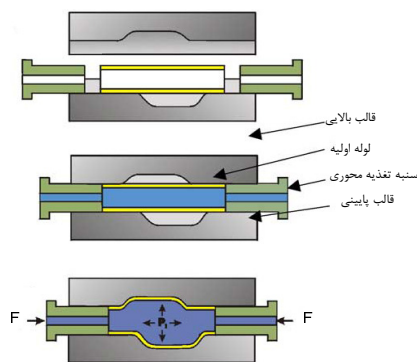
شبیه‌سازی اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار MSC.Marc به منظور درک رفتار تغییر شکل لوله‌های آلومینیومی در طی فرآیند هیدروفرمینگ گرم لوله انجام شده است. در شبیه‌سازی به جای تاثیر فشار سیال از توزیع فشار یکنواخت استفاده شده و برای صرفه جویی در زمان محاسبه، فقط یک چهارم قالب و لوله شبیه‌سازی شده است.

جدول (۲) اطلاعات وارد شده به شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد. ضریب اصطکاک کولمبی برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شده است. جهت شبیه‌سازی لوله از المانهای پوسته‌ای استفاده شده و قالب نیز کاملاً صلب در نظر گرفته شده است.

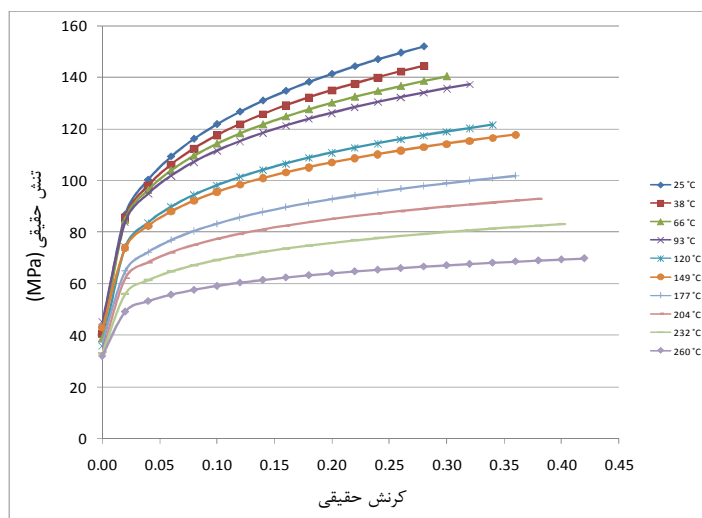
در شبیه‌سازی فرض شده که لوله دارای خواص حرارتی همگن است و همچنین به دلیل ضخامت کم لوله، ضریب انتقال حرارت بالا و حجم کم آن نسبت به قالب‌دارای دمای ثابتی در طول فرآیند می‌باشد. مدل شبیه‌سازی در شکل (۳) نمایش داده شده است.

لیو همکارانش [۴] هیدروفرم‌پذیری لوله‌های آلومینیومی (AA7075) بین دمای اتاق تا دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد را مورد بررسی قرار دادند. به منظور انجام فرآیند به شکل گرم از یک کوپل حرارتی قرار داده در سیال استفاده شد که پس از رسیدن سیال به دمای مورد نظر فرآیند هیدروفرمینگ انجام می‌شد. بر اساس نتایج به دست آمده هیدروفرم‌پذیری با افزایش دما زیاد می‌شود.

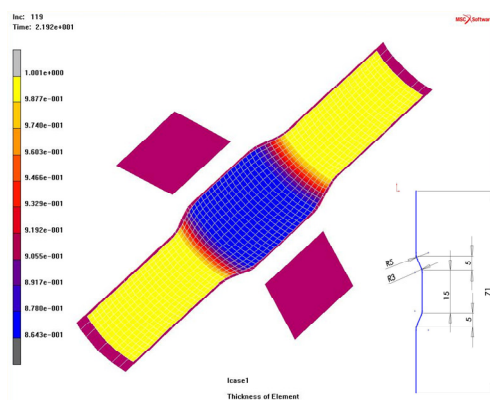
یوان و همکارانش [۵] تاثیر دما را بر روی خواص مکانیکی لوله‌های آلومینیومی (4A02) بصورت تجربی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله و آزمایش کشش تک‌محوری مورد مطالعه قرار دادند. نتایج هر دو آزمایش نشان داد که تغییر طول و شکل‌پذیری لوله‌ها در دماهای بالا افزایش می‌یابد و بیشترین بالج لوله‌ها در دماهای بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد بدست می‌آید. کیمو همکارانش [۲] آزمایش بالج آزاد را برای لوله‌های با آلیاژ AA6061 بوسیله آزمایش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود به وسیله نرم‌افزار DEFORM-2D در دماهای بالا انجام دادند. پارامترهای بهینه بدست آمده از شبیه‌سازی مانند فشار و تغذیه محوری برای آزمایش تجربی مورد استفاده قرار گرفت. یی و همکارانش [۶] سیستم گرمایش ترکیبی را برای ایجاد توزیع یکنواخت دما روی سطح لوله ایجاد کردند. این سیستم شامل یک گرم‌کننده القایی که روی سطح لوله قرار داشت و یک کوپل حرارتی که درون لوله بود، می‌شد.



شکل (۱): فرآیند هیدروفرمینگ لوله



شکل (۲): منحنی تنش کرنش AA3003 در دماهای متفاوت [Y]



شکل (۳): مدل شبیه سازی

	120	مدول یانگ (GPa)
	0.3	ضریب پواسون
	طبق شکل ۱	منحنی تنش جریان
خواص حرارتی		
[Y]	220	ضریب هدایت حرارتی لوله (J/m K)
[Y]	904	ظرفیت گرمایی ویژه لوله (J/kg K)

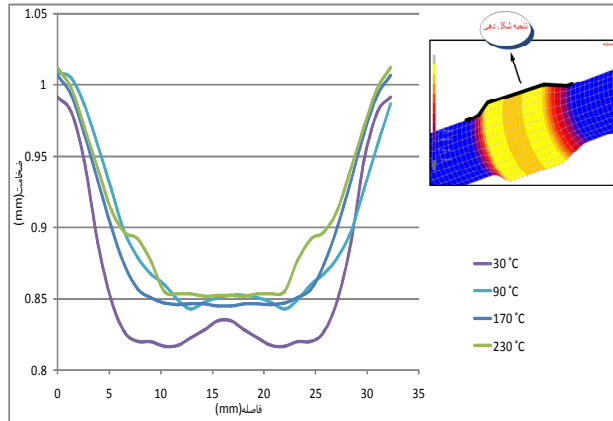
به منظور تعیین تاثیر دمای فرآیند بر روی توزیع ضخامت منحنی فشار مورد استفاده در تمام شبیه سازیها ثابت با فشار کالیبراسیون ۵۰ مگاپاسکال نشان داده شده در شکل (۴) در نظر گرفته شده است. هم چنین برای تعیین میزان تاثیر تغذیه محوری سه حالت متفاوت دو انتهای لوله ثابت، دو انتهای لوله آزاد و اعمال تغذیه محوری شبیه سازی شده است.

جدول (۲): پارامترهای فرآیند بکار رفته در شبیه سازی

پارامتر (یکا)	مقدار	مرجع
تجهیزات		
قطر اولیه (mm)	15.8	
ضخامت اولیه (mm)	1	
جنس لوله	AA3003	
دمای لوله (°C)	30,90,170,230	
خواص مکانیکی		

#### ۴- دو انتهای لوله ثابت

در این حالت فرض می شود که سنبه های تغذیه محوری هیچ حرکتی ندارند و از حرکت لوله نیز در امتداد محور نیز جلوگیری می کنند بنابراین نازک شدگی سریع تر رخ می دهد. تغییرات توزیع ضخامت در دماهای متفاوت در ناحیه شکل دهی در شکل (۵) نمایش داده شده است.

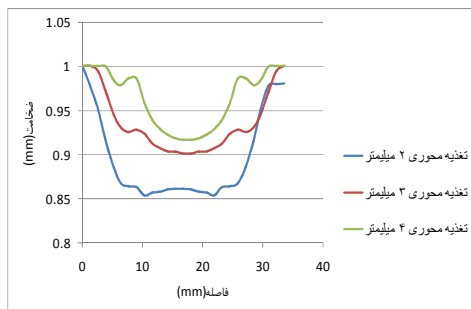


شکل (۶): توزیع ضخامت در حالت دو انتهای لوله آزاد

### ۶- اعمال تغذیه محوری

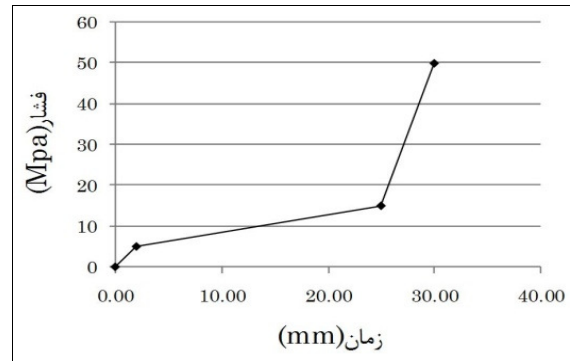
در این حالت برای تعیین تاثیر تغذیه محوری و هم چنین بهترین مقدار تغذیه و حد تغذیه منجر به ایجاد چروکیدگی در دماهای مختلف، مقادیر تغذیه محوری متفاوتی به صورت خطی به دو انتهای لوله اعمال شد.

با توجه به شکل (۷) در دمای ۱۷۰ درجه با افزایش مقدار تغذیه محوری، توزیع ضخامت بهبود یافته است که این حالت برای دماهای دیگر نیز صادق است. اما با افزایش تغذیه محوری توزیع ضخامت غیر یکنواخت می شود و در نتیجه احتمال ایجاد چروکیدگی افزایش می یابد.



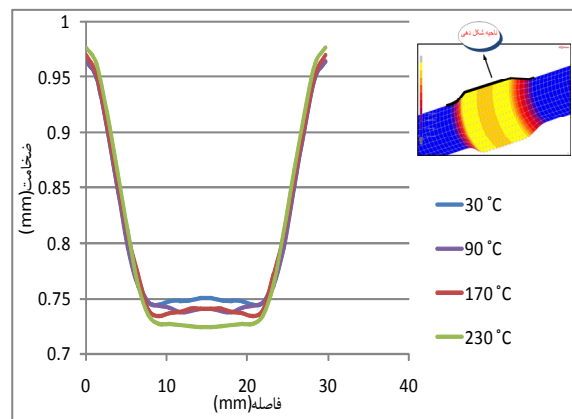
شکل (۷): توزیع ضخامت با اعمال تغذیه محوری در دمای ۱۷۰ درجه

شکل (۸) مقادیر تغذیه محوری منجر به ایجاد چروکیدگی را در دماهای متفاوت نمایش می دهد. با بالا رفتن دما، مقدار تغذیه محوری که منجر به ایجاد چروکیدگی در قطعه می شود، نیز افزایش می یابد. دلیل این پدیده، نرم شدن ماده در دماهای بالاتر و در نتیجه افزایش قابلیت فشرده شدن آن می باشد.



شکل (۴): منحنی فشار

با توجه به شکل، هرچه دمای فرآیند بالاتر می رود، نازک شدگی افزایش می یابد و احتمال پارگی قطعه بیشتر می شود. علت اصلی این پدیده، کاهش تغییر شکل یکنواخت در ماده و ایجاد گلوئی در کرنش های پایین تر با افزایش دما می باشد.



شکل (۵): توزیع ضخامت در حالت دو انتهای لوله ثابت

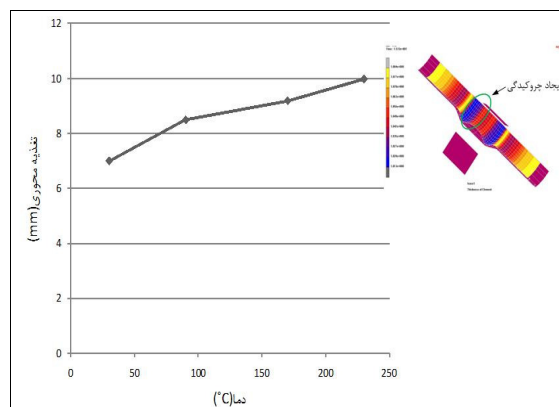
### ۵- دو انتهای لوله آزاد

در این حالت با این که سنبه های تغذیه محوری همراه با لوله حرکت می کنند ولی هیچ نیروی برای اعمال تغذیه محوری به دو انتهای لوله وارد نمی کنند. توزیع ضخامت بدست آمده در دماهای متفاوت در شکل (۶) نمایش داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود، با افزایش دمای فرآیند بر عکس حالت دو انتهای لوله ثابت توزیع ضخامت بهبود یافته و نازک شدگی کمتری در محصول نهایی مشاهده می شود.

## ۷- نتیجه گیری

هیدروفرمینگ گرم لوله‌های آلومینیومی به وسیله شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفت. تاثیر دما بر روی توزیع ضخامت و نازک شدگی بررسی شد. نتایج زیر از شبیه‌سازی بدست آمد:

- در حالتی که دو انتهای لوله ثابت باشد، با افزایش دما نازک‌شدگی افزایش می‌یابد.
- هنگامی که دو انتهای لوله آزادانه حرکت کند، افزایش دما بهبود توزیع ضخامت را به دنبال خواهد داشت.
- با بالا رفتن دما، میزان تغذیه محوری که باعث شروع چروکیدگی در محصول می‌شود، افزایش می‌یابد.



شکل (۸): میزان تغذیه محوری منجر به چروکیدگی

## مراجع

- 1- F. Vollstern, T. Prange, M. Sander, "Hydroforming: needs, developments and perspectives", Proceedings of the Sixth ICTP, pp. 1197-1210, 1999, Italy.
- 2- B.J. Kim, C.J. Van Tyne, M.Y. Lee, Y.H. Moon, "Finite element analysis and experimental confirmation of warm hydroforming process for aluminum alloy", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 296-299, 2007.
- 3- T. Sokolowski, K. Gerke, M. Ahmetoglu, T. Altan, "Evaluation of tube formability and material characteristics: hydraulic bulge testing of tubes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 98, pp. 34-40, 2000.
- 4- Mun-Yong Lee, Sung-Man Sohn, Chang-Yong Kang, "Effects of pre-treatment conditions on warm hydroformability of 7075 aluminum tubes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 155-156, 2004, 1337-1343.
- 5- Shijian Yuan, Jun Qi, Zhubin He, "An experimental investigation into the formability of hydroforming 5A02 Al-tubes at elevated temperature", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, pp. 680-683, 2006.
- 6- H.K. Yi, E.J. Pavlina, C.J. Van Tyne, Y.H. Moon, Application of a combined heating system for the warm hydroforming of lightweight alloy tubes, Journal of materials processing technology, Vol. 203, pp. 532-536, 2008.
- 7- Nader Elias Abedrabbo, Forming of aluminum alloys at elevated temperatures, Ph.D. Thesis, Michigan State University, 2005.