

## مروری بر نقش پارامترهای موثر بر خمکاری کششی دورانی لوله

محمد آریایی<sup>۱</sup> و \*، علی باستانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان

<sup>۲</sup> دانشیار و عضو هیئت علمی مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان

\*مسئول مکاتبات: mohammadaryayi@gmail.com

### چکیده

### واژگان کلیدی

خمکاری کششی دورانی  
خمکاری لوله  
شکل‌دهی فلزات

### تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۱/۲۵

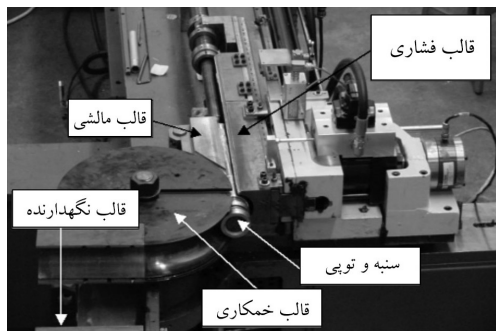
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

فرآیند خمکاری لوله‌ها در صنایع کاربرد فراوانی دارد و با پیشرفت‌های اخیر و لزوم استفاده از تجهیزات مستحکم و کم وزن، پژوهش‌های بسیاری در مورد انواع روش‌های خمکاری لوله‌ها توسط محققین انجام شده است. خمکاری کششی دورانی<sup>۱</sup> یکی از متداول‌ترین روش خمکاری لوله‌هاست. در این فرآیند با استفاده از مجموعه‌ای از قالب‌ها، لوله به قالب خمکاری فشرده شده و با حرکت دورانی آن و ایجاد کشش ناشی از نیروهای تماسی بین قالب‌ها، خم می‌شود. هدف این مقاله مرور تحقیقات اخیر در مورد روش فوق و پارامترهای موثر بر آن است. از بین این پارامترها می‌توان به مشخصات هندسی و مکانیکی لوله، ضریب اصطکاک و لقی بین سطوح لوله و قالب‌ها اشاره کرد که هرکدام تاثیر متفاوتی بر کیفیت و احتمال بروز عیوب در لوله دارند و نیازمند بررسی جداگانه هستند و با شناخت نحوه اثرگذاری آن‌ها و با یک طراحی مناسب براساس آن می‌توان لوله را با کیفیتی مطلوب، خم نمود.

### ۱ مقدمه

در این فرآیند با استفاده از مجموعه‌ای از قالب‌ها، لوله به قالب خمکاری<sup>۲</sup> فشرده شده و با حرکت دورانی آن و ایجاد کشش ناشی از نیروهای تماسی بین قالب‌ها، خم می‌شود [۵]. در شکل ۲ قالب‌های مورد استفاده در فرآیند نشان داده شده است.

افزایش روز افزون نیاز صنایع پیشرفته‌ای مانند هوانوردی، اتومبیل‌سازی، مهندسی پزشکی (شکل ۱) و ... به لوله‌های خم شده مستحکم هم از نظر ماده و هم از نظر ساختار و در عین حال کم وزن، باعث علاقه و توجه محققان بسیاری به این زمینه از دانش شکل‌دهی فلزات شده و ابداع و تحلیل روش‌های مختلف خمکاری لوله‌ها را از دهه‌های گذشته تاکنون به دنبال داشته است. در سال‌های اخیر، روش خمکاری کششی دورانی، یکی از پیشرفته‌ترین فرآیندهای خم کردن لوله‌های جدار نازک محسوب شده که با کنترل پارامترهای موثر بر آن می‌توان به شعاع‌های خمکاری کوچک دست یافت [۱]. هزینه نسبتاً کم و دقت زیاد و در عین حال سرعت بالای شکل‌دهی از عوامل محبوبیت این فرآیند می‌باشد. همچنین امروزه، تحقیقاتی بر روی استفاده از این فرآیند به عنوان فرآیند پیش‌فرم‌دهی قبل از هیدروفرمینگ لوله به منظور دستیابی به محصولی با ویژگی‌های دلخواه، انجام شده است [۲، ۳].



شکل ۲: قالب‌های فرآیند خمکاری کششی دورانی لوله [۷]

قالب خمکاری، الگویی از شکل خمکاری است که شعاع خمکاری را تعیین کرده و شیپ‌آن وظیفه نگهداری بخش داخلی لوله را بر عهده دارد. قالب نگهدارنده<sup>۴</sup> با اعمال نیروی فشاری، لوله را مقید می‌سازد و نیروی مورد نیاز برای خمکاری را تضمین می‌کند. قالب فشاری<sup>۵</sup> از نیمه دیگر لوله محافظت کرده و معمولاً با حرکت مستقیم خود در مسیر خمکاری به کشیده شدن لوله کمک می‌کند. قالب مالشی<sup>۶</sup> معمولاً برای نگهداری لوله در سمت مقابل



شکل ۱: لوله فلزی خم شده مورد استفاده در تراکئوستومی<sup>۲</sup> که جنس و کیفیت سطح آن بسیار حائز اهمیت است [۴]

<sup>۱</sup>Rotary Draw Bending

<sup>۳</sup>Bending die

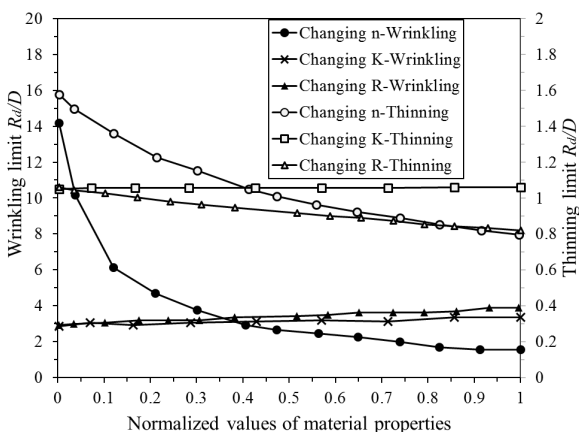
<sup>۴</sup>Clamp die

<sup>۵</sup>Pressure die

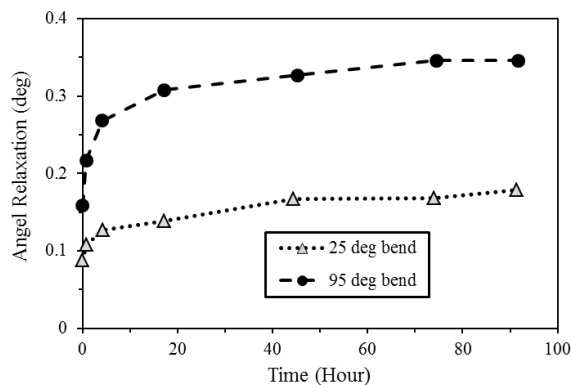
<sup>۶</sup>Wiper die

<sup>۲</sup> تراکئوستومی (Tracheotomy) نام عملی در پزشکی، جهت باز کردن یک راه هوایی در نای بیمار است.

مقایسه مدل‌های اجزاء محدود خمکاری کششی دورانی بین لوله‌هایی از جنس آلومینیوم 5250-O و فولاد 1Cr18Ni9Ti نشان دهنده عملکرد بهتر فولاد در مقابل چروکیدگی و نازک‌شدگی لوله و عملکردی ضعیف‌تر در مقابل اعوجاج سطح مقطع است [۱۰]. با پیشرفت مدل‌های اجزاء محدود در سال‌های اخیر مشخص شد که افزایش تنش تسلیم و ضریب استحکام و کاهش توان کرنش سختی و مدول یانگ ماده، باعث افزایش اعوجاج سطح مقطع لوله‌هایی با سطح مقطع مستطیلی خواهد شد [۱۱]. همچنین مطابق انتظار، نتایج حاکی از تاثیر قابل توجه مدول یانگ، تنش تسلیم، توان کرنش سختی و ضریب استحکام ماده روی میزان بازگشت فنری است. در لوله‌های تیتانیومی، در مقایسه با لوله‌های فولادی و آلومینیومی، بازگشت فنری بیشتری مشاهده شده است [۱۲]. مدل اجزاء محدود ژائو و همکارانش برای خمکاری کششی دورانی پروفایل‌های کلاه شکل نیز نشان دهنده افزایش میزان بازگشت فنری با افزایش تنش تسلیم و ضریب استحکام و کاهش توان کرنش سختی و مدول یانگ ماده است [۱۳]. همچنین به دلیل تغییر شکل پلاستیک بسیار ماده در طی خمکاری، تنش پسماند زیادی در لوله باقی می‌ماند که می‌تواند باعث وارفتگی تنش<sup>۱۰</sup> در لوله و کاهش زاویه خمکاری شود. شکل ۵ میزان تغییر زاویه خمکاری طی زمان برای یک لوله از جنس تیتانیوم را نشان می‌دهد که در صورت عدم توجه طراح به آن در هنگام طراحی، باعث بر هم خوردن تلورانس قطعات خواهد شد [۱۴].

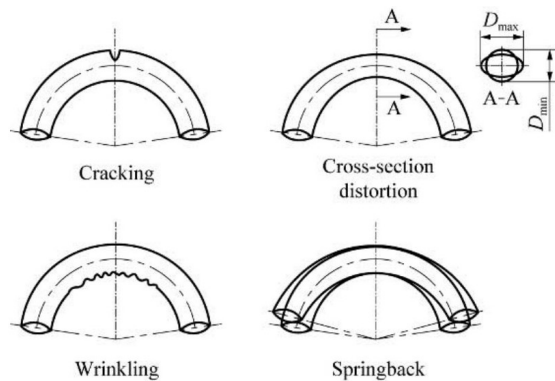


شکل ۳: تاثیر ضریب استحکام (K)، توان کرنش سختی (n) و ضریب ناهمسانگردی (R) روی مقدار حداقلی نسبت شعاع خمکاری به قطر به محدوده مجاز نازک‌شدگی و چروکیدگی لوله [۱۰]



شکل ۴: کاهش زاویه خمکاری ناشی از وارفتگی تنش در لوله تیتانیومی در طی زمان [۱۴]

قالب فشاری مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵] و در بعضی مواقع، عدم استفاده از آن می‌تواند باعث بروز عیوبی از جمله چروکیدگی<sup>۱</sup> در لوله گردد. جهت محافظت از بخش داخلی لوله و عدم تغییر شکل سطح مقطع طی خمکاری، سنبه<sup>۲</sup> (با توپی یا بدون آن) مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته برای این کار می‌توان لوله را با شن یا سیال پر کرد که این کار باعث کاهش دقت خمکاری می‌شود [۶]. استفاده از نیروی تغذیه در بخش انتهایی لوله هم برای ایجاد حرکت بهتر جریان ماده در برخی موارد متداول است. فرآیند خمکاری کششی دورانی تحت تاثیر عوامل متعددی است و با درست انتخاب نکردن این پارامترها، عیوب مختلفی مثل چروکیدگی و افزایش ضخامت<sup>۳</sup> لایه داخلی لوله<sup>۴</sup>، کاهش ضخامت و پارگی<sup>۵</sup> در لایه خارجی<sup>۶</sup>، تغییر سطح مقطع<sup>۷</sup> و بازگشت فنری<sup>۸</sup> در لوله به وجود می‌آید (شکل ۳). به همین دلیل تحقیقات زیادی روی معیار انتخاب این پارامترها به منظور پیش‌بینی دقیق وقوع عیوب قبل از ساخت دستگاه انجام شده است. مطالعه حاضر، تحقیقات انجام شده در مورد مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر بروز عیوب در لوله را مرور خواهد کرد.



شکل ۳: عیوب متداول در فرآیند خمکاری کششی دورانی لوله [۸]

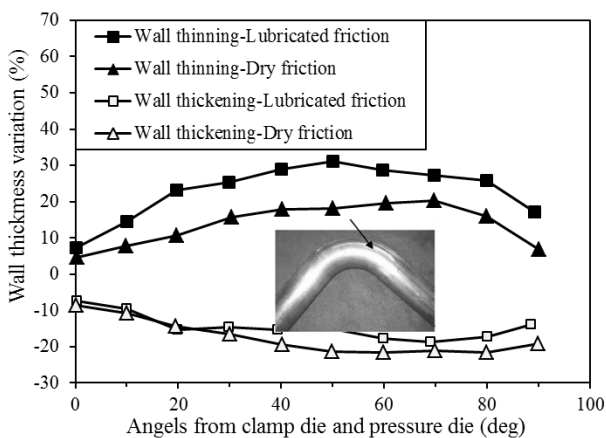
## ۲ تاثیر جنس ماده

نیاز به استفاده از موادی با خواصی ویژه، مثل حفظ استحکام در درجه حرارت‌های بالا و یا استفاده از لوله‌های چند لایه، باعث توجه محققین به تاثیر جنس لوله بر فرآیند خمکاری شده است. یانگ و لین در سال ۲۰۰۴ با ارائه یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی چروک و حداقل شعاع قابل دستیابی، به بررسی نقش توان کرنش سختی و ضریب استحکام پرداختند و بر اساس مدل خود نتیجه گرفتند که با افزایش توان کرنش سختی، می‌توان به شعاع‌های خمکاری کوچکتری دست یافت و افزایش ضریب استحکام باعث افزایش حداقل شعاع خمکاری قابل دستیابی خواهد شد [۹]. با ادامه تحقیقات تحلیلی، با استفاده از تئوری‌های پلاستیسته و حداقل انرژی، نشان داده شد که افزایش توان کرنش سختی باعث بهبود قابل توجهی در کاهش محدودیت چروکیدگی لوله می‌شود و در عین حال نازک‌شدگی لوله را کاهش می‌دهد (شکل ۴)، اما اعوجاج سطح مقطع<sup>۹</sup> افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش ضریب استحکام ماده سازنده لوله، احتمال چروکیدگی لوله را کمی افزایش داده و تاثیر چندانی روی نازک‌شدگی لوله ندارد (شکل ۴)، با این حال باعث کاهش اعوجاج سطح مقطع می‌گردد. همچنین نتایج تحلیل حاکی از افزایش اعوجاج سطح مقطع با افزایش تنش تسلیم و کاهش نازک‌شدگی با افزایش ضریب ناهمسانگردی فلز است [۱۰].

<sup>1</sup>Wrinkling <sup>2</sup>Mandrel <sup>3</sup>Thickening <sup>4</sup>Intrados <sup>5</sup>Thinning and crack <sup>6</sup>Extrados <sup>7</sup>Cross-section deformation <sup>8</sup>Springback <sup>9</sup>Ovalization <sup>10</sup>Relaxation

فشاری و لوله این است که ضریب اصطکاک نباید از محدوده ۰/۳۵ - ۰/۴۵ تجاوز کند و اصطکاک بسیار زیاد باعث خراشیده شدن سطح خارجی لوله طی خمکاری خواهد شد [۱۶].

با افزایش ضریب اصطکاک سطح قالب خمشی و لوله، اعوجاج سطح مقطع و نازک‌شدگی لوله به دلیل کاهش تنش مماسی کاهش می‌یابد که تاثیر این کاهش در اعوجاج سطح مقطع بیشتر قابل توجه است [۱۶، ۱۸]. درباره‌ی تاثیر ضریب اصطکاک سطح قالب خمشی روی چروکیدگی، با توجه به ماهیت این عیب، که قابلیت اندازه‌گیری مستقیم، مانند نازک‌شدگی و اعوجاج سطح مقطع را ندارد و معیارهای مختلفی برای تعیین آن وجود دارد، نتایج مختلفی از سوی محققین ارائه شده‌است. یانگ هه و همکارانش در سال ۲۰۰۹ با در نظر گرفتن معیار انرژی برای پیش بینی چروک و با استفاده از مدل اجزاء محدود خود نتیجه گرفتند که کاهش ضریب اصطکاک، به ویژه در نسبت قطر به ضخامت بزرگ‌تر از ۷۰ در لوله‌های آلومینیومی، احتمال چروک خوردگی لوله را تشدید می‌کند و آن را ناشی از افزایش تنش فشاری مماسی در بخش مستعد چروک خوردگی لوله دانستند [۱۷]. در سال ۲۰۱۰ گروه دیگری از محققین با بررسی نتایج خود در شرایط اصطکاکی مختلف، چروکیدگی را در لوله مشاهده نکردند ولی توضیح دادند که به خاطر ماهیت فرآیند خمکاری کششی دورانی که در آن، لوله با کشیده شدن از روی نقطه مماسی (نقطه تلاقی قالب مالشی و قالب خمکاری که محل شروع خمکاری لوله است) تغییر شکل پیدا کرده و در شیار قالب خمکاری قرار می‌گیرد، چنانچه اصطکاک بین لوله و قالب خمکاری زیاد باشد سبب کشیده شدن زیاد و جلوگیری از تغییر شکل فشاری پایدار در لایه داخلی می‌شود و این ناپایداری باعث ایجاد تفاوت در تنش‌های مماسی می‌گردد که می‌تواند عامل چروکیدگی لوله در حضور عوامل مستعد دیگر باشد. همچنین با افزایش ضریب اصطکاک، نیروی عکس‌العمل وارد بر قالب خمکاری کاهش می‌یابد که عامل کاهش احتمال چروک در نزدیکی قالب نگهدارنده است [۱۶]. همچنین طبق مدل ارائه شده از سوی لی و همکارانش در سال ۲۰۱۴، افزایش ضریب اصطکاک تاثیر قابل توجهی روی چروکیدگی لوله ندارد [۱۰].



شکل ۶: تاثیر اصطکاک بین لوله و قالب فشاری بر نازک‌شدگی لایه خارجی و ضخیم‌شدگی لایه داخلی لوله آلومینیومی [۱۶]

دلیل استفاده از قالب مالشی، صرف نظر از نگهداری بخش داخلی لوله، جلوگیری از چروک خوردن آن است زیرا تنش اصطکاکی ناشی از این قالب،

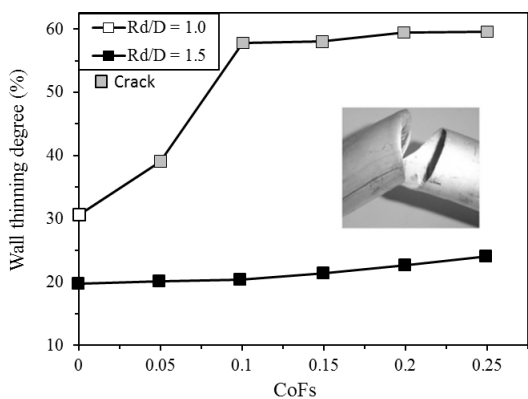
از آنجا که معمولاً لوله یا ورق تشکیل‌دهنده آن، برای شکل‌گیری، از یک فرآیند نورد می‌گذرند و بدون انجام عملیات حرارتی در خمکاری مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای ناهمسانگردی هستند که روی عیوب لوله از جمله چروکیدگی، اعوجاج سطح مقطع و نازک‌شدگی اثرگذار است [۱۵، ۱۱، ۱۰]. اثرات ناهمسانگردی در خمکاری لوله‌های آلومینیومی باعث کاهش چروکیدگی لوله شده‌است [۱۵].

### ۳ تاثیر اصطکاک بین قالب‌ها و لوله

در این روش خمکاری، لوله با قالب‌های خمکاری، فشاری، نگهدارنده و مالشی مقید شده‌است و در نتیجه شرایط تماسی در آن بسیار حائز اهمیت خواهد بود [۱۶]. از آنجا که ناحیه تماس و حرکت لوله نسبت به هر کدام از قالب‌ها متفاوت است، شرایط اصطکاکی بین سطوح تماسی برای هر قالب باید جداگانه بررسی شود. برای یک خمکاری پایدار، لوله نباید نسبت به قالب نگهدارنده حرکت کند و در صورت عقب ماندن لوله از حرکت قالب نگهدارنده، احتمال چروک خوردگی بسیار افزایش می‌یابد. بنابراین در تمامی تحلیل‌ها، اصطکاک بین این سطوح بصورت خشک و با ضریب اصطکاک بسیار بالا مدل می‌شود. از طرفی به خاطر رفتار بسیار غیر خطی فرآیند، تعیین نیروهای اصطکاکی بین سطوح دیگر در حین شکل‌دهی کاری دشوار است و نیاز به ساده‌سازی‌های بسیاری داشته که از دقت نتایج خواهد کاست. به همین دلیل نتایج بدست‌آمده از سوی محققین بر شبیه‌سازی‌های عددی و اجزاء محدود، که با کمک آن می‌توان نتایج قابل ارائه بیشتری را عرضه کرد، استوار است.

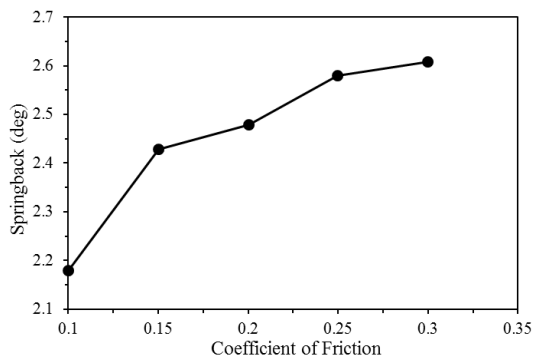
افزایش ضریب اصطکاک در سطح بین قالب فشاری و لوله باعث اندکی افزایش در احتمال چروکیدگی لوله خواهد شد، زیرا که با افزایش اصطکاک، گشتاور خمکاری موثر اعمالی بر لوله افزایش یافته و سبب افزایش تنش فشاری مماسی در ناحیه مستعد چروکیدگی خواهد شد [۱۶، ۱۷]. اما از طرفی افزایش ضریب اصطکاک سطح قالب فشاری باعث کاهش نیروی عکس‌العملی قالب خمکاری شده که کاهش لغزش نسبی بین لوله و قالب نگهدارنده را به دنبال خواهد داشت و بنابراین احتمال چروکیدگی لوله در نزدیکی قالب نگهدارنده کاهش می‌یابد [۱۶]. همچنین با افزایش اصطکاک بین قالب فشاری و لوله، اعوجاج و نازک‌شدگی لوله (شکل ۶) به طور محسوسی کاهش می‌یابد؛ زیرا نیروی اصطکاک بیشتر، تنش کششی لایه خارجی لوله را کاهش می‌دهد و باعث حرکت ماده بیشتری به ناحیه خمکاری پلاستیک می‌شود [۱۰، ۱۶، ۱۸]. نتایج تجربی روی لوله‌ای از جنس A15250-O نشان می‌دهد که روانکاری سطح قالب فشاری سبب نازک‌شدگی و اعوجاج بسیار زیاد لوله و حتی پارگی آن می‌گردد اما در شرایطی با اصطکاک خشک، خمکاری بدون بروز عیبی انجام می‌شود. همچنین با افزایش ضریب اصطکاک و بهبود نقش رانشی قالب فشاری، جابجایی لوله نسبت به قالب مالشی افزایش می‌یابد و ماده بیشتری تحت تغییر شکل خمشی قرار می‌گیرد که این می‌تواند دلیل افزایش ضخامت در لایه داخلی لوله که در شکل ۶ نشان داده شده‌است باشد و این خود باعث افزایش احتمال چروکیدگی، در نزدیکی قالب مالشی است. نکته مهم در افزایش ضریب اصطکاک سطح قالب

مطابق نتایج بدست آمده، رفتار اصطکاکی بین سطح سنبه و توییها با سطح داخلی لوله مشابه رفتار قالب مالشی است و با افزایش ضریب اصطکاک بین این سطوح تمایل به چروک خوردگی در ناحیه نزدیک نقطه مماسی کاهش می یابد اما به خاطر افزایش نیروی مقاوم در برابر حرکت لوله، امکان چروک خوردگی در نزدیکی قالب نگهدارنده بسیار زیاد می شود و همچنین با افزایش ضریب اصطکاک، ضخیم شدگی لوله کاهش یافته، نازک شدگی و اعوجاج سطح مقطع افزایش می یابد [۱۰، ۱۶-۱۸] و در صورت بحرانی بودن سایر پارامترهای موثر بر لوله، امکان پارگی و اعوجاج بیش از حد لوله وجود دارد. برای مثال مطابق شکل ۹ تاثیر ضریب اصطکاک بین سطح سنبه و لوله در نسبت های خمکاری ۱ و ۱/۵ روی نازک شدگی لوله آلومینیومی مشاهده می شود و همانطور که دیده می شود در نسبت خمکاری ۱ با ضریب اصطکاک بیش از ۰/۰۵ لوله پاره شده است [۱۶].



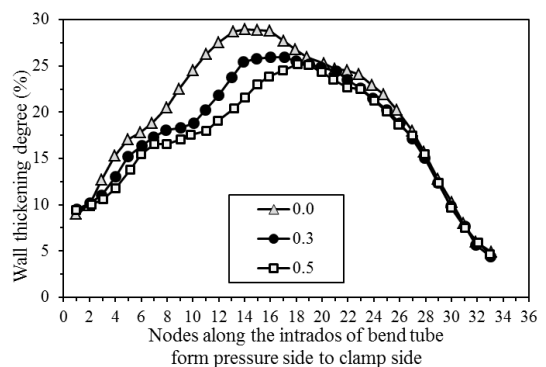
شکل ۹: تاثیر ضریب اصطکاک سطح سنبه بر نازک شدگی لوله [۱۶]

گولر و همکارانش، که در سال ۲۰۱۲ به بررسی میزان بازگشت فنری لوله پس از خمکاری پرداختند، دریافتند که با افزایش میزان اصطکاک بین قالبها و لوله، میزان بازگشت فنری لوله ای از جنس فولاد A573-81 65 افزایش می یابد (شکل ۱۰) [۲۱]. پیش از آنها در سال ۱۹۹۴ ولو و همکارانش مدعی شده بودند که نیروی اصطکاک قالب مالشی در خمکاری کششی دورانی پروفیل آلومینیومی، با ایجاد تنش کششی در سطح لوله، باعث کاهش بازگشت فنری آن می شود [۱۹]. با این حال در سال ۲۰۱۲ عده دیگری از محققین با استفاده از مدل اجزاء محدود خود تاثیر افزایش ضریب اصطکاک قالب مالشی روی بازگشت فنری لوله مستطیلی برنجی H96 را ناچیز ارزیابی کردند [۲۰].

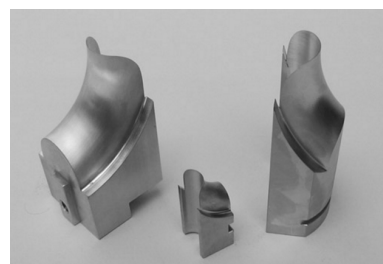


شکل ۱۰: تاثیر ضریب اصطکاک سطوح بر بازگشت فنری [۲۱]

باعث افزایش مقاومت به کماتش (چروک خوردگی) لوله می شود. پس همانطور که قابل انتظار است، طبق نتایج بررسی های مختلف افزایش ضریب اصطکاک بین سطوح قالب مالشی و لوله باعث افزایش نیروهای کششی وارد بر لوله و کاهش اندازه تنش های فشاری ناشی از خمکاری در لایه داخلی لوله و به دنبال آن کاهش تمایل به چروک خوردگی می شود، در آزمایش های تجربی نیز مشاهده شد که در خمکاری با روانکاری بسیار زیاد قالب مالشی، چروک خوردگی لوله بسیار محتمل است [۱۶، ۱۷، ۱۹] و با توجه به شکل ۷، که حاصل از شبیه سازی اجزاء محدود فرآیند است، می توان نتیجه گرفت که با افزایش ضریب اصطکاک ضخیم شدگی لایه داخلی لوله هم کاهش می یابد که ناشی از ایجاد مانع بیشتر برای حرکت ماده قبل از نقطه مماسی است. همچنین این نیروی مقاوم باعث ایجاد حرکت نسبی بین قالب نگهدارنده و لوله و افزایش نیروی عکس العملی قالب خمکاری می گردد که می تواند باعث چروک خوردگی در نزدیکی قالب نگهدارنده شود. به دنبال این مسائل با افزایش ضریب اصطکاک، به خاطر افزایش تنش کششی در لایه خارجی لوله، نازک شدگی و اعوجاج سطح مقطع لوله افزایش می یابد که تاثیر افزایش اعوجاج سطح مقطع بسیار قابل توجه تر از افزایش نازک شدگی و کاهش چروکیدگی است [۱۶، ۱۸، ۲۰]. توجه به این نکته نیز حائز اهمیت است که لبه های قالب مالشی بسیار نازک هستند که باعث آسیب پذیر بودن این قطعه شده است (شکل ۸) و در طی خمکاری نیروی فشاری بسیاری از جانب لوله بر آن وارد می شود و افزایش ضریب اصطکاک باعث خراشیده شدن سطح و کاهش طول عمر آن خواهد شد [۱۶]. ساخت قالب مالشی از برخی انواع فولاد برای لوله های آلومینیومی و فولاد کم کربن و استفاده از آلیاژهای آلومینیوم برنز برای لوله های فولادی و روانکاری مناسب با ضریب اصطکاک در بازه ۰/۰۵-۰/۱۵ می تواند شرایط تماسی مطلوب، خمکاری پایدار و طول عمر قالب مناسبی را فراهم کند [۵، ۱۶].



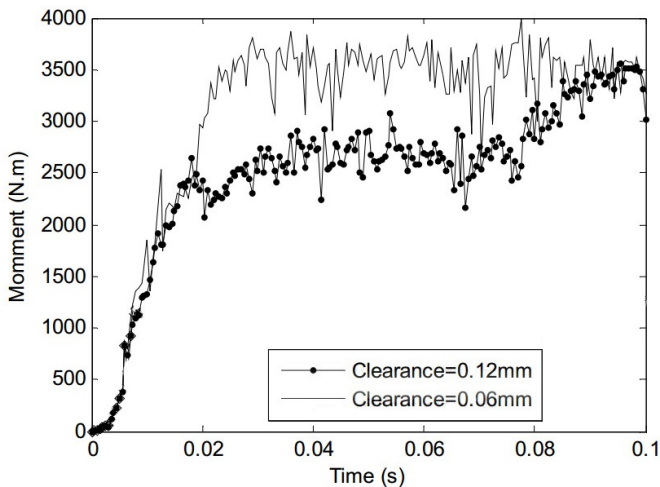
شکل ۷: تاثیر اصطکاک بین سطوح قالب مالشی و لوله بر ضخیم شدگی آلومینیومی [۱۶]



شکل ۸: نمونه ای از قالب های مالشی ساخت شرکت omni-x

صفحه سطح مقطع لوله، افزایش لقی قالب فشاری می‌تواند چروک خوردگی لوله را تشدید کند. همچنین در صورت کافی بودن نیروهای اصطکاکی، با کاهش لقی بین قالب فشاری و لوله، اعوجاج سطح مقطع و نازک‌شدگی کاهش می‌یابد.

افزایش لقی بین قالب خمکاری و لوله تاثیر زیادی روی عیوب لوله ندارد با این حال نازک‌شدگی کمتری در لوله مشاهده می‌شود [۱۷، ۲۲]. همچنین در شکل ۱۲ مقایسه‌ی بین تاثیر دو مقدار مختلف لقی بین سطح سنبه و لوله، بر گشتاور مورد نیاز خمکاری ۱۸۰ درجه لوله‌ی فولادی AISI 304 نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با کاهش لقی، گشتاور خمکاری کاهش می‌یابد [۲۳].



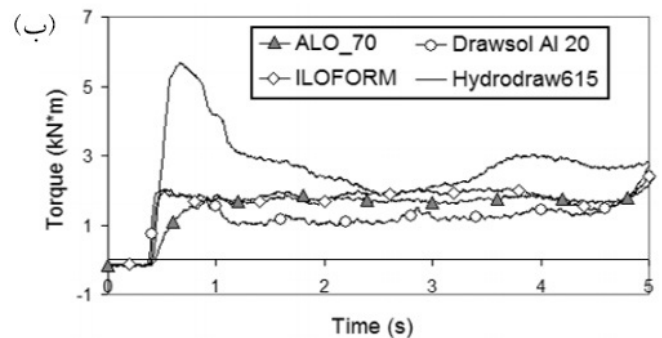
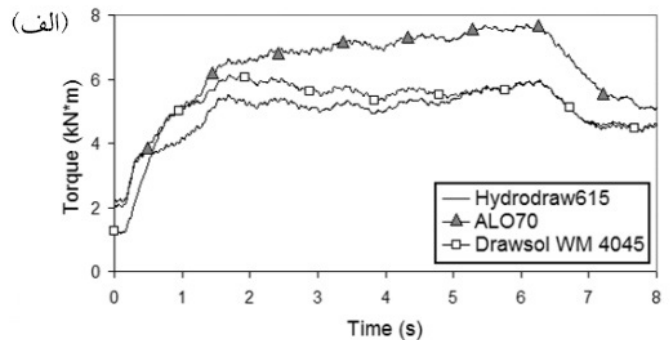
شکل ۱۲: تاثیر لقی بین سنبه و لوله بر گشتاور خمکاری [۲۳]

در سال ۲۰۱۰ یانگ هه به همراه گروه دیگری از دانشجویان و همکارانش، به بررسی تاثیر لقی در لوله‌هایی با سطح مقطع مستطیلی پرداختند.

بر اساس نتایج شبیه سازی آن‌ها از خمکاری یک لوله آلومینیومی، افزایش لقی بین قالب فشاری و لوله باعث افزایش اعوجاج سطح مقطع لوله شده و تاثیر کمی روی چروک خوردگی سطح داخلی لوله دارد. همچنین افزایش لقی بین سطوح قالب مالشی و لوله با کاهش ناچیزی در اعوجاج سطح مقطع همراه است و تاثیر آن روی چروکیدگی لوله هم نامحسوس است. افزایش لقی بین سنبه و لوله باعث ایجاد روند مشخصی در تغییرات سطح مقطع نمی‌شود و مطابق شکل ۱۳، رفتاری افت و خیزی دارد و در مقاطعی باعث افزایش اعوجاج شده و در مقاطعی آن را کاهش می‌دهد. با این حال بیشترین اعوجاج سطح مقطع که در بخش میانی لوله خم شده است با افزایش لقی زیاد می‌شود و تاثیر آن بر روی چروک خوردگی هم مشابه رفتار آن در لوله‌های دایره است که اشاره شد.

تاثیر لقی بین سطح قالب خمشی و لوله روی اعوجاج شبیه قالب فشاری است و با افزایش آن، اعوجاج سطح مقطع افزایش می‌یابد و مطابق انتظار، به دلیل کاهش نیروهای تماسی ناشی از افزایش لقی بین سطح قالب خمشی و لوله، نیروهای کششی وارد بر لایه داخلی لوله کاهش یافته و احتمال چروک خوردگی لوله افزایش می‌یابد [۲۴، ۲۵].

در سال ۲۰۰۴ الویرا و همکارانش مقاله‌ای به منظور انتخاب روانکار مناسب برای خمکاری کششی دورانی لوله منتشر کردند و در آن با آزمایش‌های تجربی تاثیر روانکارهای مختلف روی لوله‌های آلومینیومی AIMg3.5Mn و فولادی DQAK را بررسی کردند. آن‌ها با اندازه‌گیری تغییرات ضخامت، نیروهای عکس‌العملی وارد بر قالب‌ها، مانند آنچه در شکل ۱۱ نشان داده شده است، و بررسی خراشیدگی سطح لوله پیشنهاد دادند که روانکار Hydrodraw 615 برای فولاد و روانکار Drawsol Al 20 برای لوله‌های آلومینیومی انتخاب مناسبی است [۷].

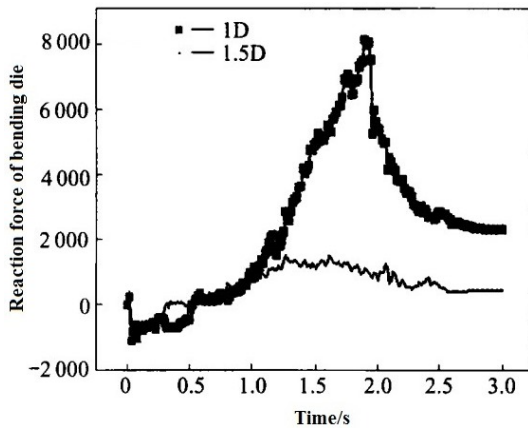


شکل ۱۱: تاثیر روانکار استفاده شده در خمکاری بر گشتاور خمکاری مورد نیاز در قالب خمکاری (الف) لوله آلومینیومی AIMg3.5Mn (ب) لوله فولادی DQAK [۷]

## ۴ تاثیر لقی

لقی بین قالب‌ها از دیگر موارد تاثیر گذار روی بروز عیوب در فرآیند خمکاری کششی دورانی است که مورد توجه محققین قرار گرفته است. یانگ هه و همکارانش با استفاده از روش اجزاء محدود، به بررسی تاثیر لقی در خمکاری لوله‌های دایره‌ای جدار نازک پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش لقی بین قالب مالشی و لوله، تمایل به چروک خوردگی در لوله افزایش می‌یابد ولی اعوجاج سطح مقطع و نازک‌شدگی رفتاری کاهش از خود نشان می‌دهند. تاثیر رفتار لقی بین سنبه و لوله هم مشابه رفتار لقی قالب مالشی است، با این حال کاهش بیش از حد لقی بین سنبه و لوله باعث ایجاد مانعی در برابر حرکت ماده در نقطه تماسی شده و می‌تواند سبب شروع چروک خوردگی لوله گردد. با افزایش لقی قالب فشاری، چروک خوردگی لوله کاهش می‌یابد، زیرا افزایش لقی باعث کاهش گشتاور خمشی وارد بر لوله و کاهش تنش‌های فشاری مماسی در لایه داخلی خواهد شد. البته این رفتار در زمانی که سنبه کاملاً مقید شده باشد مشاهده می‌شود و در صورت نبود قید حرکتی روی سنبه، در

تمایل به چروک خوردگی در لوله، نازک‌شدگی در لایه خارجی و اعوجاج سطح مقطع لوله افزایش می‌یابد [۱۷، ۲۷]. ولی میزان ضخیم‌شدگی لایه داخلی لوله روندی کاهشی خواهدداشت، رفتاری که در لوله‌هایی با سطح مقطع بیضی شکل هم مشاهده شده‌است [۲۷، ۲۹]. مهم‌ترین تاثیر زاویه خمکاری لوله بر میزان بازگشت فنری است و هرچه زاویه خمکاری بیشتر باشد، بازگشت فنری و وارفتگی تنش لوله افزایش می‌یابد [۱۴، ۱۹].

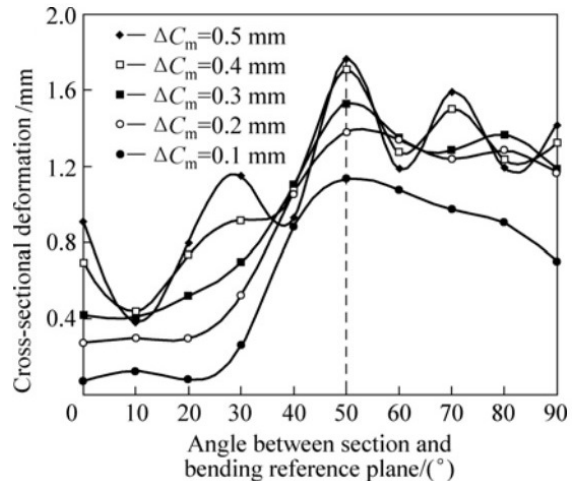


شکل ۱۴: نیروی عکس‌العمل قالب خمکاری در طی زمان، برای شعاع خمکاری برای قطر (D) و یک و نیم برابر قطر (1.5D) [۲۶]

طی سال‌های اخیر و نیاز به ساخت لوله‌هایی جدار نازک با شعاع خمکاری کوچک، باعث ارائه مدل‌هایی برای پیش‌بینی امکان وقوع عیوب در هندسه‌های مختلف لوله شده‌است. دو نمونه از نتایج این مدل‌ها در مراجع [۱۰] و [۲۷] ارائه شده‌است. مشکل اصلی این مطالعات این است که نمی‌توانند تاثیر تمامی پارامترهای موثر بر خمکاری را در نظر بگیرند و صرفاً برای اینکه طراح در تعیین سایر پارامترهای تاثیر گذار، مثل لقی، اصطکاک و انتخاب ماده سازنده لوله، توجه بیشتری به بروز این عیوب کنند ارائه شده‌اند.

## ۶ سایر پارامترهای موثر بر خمکاری لوله

پارامترهای موثر بر خمکاری به موارد توضیح داده شده محدود نمی‌شود. سنبه محافظ بخش داخلی لوله است و شکل و میزان پیشروی آن از نقطه مماسی، تعداد توپ‌های متصل به آن، ضخامت و فاصله بین آن‌ها از عوامل موثر بر عیوب، به ویژه اعوجاج و چروکیدگی لوله است که توسط محققان در سال‌های اخیر بررسی شده‌است [۶، ۱۷، ۲۰، ۲۱، ۲۳، ۳۰]. در بین این تحقیقات، لی هنگ و همکارانش با ارائه مدلی ریاضی و با کمک شبیه‌سازی اجزاء محدود، روشی برای تعیین اندازه و تعداد مناسب سنبه و توپ‌های خمکاری لوله‌های جدار نازک ارائه دادند. از نتایج بررسی‌های آن‌ها می‌توان به این موضوع اشاره کرد که افزایش بیش از حد تعداد توپ‌ها (متناسب با پارامترهای هندسی خمکاری) نه تنها کمک چندانی به جلوگیری از بروز عیوب در لوله نخواهدکرد، بلکه می‌تواند باعث نازک‌شدگی لوله هم شود، همچنین هزینه سنبه و در نتیجه هزینه خمکاری را افزایش خواهدداد [۶]. در ادامه تحقیقات آن‌ها ژو و همکارانش به بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر سنبه پرداختند و با الگوریتم خود، هندسه مناسب سنبه برای خمکاری دو لوله متفاوت آلومینیومی را تعیین کردند [۳۱]. همچنین تأثیر استفاده از فشار



شکل ۱۳: تاثیر لقی بین سنبه و لوله بر اعوجاج لوله مستطیلی آلومینیومی [۲۴]

هنگام طراحی قالب‌های دستگاه خمکاری کششی دورانی باید تاثیر روانکاری بر مقدار لقی را هم مدنظر قرار داد و توجه کرد که استفاده زیاد از روانکار باعث کاهش لقی مفید بین سطوح خواهدشد. از طرفی، به خاطر وجود امکان سرهم‌بندی قالب‌ها بعد از ساخت و یکدست بودن سطح تماس خارجی لوله با قالب‌ها، لقی باید در قالب‌ها یا حداقل در محل اتصال دو قالب به هم یکسان و در مقدار بهینه خود در نظر گرفته شود.

## ۵ تاثیر هندسه لوله

تلاش‌های متعددی برای شناخت تاثیر و اهمیت پارامترهای هندسی لوله انجام شده‌است و بدون شک مهم‌ترین عامل تاثیرگذار بر کیفیت خمکاری، پارامترهای هندسی لوله شامل قطر، ضخامت، زاویه خمکاری و شعاع خمکاری می‌باشد ولی انتخاب این پارامترها در اکثر موارد در اختیار طراح دستگاه خمکاری کششی دورانی نیست و او صرفاً باید بتواند با شناخت تاثیر این پارامترها و کنترل سایر پارامترهای تاثیرگذار، لوله‌ای با مشخصات هندسی خواسته شده و با تolerانس مطلوب را ارائه دهد. تاثیر شعاع خمکاری بر لوله را معمولاً به صورت پارامتری بی‌بعد به صورت نسبت شعاع خمکاری به قطر لوله (نسبت خمکاری) بررسی می‌کنند. هرچه این نسبت کمتر باشد خمکاری لوله سخت‌تر بوده و اعوجاج، نازک‌شدگی لایه خارجی و ضخیم‌شدگی لایه داخلی لوله افزایش یافته و با افزایش تنش مماسی در لایه داخلی لوله و توزیع غیر یکنواخت‌تر آن تمایل به چروک خوردگی در لوله افزایش می‌یابد. شکل ۱۴ میزان نیروی عکس‌العمل قالب خمکاری در شعاع‌های خمکاری برابر با قطر و ۱/۵ برابر قطر طی زمان خمکاری را نشان می‌دهد و مشخص است که با کاهش نسبت خمکاری نیروی عکس‌العملی وارد بر قالب خمکاری افزایش یافته که همانطور که گفته شد می‌تواند باعث چروکیدگی در نزدیکی قالب نگهدارنده شود [۱۰، ۲۶-۲۸].

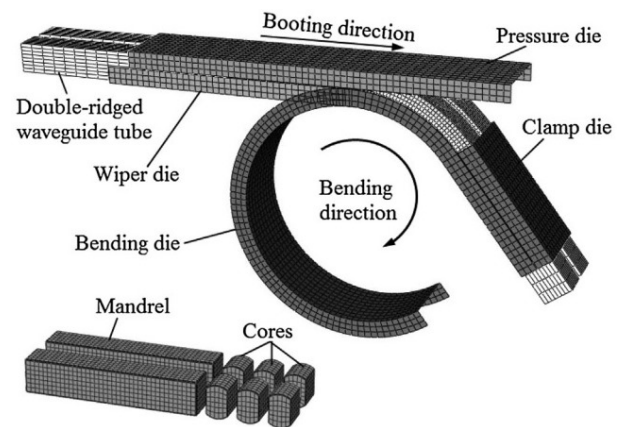
با افزایش شعاع خمکاری به دلیل اینکه ناحیه بیشتری از لوله تحت تغییر شکل الاستیک قرار می‌گیرد، بازگشت فنری لوله بعد از خمکاری افزایش می‌یابد [۱۹، ۲۱]. تاثیر پارامترهای هندسی اولیه لوله هم معمولاً به صورت نسبت قطر به ضخامت بررسی می‌شود و مطابق انتظار با افزایش این نسبت

## مراجع

- [1] He, Y.A.N.G., Heng, L.I., Zhang, Z., Mei, Z.H.A.N., Jing, L.I.U. and Guangjun, L.I., Advances and trends on tube bending forming technologies. Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 25, No. 1, pp.1-12, 2012.
- [2] Trana, K., Finite element simulation of the tube hydroforming process—bending, preforming and hydroforming. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 127, No. 3, pp.401-408, 2002.
- [3] Gao, L. and Strano, M., FEM analysis of tube pre-bending and hydroforming. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 151, No. 1, pp.294-297, 2004.
- [4] Syed, K.A., Paul, R.R., Varghese, A.M. and Joseph, N.A., Emergency ventilation with a Chevalier Jackson's metal tracheostomy tube. International journal of pediatric otorhinolaryngology, Vol. 78, No. 5, pp.888-890, 2014.
- [5] Semiatin, S.L., Marquard, E. and Lampman, H., ASM Handbook,; Metalworking: Sheet Forming, Vol. 14, ASM International, 2006.
- [6] Heng, L., He, Y., Mei, Z., Zhichao, S. and Ruijie, G., Role of mandrel in NC precision bending process of thin-walled tube. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, No. 7, pp.1164-1175, 2007.
- [7] Oliveira, D.A., Worswick, M.J. and GRANTAB, R., Effect of lubricant in mandrel-rotary draw tube bending of steel and aluminum. Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 44, No. 1, pp.71-78, 2005.
- [8] H. Li, Study on Wrinkling behaviors under multi-die constraints in thin-walled tube NC bending, PhD thesis, Northwestern Polytechnical University, Chinese, 2007.
- [9] Yang, H. and Lin, Y., Wrinkling analysis for forming limit of tube bending processes. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125, No. 3, pp.363-369, 2004.
- [10] Li, H., Yang, H., Zhang, Z.Y., Li, G.J., Liu, N. and Welo, T., Multiple instability-constrained tube bending limits. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, No. 2, pp.445-455, 2014.
- [11] Dong, J., Liu, Y. and Yang, H., Research on the sensitivity of material parameters to cross-sectional deformation of thin-walled rectangular tube in rotary draw bending process. Journal of Materials Research, Vol. 31, No. 12, pp.1784-1792, 2014.
- [12] Jiang, Z.Q., Yang, H., Zhan, M., Xu, X.D. and Li, G.J., Coupling effects of material properties and the bending angle on the springback angle of a titanium alloy tube during numerically controlled bending. Materials & Design, Vol. 31, No. 4, pp.2001-2010, 2014.
- [13] Dong, J., Liu, Y. and Yang, H., Research on the sensitivity of material parameters to cross-sectional deformation of thin-walled rectangular tube in rotary draw bending process. Journal of Materials Research, Vol. 31, No. 12, pp.1784-1792, 2016.
- [14] Stelson, K.A., Three-dimensional tube geometry control for rotary draw tube bending. part 1: bend angle and overall tube geometry control. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 123, No. 2, pp.258-265, 2001.

<sup>1</sup>double-ridged waveguide

سیال برای محافظت از بخش داخلی لوله‌ها، مورد بررسی قرار گرفته‌است و مشخص شده که افزایش فشار سیال، باعث کاهش ضخیم‌شدگی و اعوجاج سطح مقطع و افزایش نازک‌شدگی لوله می‌شود [۲۸، ۳۲، ۳۳]. استفاده از تغذیه محوری در بخش انتهایی لوله هم یکی از راهکارهای ارائه شده برای کاهش نازک‌شدگی و اعوجاج سطح مقطع لوله است. در سال ۲۰۱۳ لی و همکارانش به بررسی این مسئله و تاثیر آن بر خمکاری لوله پرداختند. آن‌ها نشان دادند که تنظیم مناسب شرایط و میزان اعمال تغذیه محوری، منجر به کیفیت بهتر لوله به ویژه در نسبت‌های خمکاری کوچکتر می‌شود [۳۴]. در سال ۲۰۱۶ هم با ادامه تحقیقات روی خمکاری کششی دورانی، نتایجی از بررسی خمکاری لوله‌های با سطح مقطع‌های مختلف و پیچیده، مانند خمکاری پروفیل موج بر دو لبه<sup>۱</sup> (شکل ۱۵)، که جهت هدایت موج‌های الکترومغناطیس در صنایع رادار و ارتباطات فضایی کاربرد دارد، جهت درک بهتر پارامترهای موثر بر خمکاری و عیوب رخ داده در مقاطعی با لبه‌های تیز توسط تعداد از محققین ارائه شده‌است [۳۵-۳۷].



شکل ۱۵: مدل اجزاء محدود شبیه سازی شده از خمکاری لوله با سطح مقطع موج بر دو لبه [۳۵]

## ۷ نتیجه گیری

طبق مطالعه انجام شده روی پارامترهای موثر بر خمکاری کششی دورانی لوله‌ها، بروز یا عدم بروز عیوب مختلف در لوله، طی این فرآیند، تحت تاثیر عوامل بسیار زیادی است که تحلیل دقیق و پیش بینی سطح کیفیت محصول، قبل از ساخت قالب‌ها را مشکل کرده‌است. اما از طرفی همین ویژگی می‌تواند یکی از عوامل محبوبیت این فرآیند باشد، زیرا چنانچه طراح تاثیر پارامترهای مختلف در لوله را بداند، می‌تواند با تعیین مناسب آن‌ها از بروز عیوب، مثل چروکیدگی در شعاع‌های خمکاری کوچک یا پارگی در لوله‌های جدار نازک، جلوگیری کرده و یا آن‌ها را به تعویق بیندازد. با این حال باید تحقیقات بیشتری روی تاثیر پارامترهای مختلف روی این فرآیند و به ویژه به صورت ارائه مدل‌هایی برای بررسی تاثیر همزمان چند پارامتر انجام شود تا بتوان فاصله بین پیش‌بینی مدل‌های عددی و تحلیلی از رفتار لوله طی خمکاری را به مشاهدات تجربی نزدیک‌تر کرد و با ارائه ساختاری مدون، لوله‌هایی با پارامترهای هندسی بحرانی‌تر را شکل داد.

- [۲۸] سلیمانی، الیاسی، حسین زاده، بررسی جایگزینی فشار سیال داخلی به جای مندرل در فرآیند خم کاری کششی دورانی لوله‌های جدارنازک با شعاع خم بحرانی. مهندسی مکانیک مدرس، جلد. ۱۶، ش. ۹، ص ۲۸۷-۲۹۷، ۱۳۹۵.
- [29] Lee, H., Van Tyne, C.J. and Field, D., Finite element bending analysis of oval tubes using rotary draw bender for hydroforming applications. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 168, No. 2, pp.327-335, 2005.
- [30] Ancellotti, S., Benedetti, M., Fontanari, V., Slaghenaufi, S. and Tassan, M., Rotary draw bending of rectangular tubes using a novel parallelepiped elastic mandrel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85, No. 5-8, pp.1089-1103, 2016.
- [31] Xu, J., Yang, H., Zhan, M. and Li, H., Design and optimisation of mandrel parameters for thin walled aluminium alloy tube NC bending. *Materials Research Innovations*, Vol. 15, pp.s365-s369, 2011.
- [32] Lăzărescu, L., Effect of internal fluid pressure on quality of aluminum alloy tube in rotary draw bending. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, No. 1-4, pp.85-91, 2013.
- [۳۳] پالوج، الیاسی، حسین زاده، پیش‌بینی حد خم کاری لوله آلومینیومی ۸۱۱۲ به کمک معیار گلوبی در خم کاری کششی دورانی هیدرولیکی. مهندسی مکانیک مدرس، جلد. ۵، ش. ۱۶، ص ۱۲۳-۱۳۴، ۱۳۹۵.
- [34] Li, H., Yang, H., Zhan, M. and Kou, Y.L., Deformation behaviors of thin-walled tube in rotary draw bending under push assistant loading conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 1, pp.143-158, 2010.
- [35] Zhang, H., Liu, Y. and Yang, H., Study on the ridge grooves deformation of double-ridged waveguide tube in rotary draw bending based on analytical and simulative methods. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 243, pp.100-111, 2017.
- [36] Liu, K.X., Zheng, S., Zheng, Y.S., Chen, Y. and He, Y., Plate assembly effect and cross-section distortion of rectangular tube in rotary draw bending. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 90, No. 1, pp.1-12, 2016.
- [37] Zheng, X., Liu, Y., Liu, C. and Yang, H., Impact of springback on the cross-sectional deformation of H96 brass double-ridged rectangular tube in E-typed rotary draw bending. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, No. 9, pp.1-8, 2016.
- [15] Hasanpour, K., Barati, M., Amini, B. and Poursina, M., The effect of anisotropy on wrinkling of tube under rotary draw bending. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, No. 3, pp.783-792, 2013.
- [16] Yang, H., Li, H. and Zhan, M., Friction role in bending behaviors of thin-walled tube in rotary-draw-bending under small bending radii. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 15, pp.2273-2284, 2010.
- [17] He, Y., Jing, Y., Mei, Z., Heng, L. and Yongle, K., 3D numerical study on wrinkling characteristics in NC bending of aluminum alloy thin-walled tubes with large diameters under multi-die constraints. *Computational Materials Science*, Vol. 45, No. 4, pp.1052-1067, 2009.
- [18] He, Y.A.N.G., Gu, R.J., Mei, Z.H.A.N. and Heng, L.I., Effect of frictions on cross section quality of thin-walled tube NC bending. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 16, No. 4, pp.878-886, 2006.
- [19] Welo, T., Paulsen, F. and Brobak, T.J., The behaviour of thin-walled, aluminium alloy profiles in rotary draw bending—A comparison between numerical and experimental results. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 45, pp.173-180, 1994.
- [20] ZHU, Y.X., LIU, Y.L. and He, Y.A.N.G., Sensitivity of springback and section deformation to process parameters in rotary draw bending of thin-walled rectangular H96 brass tube. *Transactions of nonferrous metals society of China*, Vol. 22, No. 9, pp.2233-2240, 2012.
- [21] Sözen, L., Guler, M.A., Bekar, D. and Acar, E., Investigation and prediction of springback in rotary-draw tube bending process using finite element method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 226, No. 12, pp.2967-2981, 2012.
- [22] Heng, L.I. and He, Y.A.N.G., A study on multi-defect constrained bendability of thin-walled tube NC bending under different clearance. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 24, No. 1, pp.102-112, 2011.
- [23] Nedoushan, R.J., Effect of Mandrel, Its Clearance and Pressure Die on Tube Bending Process via Rotary Draw Bending Method. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 5, No. 5, pp.47-52, 2013.
- [24] Zhao, G.Y., Liu, Y.L., He, Y.A.N.G. and Lu, C.H., Cross-sectional distortion behaviors of thin-walled rectangular tube in rotary-draw bending process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 20, No. 3, pp.484-489, 2010.
- [25] Zhao, G., Liu, Y. and Yang, H., Effect of clearance on wrinkling of thin-walled rectangular tube in rotary draw bending process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 50, pp.85-92, 2010.
- [26] Heng, L.I., He, Y.A.N.G., Mei, Z.H.A.N. and Rui-Jie, G.U., Forming characteristics of thin-walled tube bending process with small bending radius. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 16, pp.s613-s623, 2006.
- [27] Li, H., Yang, H., Yan, J. and Zhan, M., Numerical study on deformation behaviors of thin-walled tube NC bending with large diameter and small bending radius. *Computational Materials Science*, Vol. 45, No. 4, pp.921-934, 2009.