

مدل‌سازی فرآیند اسپینینگ مخازن آلومینیومی تحت فشار و بررسی پارامترهای مؤثر

محمد صدیقی^{۱*}، کمال‌الدین ناصری نژاد^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۱۹	یکی از مراحل مهم ساخت مخازن تحت فشار بدون درز، گنبدی کردن انتهای لوله (اسپینینگ) است. شبیه‌سازی انجام این فرآیند روی یک لوله‌ی آلومینیومی و بررسی اثر برخی از پارامترها در آن، موضوع اصلی مقاله‌ی حاضر می‌باشد. فرآیند مذکور با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و با روش دینامیک صریح شبیه‌سازی شده و توزیع ضخامت و هندسه‌ی نهایی مخزن به دست آمده است. همچنین اثرات برخی از پارامترها بر پایداری کلی فرآیند و در گذر اول مورد بررسی قرار گرفته و نتایج گزارش شده است. این پارامترها عبارت‌اند از سرعت دوران غلتک، گام غلتک و فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک از سر آزاد لوله در گذر اول. افزایش سرعت و گام باعث کاهش چروک و اعوجاجات به وجود آمده و نتیجتاً باعث پایداری بیشتر فرآیند می‌شوند. افزایش فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک، کرنش‌های به وجود آمده در گذر اول را افزایش می‌دهد، اما در روند آنها تغییر محسوسی ایجاد نمی‌کند. روند کلی نمودارهای مربوط این کرنش‌ها با یکی از پژوهش‌های مشابه مطابقت دارد. اثر ضریب بزرگ‌نمایی جرم نیز بر فرآیند شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. افزایش این ضریب باعث افزایش اعوجاجات به وجود آمده در این فرآیند می‌شود.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۲	
واژگان کلیدی: اسپینینگ، گنبدی کردن انتهای لوله، مخازن تحت فشار بدون درز.	

۱- مقدمه

مخازن تحت فشار یکی از اجزای پرکاربرد در صنایع جهان و ایران است. از جمله‌ی این کاربردها می‌توان از مخازن به کار رفته در صنایع فضایی، مخازن گاز طبیعی در خودرو، مخازن گازهای مختلف از جمله اکسیژن در صنعت، تجهیزات ورزشی و پزشکی، مخازن اطفاء حریق و غیره نام برد. این مخازن را می‌توان به دو روش یکپارچه و یا از اتصال دو یا چند قسمت ساخت. ساخت یکپارچه، مخزن با کیفیت و استحکام بالاتری را به دست می‌دهد. یکی از مراحل ساخت چنین مخزنی اسپینینگ یا گنبدی کردن انتهای لوله است.

از طرفی، مخازن بدون درز تولید شده در کشور معمولاً از جنس فولاد هستند و نتیجتاً وزن زیادی دارند. استفاده از چنین مخازنی در خودروها و سایر وسایل نقلیه باعث

افزایش مصرف سوخت می‌شود. این در صورتی است که با ساخت مخازن از جنس آلومینیوم می‌توان وزن را کاهش و مقاومت در برابر خوردگی را افزایش داد. جهت ساخت مخزن آلومینیومی باید مراحل تولید مخزن فولادی بر آلومینیوم منطبق شود. یکی از مهم‌ترین مراحل، گنبدی کردن انتهای لوله است.

تعداد مقالات کمی در مورد گنبدی کردن انتهای لوله منتشر شده است. یوشیهارا و همکاران [۱] در اولین پژوهش‌های موجود در این زمینه به گنبدی کردن انتهای یک لوله‌ی از جنس آلیاژ منیزیم، با دو روش عملی و المان محدود پرداخته‌اند. ایشان در مقاله‌ی خود تصریح می‌کنند که به دلیل سختی مدل‌سازی صحیح مکانیزم پیچیده‌ی شکل‌دهی، شبیه‌سازی گنبدی کردن انتهای لوله تا تاریخ مقاله (۲۰۰۴) به نمایش گذاشته نشده است. آکوس و

*. پست الکترونیک نویسنده مسئول: sedighi@iust.ac.ir

۱. استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

کرنش‌های گام اول مورد توجه است. نرم‌افزار مورد استفاده در این شبیه‌سازی نرم‌افزار آباکوس^۲ می‌باشد.

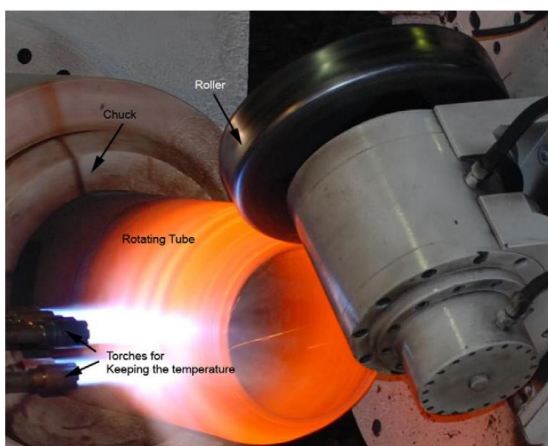
۲- شبیه‌سازی فرآیند، محدودیت‌ها و پارامترها

جهت مطرح کردن روند شبیه‌سازی، محدودیت‌ها و پارامترهای فرآیند، ابتدا به توضیح فرآیند عملی گنبدی کردن انتهای لوله پرداخته می‌شود.

۱-۲- فرآیند عملی

در این فرآیند انتهای باز لیوان^۳ حاصل از کشش عمیق یا انتهای یک لوله با حرکات رفت و برگشتی یک غلتک به شکل یک گنبد در می‌آید. در حین فرآیند شکل‌دهی، لوله در حال دوران است. با توجه به تغییر شکل زیاد ایجاد شده، دمای لوله‌ی در حال دوران از طریق مشعل‌هایی بالا نگه داشته می‌شود. شکل (۱) نمایی از فرآیند عملی گنبدی کردن انتهای لوله را نشان می‌دهد. در این فرآیند یک سر لوله درون سه نظام کاملاً مقید شده است و شکل‌دهی روی سر دیگر لوله انجام می‌شود. به این نواحی به ترتیب سر گیردار و سر آزاد لوله اطلاق می‌شود.

به هر مقطع از حرکات شکل‌دهی انجام شده توسط غلتک یک گذر می‌گویند. در هر گذر با حرکت غلتک، شکل لوله‌ی در حال دوران به شکل گنبد مورد نظر نزدیک‌تر می‌شود. هر گذر روی یک مسیر از قبل تعیین شده انجام می‌گیرد. این مسیر می‌تواند دایره‌ای یا غیر دایره‌ای باشد. سرعت حرکت غلتک روی این مسیر، گام فرآیند نامیده می‌شود.



شکل ۱: فرآیند عملی گنبدی کردن انتهای لوله [۸]

در این پژوهش فرآیند گنبدی کردن روی انتهای یک لوله از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ که تا دمای ۲۰۰ درجه‌ی

کاواهارا [۲] به گنبدی کردن انتهای یک لوله‌ی آلومینیومی پرداخته و پژوهش خود را روی بهینه‌سازی توزیع ضخامت در سر مخزن متمرکز کرده‌اند. در سال‌های بعد لکزیان و داریانی با استفاده از یک کد المان محدود به شبیه‌سازی گنبدی کردن انتهای یک لوله‌ی فولادی پرداختند و نتایج را با فرآیند عملی مقایسه نمودند. از این مجموعه پژوهش که تجربیات و داده‌های سودمندی به همراه داشته، مقالات متعددی به زبان‌ها انگلیسی و فارسی به چاپ رسیده است. این مقالات به همکاری افراد مختلف نگارش شده‌اند [۳-۶].

هانگ و همکاران [۷] به گنبدی کردن انتهای باز یک لیوان فولادی با ابعاد کوچک پرداخته‌اند. در آخرین فعالیت‌های صورت گرفته در زمینه‌ی گنبدی کردن انتهای لوله، ذوقی و همکاران یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین پژوهش‌ها را در این زمینه انجام داده‌اند. ایشان به انجام فرآیند عملی و شبیه‌سازی گنبدی کردن انتهای یک لوله‌ی فولادی پرداخته‌اند که تا دمای ۸۵۰ درجه‌ی سلسیوس گرم شده است. بررسی اثر گام و نقطه‌ی آغاز تماس غلتک با لوله بر کرنش‌های به وجود آمده، بررسی مدهای تغییر شکل، تنش‌های پسماند، تکنیک‌های شبیه‌سازی، تطبیق توزیع ضخامت گنبد حاصل از شبیه‌سازی با گنبد ساخته شده در فرآیند عملی و در نظر گرفتن اثرات انتقال حرارت از جمله‌ی فعالیت‌های ذوقی و همکاران است. مقالات [۱۰-۱۸] از نتایج این پژوهش‌ها به شمار می‌رود.

در این میان با وجود کاربردهای عملی از آلیاژ آلومینیوم در ساخت مخازن تحت فشار، پژوهشی که در آن شبیه‌سازی فرآیند گنبدی کردن روی انتهای لوله‌ی از این جنس انجام شده باشد یافت نشده است. توجه به مزایای استفاده از آلومینیوم، اهمیت انجام چنین پژوهشی را بیشتر نمایان می‌کند. در چنین شرایطی، مقاله‌ی حاضر به شبیه‌سازی گنبدی کردن انتهای یک لوله‌ی آلومینیوم و بررسی اثر برخی پارامترها می‌پردازد. اثر سه پارامتر فرآیند (گام^۱، سرعت دوران و فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک با لوله از سر آزاد آن) و اثر یک پارامتر شبیه‌سازی (ضریب بزرگ‌نمایی جرم) را مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اثر گام، سرعت و ضریب بزرگ‌نمایی جرم بر اعوجاج و چروک و اثر فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک با لوله از سر آزاد آن بر

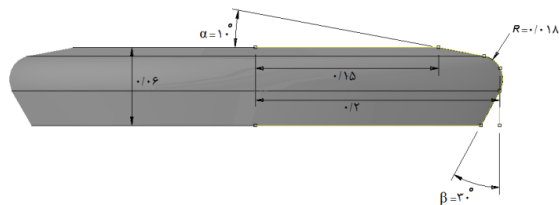
^۳ Cup

^۱ Feed

^۲ Abaqus

می‌پردازد، مقدار ۵ میلی‌متر انتخاب شده است. پارامتر مهم دیگر، طول لوله می‌باشد. منظور از طول لوله در فرآیند شبیه‌سازی، فاصله‌ی بین سر آزاد لوله و گیره یا سه‌نظام نگه‌دارنده‌ی لوله در فرآیند عملی است. تنها، فرآیند انجام شده روی این ناحیه شبیه‌سازی می‌شود. طول لوله در پژوهش حاضر ۲۹۰ میلی‌متر انتخاب شده است. شکل (۳) هندسه‌ی لوله را نشان می‌دهد.

در پژوهش لکزیان و داریانی [۶] که روی هندسه‌ی غلتک متمرکز بوده، قطر لوله و غلتک به ترتیب ۳۵۶ و ۴۰۰ میلی‌متر تعیین شده است. با توجه به یکسان بودن قطر لوله در پژوهش مذکور و پژوهش حاضر، غلتک با اندازه‌هایی مشابه انتخاب گردیده است. مقدار شعاع دماغه و زاویه‌ی تماس غلتک نیز بر همین اساس به ترتیب ۱۸ میلی‌متر و ۱۰ درجه تعیین شده است. زاویه‌ی تماس با حرف α در شکل (۴) مشاهده می‌شود. با توجه به امکان اتصال غیر مطلوب بین لوله و غلتک، زاویه‌ی رهایی غلتک بر اساس پژوهش ذوقی و همکاران [۹] ۳۰ درجه تعیین گردیده است. این زاویه با حرف β در شکل (۴) مشاهده می‌شود.



شکل ۴: هندسه‌ی غلتک مورد استفاده (واحدها به متر هستند)

چینش غلتک و لوله نسبت به یکدیگر در تعیین مقدار دو پارامتر مهم اثر مستقیم دارد. پارامتر اول فاصله‌ی نقطه‌ی تماس اولیه‌ی غلتک از سر آزاد لوله می‌باشد. مقدار این فاصله بر اساس تجربه به دست آمده در طی شبیه‌سازی‌های متعدد مقدار تقریبی ۱ میلی‌متر انتخاب شده است. پارامتر دوم زاویه‌ی غلتک با محور لوله می‌باشد. جهت جلوگیری از برخورد نامطلوب بین غلتک و لوله و همچنین استفاده‌ی بهتر از ناحیه‌ی با شعاع ۱۸ میلی‌متر، مقدار ۹۰ درجه برای این زاویه انتخاب شده است.

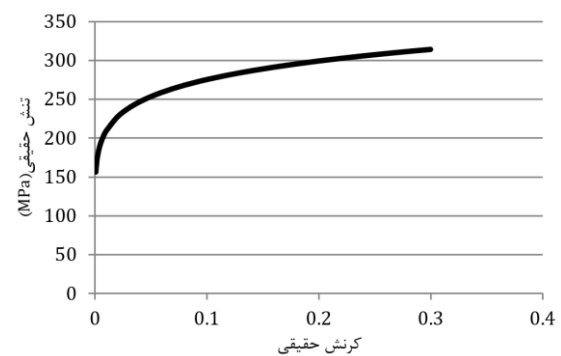
فرآیند شکل‌دهی در ۸ گذر دایره‌ای انجام می‌شود. مرکز این کمان‌ها محور لوله و جهت حرکت غلتک بر روی آنها از سمت سر گیردار به سمت سر آزاد لوله است. در هر گذر

سلسیوس گرم شده است، انجام می‌شود. خواص مورد استفاده در جدول ۱ و شکل (۲) آورده شده است.

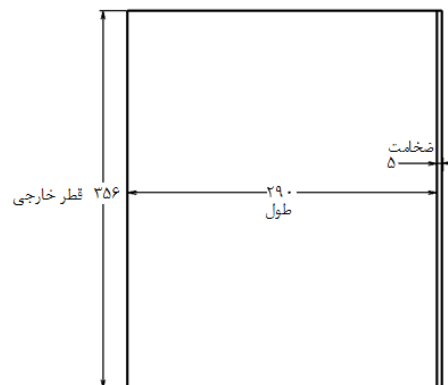
جدول ۱: خواص آلومینیوم ۶۰۶۱ [۱۱]

پارامتر	ضریب پواسن	مدول الاستیسیته	چگالی
مقدار	۰/۳۳	۶۹ GPa	۲۷۰۰ kg/m ³

از آنجایی که در پژوهش حاضر سعی بر آن بوده است که جنبه‌های عملی و صنعتی فرآیند در نظر گرفته شود، قطر لوله بر اساس قطر مخزن تولید شده توسط یک شرکت داخلی تولید مخازن سی ان جی مقدار ۳۵۶ میلی‌متر انتخاب شده است.



شکل ۲: خواص آلومینیوم ۶۰۶۱، به دست آمده از تست بالج در دمای ۲۰۰°C [۱۳]



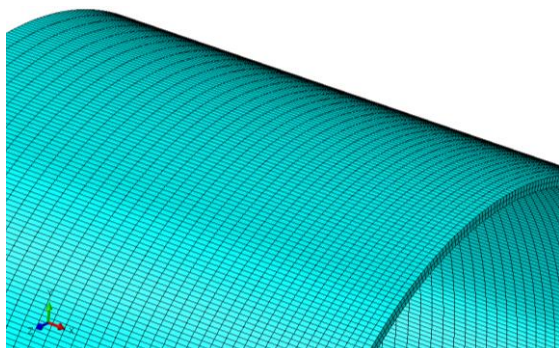
شکل ۳: هندسه‌ی لوله (ابعاد به میلی‌متر است)

در یکی از روش‌های تولید مخزن بدون درز، ابتدا یک ورق از جنس فلز مورد نظر تحت کشش عمیق قرار می‌گیرد و انتهای باز لیوان تولید شده با روش گنبدی کردن به یک مخزن تبدیل می‌شود. ضخامت لوله در پژوهش حاضر بر اساس ضخامت در نظر گرفته شده در پژوهشی [۱۲] که به کشش عمیق ورق جهت تولید مخازن سی ان جی

۱. کلمه‌ی "تقریبی" به دلیل در نظر گرفتن دایره‌ای بودن دماغه‌ی غلتک و حرکت دایره‌ای کوتاهی است که قبل از برخورد با لوله انجام می‌دهد.

بودن ناحیه‌ی گیردار لوله است. جهت اعمال این شرایط، سطح ضخامت لوله در یک سر آن کاملاً مقید شده و تمام درجات آزادی آن حذف شده است. جهت ایجاد دوران غلتک و مسیر شکل‌دهی سه شرط مرزی دورانی روی نقطه‌ی مرجع غلتک تعریف می‌شود.

جهت شبکه‌بندی^۱ از المان توپ^۲ مکعبی (C3D8R) استفاده شده است. در راستای ضخامت لوله دو المان قرار دارد. تعداد المان در محیط ۴۴۸ و در طول لوله ۴۴ است. با توجه به تغییر شکل بیشتر المان‌های نزدیک به سر آزاد لوله، این المان‌ها اندازه‌ی طولی کوچک‌تری نسبت به المان‌های نزدیک به سر گیردار لوله دارند. شکل (۶) شبکه‌بندی انجام شده در لوله را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که نوع غلتک مدل‌سازی شده جسم صلب تحلیلی^۳ می‌باشد و شبکه‌بندی نمی‌شود. صلب در نظر گرفتن غلتک در پژوهش‌های [۳] و [۱۰-۷] نیز انجام گرفته است.

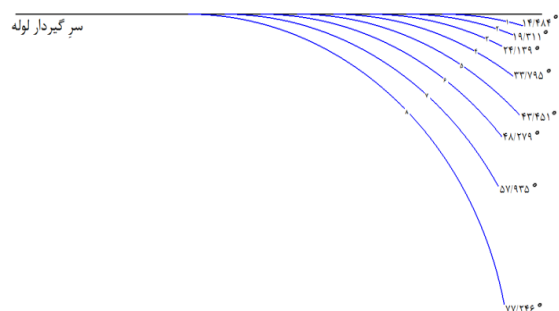


شکل ۶: شبکه‌بندی لوله، به توزیع المان‌ها در راستای محور لوله (x) توجه شود

۲-۳- محدودیت‌ها

دستیابی به مقدار بهینه برای هر پارامتر یا مقداری که بتوان با آن شبیه‌سازی را به جلو برد، با توجه به تعدد پارامترها و اثرات هر یک، مهم‌ترین چالش پیش رو در این پژوهش بوده است. به ویژه آن که در زمینه‌ی انجام شبیه‌سازی گنبدی کردن انتهای لوله آلومینیومی، در سطح پژوهشی هیچ مقاله‌ای یافت نشده است. در مورد فرآیند عملی گنبدی کردن انتهای لوله در سطح کشور یا فعالیتی صورت نگرفته است یا اطلاعات فعالیت‌های انجام شده به سادگی در دسترس نیست. با این تفاسیل شبیه‌سازی مذکور با مشکلات و مجهولات متعددی روبرو بوده است. بزرگ بودن مدل، پژوهشگران را جهت حل مسئله با شرایط

فاصله‌ی نقطه‌ی شروع شکل‌دهی از سر آزاد ۲۰ میلی‌متر بیشتر می‌شود. شکل (۵) مسیرهای شکل‌دهی در گذرهای مختلف را نشان می‌دهد. مقدار زاویه‌ی کمان هر گذر بر اساس تجربه‌ی کسب شده در طول شبیه‌سازی‌های متعدد انتخاب شده است. مبنای به کار گرفته شده زمان شکل‌دهی در یک سرعت زاویه‌ای مشخص بوده است که با استفاده از این زمان و سرعت زاویه‌ای، زوایای نشان داده شده در شکل (۵) به دست آمده‌اند.



شکل ۵: گذرهای شکل‌دهی، جهت حرکت دماغه‌ی غلتک روی این مسیرها از سمت سر آزاد به سمت سر گیردار است

سرعت دوران لوله پس از سیر طولانی از آزمایش سرعت‌های مختلف، ۸۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شده است. گام نیز طی فرآیندی مشابه، در نهایت مقادیر ۷/۵ میلی‌متر بر دور برای گذرهای اول تا ۹۳/۷۵٪ از گذر هشتم و ۱/۵ میلی‌متر بر دور برای ۶/۲۵٪ باقیمانده از گذر هشتم انتخاب گردیده است.

با توجه به حرکت غلتشی غلتک در فرآیند عملی، تماس بین غلتک و لوله به صورت بدون اصطکاک شبیه‌سازی شده است. در این مورد می‌توان برخی از پژوهش‌های انجام شده (مانند [۳]، [۵-۶] و [۱۴]) از جمله پژوهش لکزیان و داریانی [۶] را مورد استناد قرار داد. ایشان در مقاله‌ی خود چنین می‌نویسند: «با توجه به امکان چرخش غلتک حول محور خود، اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی چرخشی تقریباً ناچیز است به طوری که در اکثر نشریات، این فرآیند بدون اصطکاک مدل‌سازی شده است».

۲-۲- مدل‌سازی

لوله و غلتک در نرم‌افزار آباکوس رسم شده و شرایط مرزی لازم روی آنها اعمال شده است. اولین شرط مرزی ثابت

³ Analytical Rigid Body

¹ Mesh

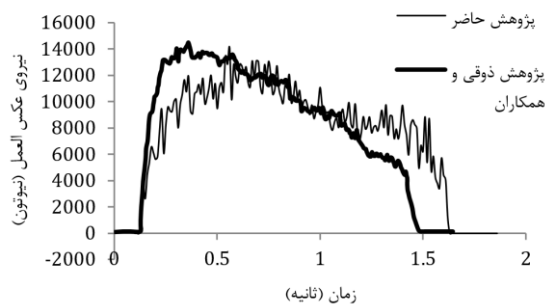
² Solid

نیز انجام شده است.

۳-۱- اعتبارسنجی

از آنجایی که در پژوهش پیش رو فرآیند عملی گنبدی کردن انتهای لوله انجام نگرفته است، باید از پژوهش‌های مشابه جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام شده استفاده شود. تنها پژوهشی که روی گنبدی کردن انتهای لوله آلومینیومی متمرکز می‌باشد، پژوهش آکوس و کاواهارا [۲] است. جهت حرکت غلتک در این پژوهش از سمت سر آزاد به سمت سر گیردار لوله می‌باشد. به عبارت دیگر روش انجام فرآیند در پژوهش مذکور، به شکل بنیانی با پژوهش حاضر متفاوت است. لذا نمی‌توان از نتایج آن جهت اعتبارسنجی استفاده کرد.

با توجه به توضیحات فوق، در این قسمت سعی شده است تا با انجام شبیه‌سازی صورت گرفته توسط دیگر پژوهشگران و مقایسه‌ی دو پارامتر نیرو و کرنش، روش شبیه‌سازی استفاده شده در پژوهش حاضر اعتبارسنجی گردد. در این زمینه، ذوقی و همکاران [۸-۹] در پژوهشی به گنبدی کردن انتهای لوله فولادی (42CrMo) پرداخته‌اند. داده‌های ارائه شده در مقالات این پژوهشگران با روش دیجیتال استخراج شده و جهت اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۷: مقایسه‌ی مقدار نیروی عکس‌العمل غلتک در تکرار انجام شده به روش مورد استفاده در پژوهش حاضر و پژوهش ذوقی و همکاران [۸]

۳-۱-۱- نیروی عکس‌العمل

با تکرار شبیه‌سازی انجام شده توسط ذوقی و همکاران [۸]، مقدار نیروی عکس‌العمل غلتک در گذر اول با گام 2.5 mm/rev به دست آمده است. فاصله‌ی نقطه‌ی تماس غلتک از سر آزاد لوله ۴۰ میلی‌متر می‌باشد. شکل (۷) نمودار آمده در مقاله‌ی ایشان و نمودار به دست آمده در

مناسب ملزم به استفاده از امکانات سخت‌افزاری قوی می‌کند. این در حالی است که زمان انجام فرآیند شکل‌دهی نیز نسبتاً طولانی است.

در پژوهش حاضر جهت کاهش زمان حل مسئله از ضریب بزرگنمایی جرم استفاده شده است. این ضریب با بالا بردن مجازی چگالی ماده باعث افزایش مقدار نمو زمانی و نتیجتاً کاهش زمان حل می‌شود. ضرایب بزرگنمایی جرم بهینه‌سازی شده‌ای برای مراحل مختلف شکل‌دهی مورد استفاده قرار گرفته است. این ضرایب به ترتیب ۱، ۲، ۴ و ۲ جهت استفاده در گذرهای اول تا ششم، هفتم، ۹۳/۷۵٪ از گذر هشتم و ۶/۲۵٪ باقیمانده از گذر هشتم تعیین شده‌اند. در نظر گرفتن ضریب بزرگنمایی جرم ممکن است با اثرات دینامیک جانبی، اثر نامطلوبی بر شکل گنبد حاصل بگذارد. لذا در پژوهش حاضر لوله ثابت است و غلتک با دوران خود گنبد را شکل می‌دهد. ذوقی و همکاران [۸] کارایی این روش را با موفقیت مورد آزمایش قرار داده‌اند. همچنین تکنیک حل همزمان جهت بالا بردن سرعت حل به کار رفته است. در این تکنیک جهت دستیابی به هدف مذکور، از چند هسته‌ی محاسباتی استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر با توجه به امکانات در دسترس، ۴ هسته‌ی محاسباتی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین دقت حل روی حالت دقت مضاعف^۱ تنظیم گردیده است.

۲-۴- پارامترها

اثر سه پارامتر فرآیند (گام، سرعت دوران و فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک با لوله از سر آزاد آن) و اثر یک پارامتر شبیه‌سازی (ضریب بزرگنمایی جرم) در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. اثر گام، سرعت و ضریب بزرگنمایی جرم بر اعوجاج و چروک و اثر فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک با لوله از سر آزاد آن بر کرنش‌های حاصل از اول مورد توجه است. در مورد هر پارامتر، چند شبیه‌سازی با مقادیر مختلف انجام می‌گیرد و تغییرات ایجاد شده بررسی می‌شوند.

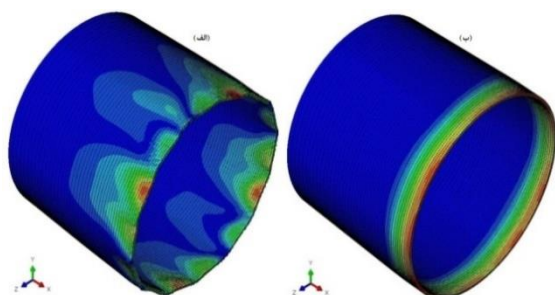
۳- نتایج و بحث

با استفاده از روش و مقادیر پارامتر انتخاب شده، شبیه‌سازی نهایی صورت گرفت. انجام شبیه‌سازی مذکور مجموعاً زمانی در حدود ۱۲۱ ساعت را به خود اختصاص داد. جهت بررسی اثر پارامترها در گذرهای مختلف شبیه‌سازی‌های مقطعی

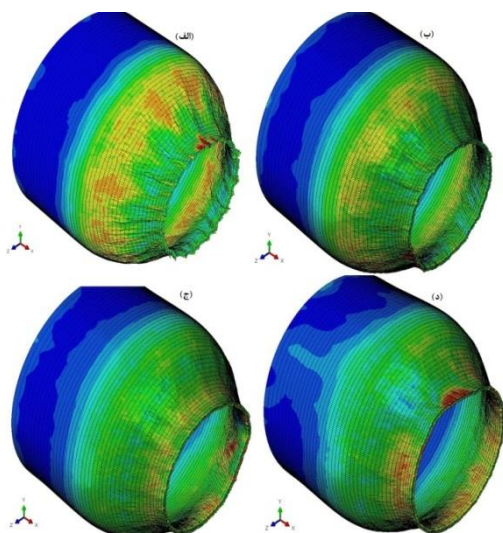
^۱ Double

شده در پژوهش حاضر با استناد به پژوهش‌های قبلی لوله ثابت می‌ماند و غلتک با حرکتی که از چند دوران تشکیل شده است، کار شکل‌دهی را انجام می‌دهد. با توجه این مطلب، منظور از سرعت دوران در این قسمت سرعت دوران غلتک حول محور استوانه است.

طبق شبیه‌سازی‌های انجام شده، افزایش این سرعت موجب کاهش اعوجاجات و چروک به وجود آمده می‌شود. به بیان دیگر می‌توان گفت که یکی از دلایل ایجاد اعوجاج در شکل نهایی، پایین بودن سرعت دوران غلتک است. در شکل (۹) این موضوع به وضوح مشاهده می‌شود.



شکل ۹: توزیع مقدار جابجایی در شکل حاصل از گذر اول، الف- سرعت دوران غلتک 150rpm، ب) سرعت دوران غلتک 800rpm



شکل ۱۰: تأثیر مقدار گام بر میزان چروک به وجود آمده در پایان گذر ششم، الف- گام 1mm/rev، ب- گام 3mm/rev، ج- گام 6mm/rev، د- گام 7.5mm/rev

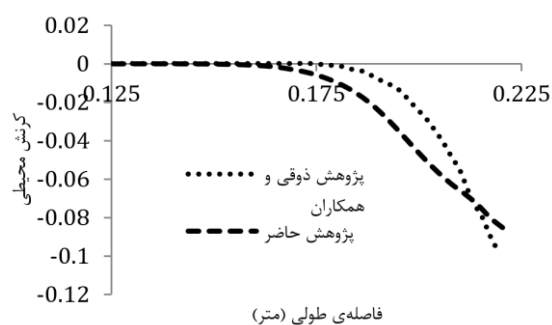
۳-۲-۲- گام

منظور از گام فرآیند، سرعت حرکت غلتک روی مسیر است که شکل‌دهی را انجام می‌دهد. گام انتخاب شده جهت انجام گنبدی کردن انتهای لوله می‌تواند اثرات متعددی بر این فرآیند داشته باشد. به لحاظ اقتصادی هر چه گام بالاتر

پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با وجود اختلاف، روند کلی و مقادیر حداکثر به یکدیگر نزدیک هستند. مقدار خطا بین حداکثر نیروی عکس‌العمل در دو پژوهش ۲/۸٪ است.

۳-۱-۲- توزیع کرنش

با تکرار شبیه‌سازی انجام گرفته توسط ذوقی و همکاران [۹]، توزیع کرنش به دست آمده با توزیع کرنش گزارش شده در مقاله‌ی ایشان مقایسه شده است. این کرنش‌ها در جدار داخلی لوله‌ی تغییر شکل یافته‌ی حاصل از گذر اول خوانده می‌شود. شکل (۸) مقایسه مذکور را نشان می‌دهد. مقدار خطا در کرنش حداکثر، ۱۱/۷٪ است.



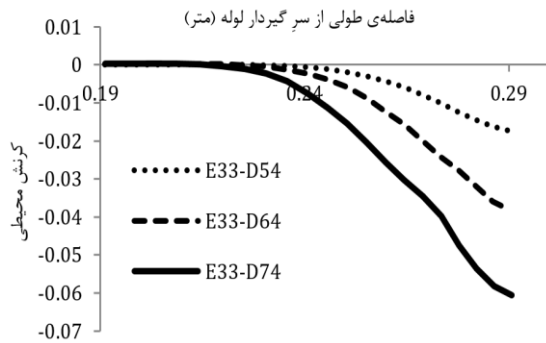
شکل ۸: مقایسه‌ی توزیع کرنش محیطی در جدار داخلی در تکرار انجام شده به روش مورد استفاده در پژوهش حاضر و پژوهش ذوقی و همکاران [۹]

۳-۲-۳- پارامترها

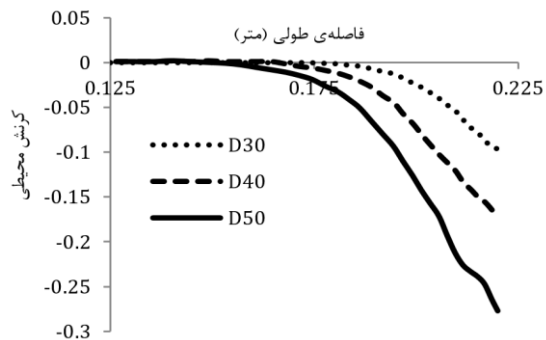
وجود اعوجاجات یکی از دلایل مهم موفق نبودن شبیه‌سازی می‌باشد. به عبارت دیگر، وقتی می‌توان گفت شبیه‌سازی با موفقیت به انجام رسیده است که لوله بدون اعوجاجات شدید و ناپایداری به شکل گنبد دربیاید. در تکمیل روند پژوهش انجام شده نیز مشکل عمده، وجود چروک و اعوجاج و به بیان دیگر ناپایداری فرآیند بوده است. در طی شبیه‌سازی‌های متعدد راه‌حل‌ها مختلفی جهت حل این مشکل به کار گرفته شد. در بررسی اثر پارامترهای مختلف با هدف حل مشکل نتایجی به دست آمده است که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته خواهد شد. همچنین در ادامه‌ی این بخش، اثر پارامتر فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک با لوله در گذر اول بررسی می‌شود.

۳-۲-۱- سرعت دوران

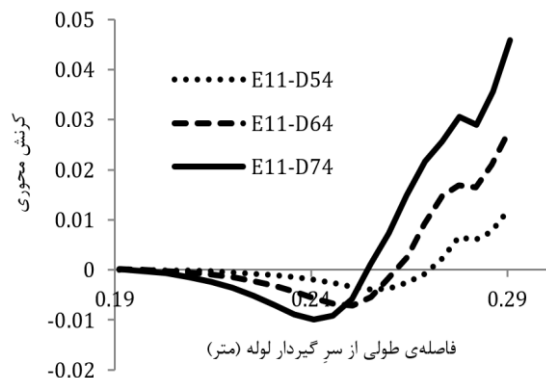
همان‌طور که در قسمت محدودیت‌ها توضیح داده شد، در فرآیند عملی گنبدی کردن، لوله در حال چرخش است و غلتک عمل شکل‌دهی را انجام می‌دهد. در شبیه‌سازی انجام



شکل ۱۳: کرنش محیطی در جدار داخلی به ازای فاصله‌های ۵۴، ۶۴ و ۷۴ میلی‌متری نقطه‌ی آغاز تماس غلتک با لوله



شکل ۱۴: کرنش محیطی در جدار داخلی به ازای فاصله‌های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متری نقطه‌ی آغاز تماس غلتک با لوله در پژوهش ذوقی و همکاران [۹]



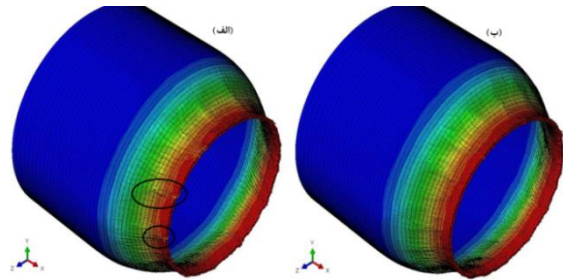
شکل ۱۵: کرنش محوری در جدار داخلی به ازای فاصله‌های ۵۴، ۶۴ و ۷۴ میلی‌متری نقطه‌ی آغاز تماس غلتک با لوله

شکل‌های (۱۳) تا (۱۸) کرنش‌های به دست آمده و نمودار متناظرشان در پژوهش ذوقی و همکاران [۹] را نشان می‌دهند. هدف از نمایش نمودارهای حاصل از پژوهش ذوقی و همکاران که با روش دیجیتال به دست آمده‌اند، نشان دادن تطابق روند کلی نمودارها است. با توجه به منحنی‌های آمده در شکل (۱۳) می‌توان دریافت: ۱- کرنش محیطی در جدار داخلی، در مقادیر مختلف

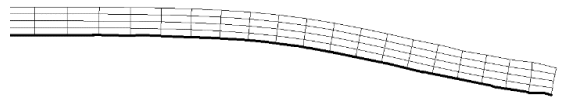
باشد، سرعت و نتیجتاً بازده زمانی تولید افزایش می‌یابد. یافته‌های پژوهش حاضر در شبیه‌سازی‌های مختلف نشان می‌دهد که بالا رفتن گام به لحاظ پایداری فرآیند شکل‌دهی نیز مفید است. هر چه گام بالاتر رود میزان اعوجاج و چروک به وجود آمده در گنبد شکل داده شده کمتر می‌شود. این نتیجه از آزمایش مقدار گام‌هایی در بازه‌ی 1 mm/rev تا 7.5 mm/rev به دست آمده است. شکل (۱۰) حاصل این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

۳-۲-۳- ضریب بزرگ‌نمایی جرم

این ضریب غیر از بالا بردن سرعت، بر یکنواختی گنبد و میزان اعوجاج آن تأثیر دارد. افزایش این ضریب باعث افزایش اعوجاج و چروک در گنبد می‌شود. با دقت در چروک‌های ایجاد شده بر اثر بالا رفتن نرخ کرنش در شکل (۱۱) مطلب فوق تأیید می‌گردد.



شکل ۱۱: توزیع مقدار جابجایی در شکل حاصل از گذر پنجم، الف- ضریب بزرگ‌نمایی جرم ۲۰، ب- ضریب بزرگ‌نمایی جرم ۱۰، یکنواختی بیشتر جابجایی و چروک کمتر در شکل (ب) مشاهده می‌شود



شکل ۱۲: مکان هندسی برداشت نتایج، خط ضخیم مسیری را که کرنش‌ها مختلف روی آن خوانده شده‌اند، نشان می‌دهد

۳-۲-۴- فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک

بدیهی است که اولین تماس بین لوله و غلتک در گذر اول اتفاق می‌افتد. انتخاب مقادیر مختلف برای این پارامتر می‌تواند کرنش‌های مختلفی را در لوله ایجاد کند. کرنش‌های محیطی، طولی و در راستای ضخامت حاصله از گذر اول، به ازای مقادیر مختلف پارامتر مذکور، روی گره‌هایی^۱ واقع در طول سطح مقطع لوله و در جدار داخلی آن به دست آمده‌اند. این گره‌ها تشکیل مسیری را می‌دهند که بخشی از آن در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود.

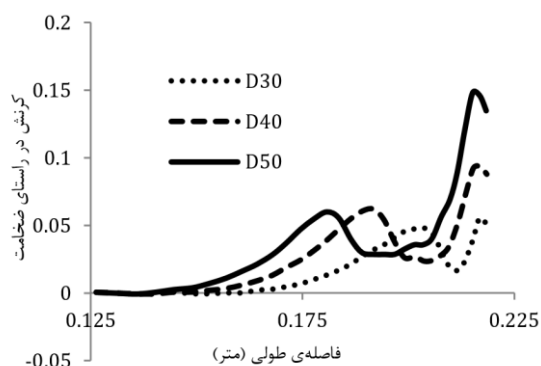
^۱ Nodes

۳- قدر مطلق کرنش در همه‌ی نواحی با افزایش فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک افزایش می‌یابد.

۴- با افزایش فاصله‌ی مذکور قسمت‌هایی که دارای کرنش مثبت هستند، گسترش پیدا می‌کنند.

۵- کرنش محیطی در نواحی نزدیک به سر آزاد لوله در فاصله‌ای که با تغییر فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک، تغییر چندانی نمی‌کند، دارای یک افت موضعی است و بعد از آن کرنش تقریباً با همان روند قبلی افزایش می‌یابد. این ناحیه در مقاله‌ی ذوقی و همکاران [۱۰] نیز مورد توجه بوده است.

تطابق روند کلی منحنی‌های به دست آمده در پژوهش حاضر با منحنی‌های حاصل از پژوهش ذوقی و همکاران نکته‌ی قابل توجه دیگری در این زمینه است. منحنی‌های حاصل از کار این پژوهشگران در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود.



شکل ۱۶: کرنش در راستای ضخامت در جدار داخلی به ازای فاصله‌های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متری نقطه‌ی آغاز تماس غلتک با لوله در پژوهش ذوقی و همکاران [۹]

با توجه به منحنی‌های آمده در شکل (۱۷) می‌توان دریافت: ۱- کرنش در راستای ضخامت در جدار داخلی، در مقادیر مختلف فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک به جز نواحی‌ای که قدر مطلق مقادیر در آن‌ها بسیار کم است، مثبت و در نتیجه کششی می‌باشد.

۲- روند کلی با افزایش فاصله‌ی مذکور تغییر نکرده است.

۳- مقدار کرنش با وجود افت و خیز مشاهده شده، با افزایش فاصله در همه‌ی نقاط نزدیک به سر آزاد افزایش می‌یابد.

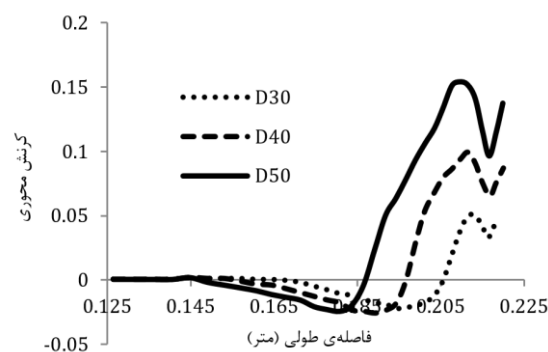
۴- فاصله‌ی نقطه‌ای که در آن حداکثر کرنش در راستای ضخامت مشاهده می‌شود، از سر آزاد با تغییر فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک تغییر چندانی نمی‌کند.

منحنی‌های کرنش در راستای ضخامت نشان داده شده در

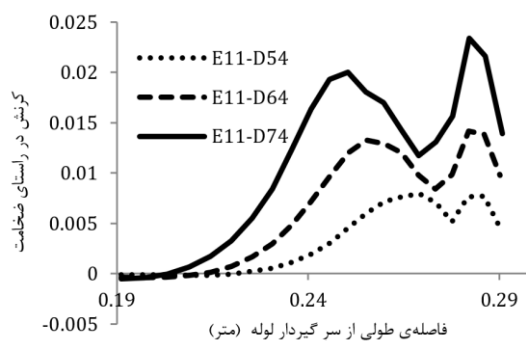
فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک منفی و در نتیجه فشاری است.

۲- مقدار قدر مطلق کرنش محیطی با نزدیک شدن به سر آزاد لوله افزایش می‌یابد. این افزایش باعث می‌شود که همان‌هایی که در حالات قبل دارای کرنش‌های تقریباً صفر هستند، کرنش‌های قابل توجهی پیدا کنند.

۳- افزایش فاصله‌ی اولین تماس غلتک با لوله تغییر قابل توجهی در روند کلی افزایش مذکور در بند ۲ ایجاد نمی‌کند.



شکل ۱۶: کرنش محوری در جدار داخلی به ازای فاصله‌های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متری نقطه‌ی آغاز تماس غلتک با لوله در پژوهش ذوقی و همکاران [۹]



شکل ۱۷: کرنش در راستای ضخامت در جدار داخلی به ازای فاصله‌های ۵۴، ۶۴ و ۷۴ میلی‌متری نقطه‌ی آغاز تماس غلتک با لوله

نکته‌ی قابل توجه دیگر در این زمینه تطابق روند منحنی‌ها با منحنی‌های آمده در شکل (۱۴) است.

با توجه به منحنی‌های آمده در شکل (۱۵) می‌توان دریافت:

۱- روند کلی توزیع کرنش محوری به ازای مقادیر مختلف پارامتر مورد بررسی تغییر قابل توجهی ندارد.

۲- کرنش محوری در جدار داخلی، در مقادیر مختلف فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک علامت یکسانی ندارد. به عبارت دیگر، کرنش در قسمتی فشاری و در قسمت دیگر کششی است.

کششی است. همچنین قدر مطلق این کرنش در همه‌ی نواحی با افزایش فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش فاصله‌ی مذکور قسمت‌هایی که دارای کرنش محوری مثبت هستند، گسترش پیدا می‌کنند.

۴- کرنش در راستای ضخامت در جدار داخلی، در مقادیر مختلف فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک به جز نواحی‌ای که قدر مطلق مقادیر در آن‌ها بسیار کم است، مثبت و در نتیجه کششی می‌باشد.

۵- مقدار کرنش در راستای ضخامت با وجود افت و خیز مشاهده شده، با افزایش فاصله در همه‌ی نقاط نزدیک به سر آزاد لوله افزایش می‌یابد.

۶- بین نمودارهای به دست آمده در مقادیر مختلف فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک و نمودارهای به دست آمده در یکی از پژوهش‌های قبلی، شباهت زیادی دیده می‌شود.

شکل (۱۷) با وجود شباهت روند کلی با منحنی‌های آمده در شکل (۱۸)، با این نمودارها دارای اختلاف نیز هستند. در پژوهش ذوقی و همکاران نمودارها یکدیگر را قطع می‌کنند. به عبارت دیگر در قسمت‌هایی با وجود افزایش فاصله‌ی غلتک از سر آزاد، کرنش به وجود آمده کمتر شده است.

۴- نتیجه‌گیری

همان‌طور که در قسمت‌های قبل ذکر شد، در مورد گنبدی کردن انتهای لوله با روش حرکت از سر گیردار به سمت سر آزاد یا پژوهشی صورت نگرفته است یا نتایج پژوهش‌های انجام شده در دسترس نیستند. با وجود چنین نقصانی و همچنین با توجه به اهمیت و منافعی که بر استفاده از مخازن تحت فشار آلومینیومی مترتب است، دستیابی به مقدار مناسب پارامترهای مختلف که بتواند شبیه‌سازی را با پایداری کافی به پایان برساند خود دستاوردی برای پژوهش حاضر است. به عبارت دیگر با توجه شبیه‌سازی‌های متعدد انجام گرفته جهت دستیابی به مقادیر پارامترها و همچنین استفاده از تجربیات قبلی، مقادیر انتخاب شده از جمله نتایج و دستاوردهای پژوهش حاضر هستند. در مواردی، فعالیت‌های مشابه این روند (انجام شبیه‌سازی‌های متعدد و رسیدن به مقدار بهینه) مبنای نگارش مقالات قرار گرفته‌اند [۴] و [۶].

اثر پارامترهای سرعت دوران غلتک، گام غلتک و ضریب بزرگنمایی جرم مورد قرار گرفته‌اند. سرعت دوران و گام غلتک (در محدوده‌ی آزمایش شده) با پایداری فرآیند رابطه‌ی مستقیم دارد. افزایش ضریب بزرگنمایی جرم نیز باعث افزایش چروک‌های به وجود آمده در شبیه‌سازی می‌شود.

پارامتر دیگر مورد بررسی «فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک» است. از بررسی نمودارهای کرنش حاصل از مقادیر مختلف این پارامتر نتایج متعددی حاصل می‌شود که اصلی‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

۱- کرنش محیطی در جدار داخلی، در مقادیر مختلف فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک منفی و در نتیجه فشاری است و قدر مطلق آن افزایش می‌یابد.

۲- کرنش محوری در جدار داخلی، در مقادیر مختلف فاصله‌ی نقطه‌ی آغاز تماس غلتک علامت یکسانی ندارد. به عبارت دیگر، کرنش در قسمتی فشاری و در قسمت دیگر

۵- مراجع

- [1] S. Yoshihara, B. Mac Donald, T. Hasegawa, M. Kawahara, and H. Yamamoto, "Design improvement of spin forming of magnesium alloy tubes using finite element", *Journal of materials processing technology*, Vol. 153-154, 2004, pp. 816-820.
- [2] N. Akkus and M. Kawahara, "An experimental and analytical study on dome forming of seamless Al tube by spinning process", *Journal of materials processing technology*, Vol. 173, Issue 2, 2006, pp. 145-150.
- [3] H. Lexian and B. Dariani, "An analytical contact model for finite element analysis of tube spinning process", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 222, No. 11, 2008, pp. 1375-1385.
- [4] H. Hoshyar, M. Tajdari and H. Lexian, "Effect of roller nose radius on the forming quality of a hot-spinning process using a non-linear finite element shell analysis", *Eleventh Conference of Iran Manufacturing Engineering, University of Tabriz*, 2010. (In Persian)
- [5] H. Lexian, B. Dariani, M. Zarepoor, M. Zeinali and A. Hajali, "effect of angle and nose radius of the roller on quality of forming in tube spinning process using a nonlinear FEM code", *eighth conference of Iran Society of Aerospace, Malek ashtar University*, 2009. (In Persian)
- [6] H. Lexian and B. Dariani, "Effect of roller nose radius and release angle on the forming quality of a hot-spinning process using a non-linear finite element shell analysis", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 223, No. 6, 2009, pp. 713-722.
- [7] C.-C. Huang, J.-C. Hung, C. Hung, and C.-R. Lin, "Finite element analysis on neck-spinning process of tube at elevated temperature", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, Issue 9-12, 2011, pp. 1039-1048.
- [8] H. Zoghi, A. F. Arezoodar, and M. Sayeafabi, "Enhanced finite element analysis of material deformation and strain distribution in spinning of 42CrMo steel tubes at elevated temperature", *Materials & Design*, Vol. 47, 2013, pp. 234-242.
- [9] H. Zoghi, A. F. Arezoodar, and M. Sayeafabi, "Effect of feed and roller contact start point on strain and residual stress distribution in dome forming of steel tube by spinning at an elevated temperature", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 226, 2012, pp. 1880-1890.
- [10] H. Zoghi and A. F. Arezoodar, "Finite element study of stress and strain state during hot tube necking process", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 227, No. 4, 2013, pp. 551-564.
- [11] J. R. Davis, *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials vol. 2: Asm Intl*, 1990.
- [12] M. Sedighi and M. Rasti, "An investigation on manufacturing process parameters of CNG pressure vessels", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, Issue 9-10, 2008, pp. 958-964.
- [13] S. Mahabunphachai and M. Koç, "Investigations on forming of aluminum 5052 and 6061 sheet alloys at warm temperatures", *Materials & Design*, Vol. 31, Issue 5, 2010, pp. 2422-2434.
- [14] E. Quigley and J. Monaghan, "Enhanced finite element models of metal spinning", *Journal of materials processing technology*, Vol. 121, Issue 1, 2002, pp. 43-49.