



بررسی قابلیت شکل دهی چرخ دنده متصل به محور توخالی از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ به کمک ماده واسط فشارنده سربی

محمدرضا طهماسبی، حسین جعفرزاده*

گروه ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: h.jafarzadeh@iaut.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در پژوهش حاضر، قابلیت شکل دهی چرخ دنده متصل به محور توخالی از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از فرایند اکستروژن شعاعی به کمک ماده واسط فشارنده از جنس سرب مورد بررسی قرار گرفت. در این روش، ماده واسط از جنس سرب درون محور توخالی قرار داده شده و با اعمال نیروی فشاری بر جداره داخلی قطعه منجر به بهبود سیلان ماده و کاهش تمرکز تنش در نواحی بحرانی گردید. مجموعه قالب های مورد نیاز طراحی و ساخته شده و آزمایش های عملی با استفاده از پرس هیدرولیکی انجام پذیرفته است. شبیه سازی عددی فرایند با استفاده از روش اجزای محدود و در بستر نرم افزار DEFORM انجام شد و اثر پارامترهای مؤثر شامل ضریب اصطکاک، ارتفاع چرخ دنده و ضخامت دیواره محور توخالی بر نیروی شکل دهی، الگوی سیلان ماده، پرشدگی قالب و توزیع کرنش مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که با افزایش ضریب اصطکاک و کاهش ارتفاع چرخ دنده، نیروی لازم برای شکل دهی افزایش یافته و سرعت سیلان ماده کاهش می یابد، در حالی که کاهش ضخامت دیواره محور توخالی منجر به کاهش نیروی شکل دهی شده و تأثیر قابل توجهی بر سرعت سیلان ماده ندارد. همچنین تطابق مناسب بین نتایج شبیه سازی عددی و داده های تجربی، قابلیت اعتماد روش اجزای محدود در پیش بینی رفتار فرایند را تأیید می کند. به طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می دهد که استفاده از ماده واسط فشارنده، روشی کارآمد برای تولید چرخ دنده های متصل به محور توخالی از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ با کیفیت هندسی مطلوب و بدون بروز عیوب عمده می باشد.	مقاله پژوهشی دریافت: ۱۴ خرداد ۱۴۰۵ پذیرش: ۲۵ مرداد ۱۴۰۵ کلیدواژگان: اکستروژن شعاعی آلومینیوم ۶۰۶۱ شکل دهی سرد ماده واسط فشارنده سربی

Investigation of the formability of aluminum 6061 hollow-shaft gears using a lead pressure-transmitting medium

Mohammad Reza Tahmasebi, Hossein Jafarzadeh*

Manufacturing Engineering Group, Tabriz branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
* Corresponding Author's Email: h.jafarzadeh@iaut.ac.ir

Article Information	Abstract
Original Research Paper Received: 4 June 2026 Accepted: 16 August 2026 Keywords: Radial Extrusion Aluminum 6061 Cold Forming Lead Pressure-Transmitting Medium	In the present research, the formability of an aluminum 6061 hollow-shaft gear produced by the radial extrusion process using a lead pressure-transmitting medium was investigated. In this method, a lead was placed inside the hollow shaft, and by applying a compressive load resulting in improved material flow and reduced stress concentration in critical regions. The required die set was designed and manufactured, and experimental tests were carried out using a hydraulic press. To achieve a more comprehensive investigation of the process, numerical simulation based on the finite element method was performed using DEFORM software, and the effects of key parameters including friction coefficient, gear height, and hollow shaft wall thickness on forming force, material flow pattern, die filling, and strain distribution were analyzed. The obtained results indicated that increasing the friction coefficient and decreasing the gear height led to an increase in the required forming force and a reduction in material flow velocity, whereas reducing the hollow shaft wall thickness decreased the forming force without having a significant effect on the material flow velocity. Furthermore, the good agreement between the numerical simulation results and the experimental data confirmed the reliability of the finite element method in predicting process behavior. Overall, the results of this study demonstrate that the use of a pressure-transmitting medium is an efficient approach for manufacturing aluminum 6061 hollow-shaft gears with desirable geometric quality and without major defects.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Tahmasebi MR, Jafarzadeh H. Investigation of the formability of aluminum 6061 hollow-shaft gears using a lead pressure-transmitting medium. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2026 Feb 20;12(12):32-49. doi: 10.22034/ijme.2026.583210.2180 [In Persian]

۱- مقدمه

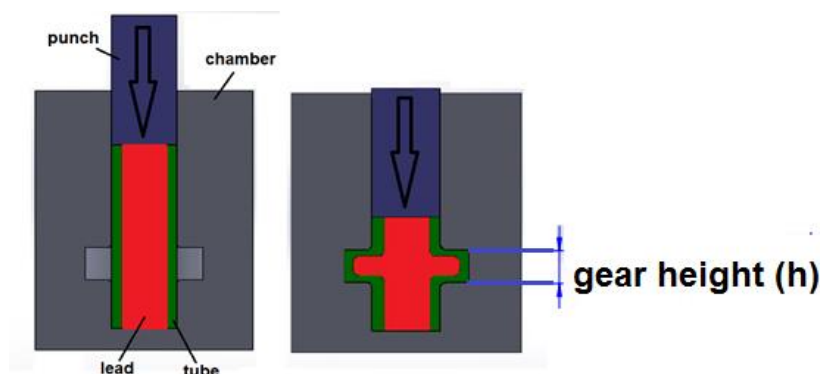
با توسعه روزافزون صنایع خودروسازی، هوافضا، انتقال قدرت و ماشین‌آلات صنعتی، نیاز به تولید قطعاتی با استحکام بالا، وزن کم، دقت ابعادی مناسب، کیفیت سطح مطلوب و نرخ تولید بالا بیش از پیش احساس می‌شود. روش‌های مختلفی از جمله ریخته‌گری، آهنگری، ماشین‌کاری و فرایندهای شکل‌دهی برای تولید این قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر یک دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. در سال‌های اخیر، استفاده از قطعات توخالی و سبک‌وزن به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن، کاهش مصرف مواد و بهبود عملکرد مکانیکی، به‌ویژه در صنایع خودروسازی و هوافضا، رشد قابل توجهی داشته است. از این‌رو توسعه فرایندهای شکل‌دهی حجمی با هدف تولید قطعات نزدیک به شکل نهایی، کاهش ضایعات مواد و بهبود خواص مکانیکی، مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است. در میان فرایندهای شکل‌دهی حجمی، اکستروژن به دلیل قابلیت تولید قطعات با هندسه پیچیده، کیفیت سطح مناسب، دقت ابعادی بالا و خواص مکانیکی مطلوب، یکی از مهم‌ترین روش‌های تولید قطعات صنعتی محسوب می‌شود [۱، ۲]. در دهه‌های اخیر، استفاده از آلیاژهای آلومینیوم، به‌ویژه آلیاژ ۶۰۶۱، به دلیل چگالی پایین، مقاومت مناسب به خوردگی، استحکام قابل قبول و قابلیت بازیافت، در صنایع مختلف افزایش یافته است. با این حال، شکل‌دهی قطعات توخالی آلومینیومی با هندسه‌های پیچیده، به‌ویژه قطعاتی نظیر چرخ‌دنده‌های متصل به محور، همچنان با چالش‌هایی از جمله کنترل سیلان ماده، جلوگیری از کمانش داخلی، ناپرشدگی قالب، نازک‌شدگی دیواره و افزایش نیروی شکل‌دهی همراه است [۳]. اکستروژن شعاعی یکی از انواع فرایندهای اکستروژن است که برای تولید قطعاتی نظیر فلنچ‌ها، چرخ‌دنده‌ها و قطعات دارای برآمدگی شعاعی بر روی محورهای توپر یا توخالی به‌کار می‌رود [۴، ۵]. برخلاف اکستروژن مستقیم و غیرمستقیم که سیلان ماده عمدتاً در راستای حرکت سنبه انجام می‌شود، در اکستروژن شعاعی بخشی از ماده به‌صورت عمود بر جهت حرکت سنبه و به سمت حفره‌های شعاعی قالب جریان می‌یابد. این ویژگی، امکان تولید قطعات نزدیک به شکل نهایی را فراهم می‌کند، اما کنترل رفتار سیلان ماده و پرشدگی کامل قالب را به یکی از چالش‌های اصلی این فرایند تبدیل کرده است. نخستین مطالعات جامع در زمینه اکستروژن شعاعی توسط چوی و همکاران انجام شد [۶]. آنان با استفاده از روش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود، تأثیر پارامترهای هندسی قالب را بر نیروی شکل‌دهی و رفتار سیلان فلز بررسی کردند و نشان دادند که ارتفاع و شعاع ناحیه شکل‌دهی نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت پرشدگی قالب دارند. همچنین پژوهش‌های متعددی در زمینه توسعه فرایندهای اکستروژن شعاعی انجام شده است. در یکی از این تحقیقات، رفتار تغییر شکل آلیاژ آلومینیوم AA1050 در فرایند اکستروژن شعاعی ترکیب شده با اکستروژن مستقیم و غیرمستقیم به‌صورت تجربی و عددی بررسی شد و اثر پارامترهای هندسی بر سیلان ماده و نیروی شکل‌دهی مورد ارزیابی قرار گرفت [۷، ۸]. همچنین در پژوهشی دیگر، تأثیر پارامترهای طراحی قالب بر فرایند اکستروژن شعاعی آلیاژ AA6063 با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی شد و نقش هندسه قالب در کیفیت قطعه نهایی و کاهش نیروی شکل‌دهی مورد تأیید قرار گرفت [۹]. پس از آن، فرهمند و همکاران [۱۰]، فرایند اکستروژن مستقیم-شعاعی-غیرمستقیم را به‌صورت تجربی و عددی بررسی کرده و اثر پارامترهای هندسی و شرایط اصطکاکی را بر توزیع کرنش، سیلان ماده و نیروی شکل‌دهی مورد ارزیابی قرار دادند. در سال‌های اخیر، علاوه بر روش‌های متداول اکستروژن، استفاده از فرایندهای هیدروفرمینگ و هیدروفورجینگ برای تولید قطعات توخالی با هندسه پیچیده مورد توجه قرار گرفته است. در فرایند هیدروفورمینگ، فشار سیال موجب توزیع یکنواخت تنش، افزایش شکل‌پذیری و کاهش احتمال ایجاد ترک و نازک‌شدگی می‌شود. آلاسواد و همکاران در یک مطالعه مروری، پیشرفت‌های حاصل در فناوری هیدروفورمینگ لوله‌ها و نقش آن در تولید قطعات سبک‌وزن با کیفیت بالا را بررسی کرده‌اند. با وجود مزایای فراوان، نیاز به تجهیزات فشار بسیار بالا، سامانه‌های آب‌بندی پیچیده و هزینه بالای تجهیزات هیدرولیکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این فرایند به شمار می‌رود [۱۱، ۱۲]. به‌منظور غلبه بر برخی محدودیت‌های هیدروفورمینگ، فرایند هیدروفورجینگ به‌عنوان روشی ترکیبی توسعه یافته است که در آن از فشار هیدرواستاتیک در کنار نیروی مکانیکی برای بهبود تغییر شکل قطعه استفاده می‌شود. در این فرایند، فشار داخلی ضمن حمایت از دیواره قطعه، موجب بهبود سیلان ماده، کاهش احتمال کمانش و افزایش قابلیت پرشدگی قالب می‌شود. چن و همکاران فرایند هیدروفورجینگ قطعات لوله‌ای با مقطع دوزنقه‌ای را بررسی کرده و نشان دادند که فشار هیدرواستاتیک نقش مؤثری در کاهش عیوب شکل‌دهی و بهبود پرشدگی قالب دارد [۱۳]. به‌منظور کاهش پیچیدگی تجهیزات، استفاده از مواد واسط انتقال فشار جامد به‌عنوان جایگزینی برای سیال تحت فشار نیز مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، ماده واسط ضمن انتقال یکنواخت فشار به سطح داخلی قطعه، از کمانش دیواره جلوگیری کرده و شرایط مناسب‌تری برای تغییر شکل پلاستیک فراهم می‌آورد. پولیتس و همکاران [۱۴] با

استفاده از یک ماده واسط سربی، فرایند تولید چرخ‌دنده را به‌صورت تجربی و عددی بررسی کرده و نشان دادند که استفاده از این ماده می‌تواند انتقال فشار را بهبود بخشیده و قابلیت شکل‌دهی قطعات توخالی را افزایش دهد. همچنین الزهرانی و همکاران [۱۵] قابلیت این فرایند را در تولید قطعات توخالی پیچیده با نسبت استحکام به وزن بالا مورد بررسی قرار داده و مزایای آن را در مقایسه با روش‌های متداول گزارش کردند. با وجود این، نیاز به تجهیزات تولید فشار بسیار بالا، سامانه‌های آب‌بندی پیچیده و هزینه زیاد تجهیزات هیدرولیکی، کاربرد گسترده این روش را در بسیاری از کاربردهای صنعتی محدود کرده است. علاوه بر این، در مطالعات پیشین نگارندگان نیز تحقیقات متعددی در زمینه توسعه فرایندهای اکستروژن جانبی و شعاعی انجام شده است. در یکی از این پژوهش‌ها، اثر ابعاد بیلت اولیه، فاصله قالب و شرایط اصطکاک بر نیروی شکل‌دهی، الگوی سیلان ماده و توزیع کرنش مؤثر در اکستروژن جانبی قطعات چرخ‌دنده‌ای به‌صورت تجربی و عددی بررسی و تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش مشاهده گردید [۱۶]. نتایج این تحقیقات نشان داد که طراحی مناسب قالب و کنترل شرایط تماس، نقش مهمی در بهبود کیفیت قطعه نهایی و کاهش نیروی فرایند دارند. در سال‌های اخیر، استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل رفتار ماده و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند، رشد قابل توجهی داشته است. لی و همکاران [۱۷] با بررسی فرایند فورج شعاعی محورهای توخالی نشان دادند که میزان کاهش شعاعی، دمای اولیه و شرایط فرایند تأثیر مستقیمی بر یکنواختی توزیع کرنش و کیفیت نهایی قطعه دارند. همچنین وینیارسکی و همکاران [۱۸] فرایند جدیدی برای شکل‌دهی فلنج بر روی قطعات توخالی ارائه کردند که تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی مشاهده شد. از سوی دیگر، سلیمانی‌پور و مائو [۱۹]، اثر حرکت پالسی سنبه را در اکستروژن جانبی چرخ‌دنده داخلی بررسی کردند و نشان دادند که بهبود شرایط روانکاری موجب کاهش نیروی شکل‌دهی، بهبود سیلان ماده و افزایش کیفیت هندسی دندانه‌ها می‌شود. همچنین پژوهش‌های جدید در زمینه هیدروفرمینگ آلیاژهای آلومینیوم نشان داده‌اند که کنترل مناسب فشار داخلی می‌تواند موجب بهبود سیلان ماده، یکنواختی ضخامت و کیفیت قطعات تولیدی شود [۲۰]. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه تحقیقات متعددی در زمینه اکستروژن شعاعی، هیدروفرمینگ و شکل‌دهی قطعات توخالی انجام شده است، اما بررسی تولید یکپارچه چرخ‌دنده متصل به محور توخالی با استفاده از ماده واسط انتقال فشار جامد از جنس سرب هنوز به‌طور جامع مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین اثر هم‌زمان پارامترهایی نظیر ضریب اصطکاک، ارتفاع چرخ‌دنده و ضخامت دیواره بر رفتار سیلان ماده، توزیع کرنش پلاستیک مؤثر، سختی و نیروی شکل‌دهی در این فرایند کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر بررسی قابلیت تولید یکپارچه چرخ‌دنده متصل به محور توخالی از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش اکستروژن شعاعی سرد با استفاده از ماده واسط فشارنده سربی است. بدین منظور، فرایند به‌صورت هم‌زمان از طریق آزمایش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته و اثر پارامترهای اصلی فرایند شامل ضریب اصطکاک، ارتفاع چرخ‌دنده و ضخامت دیواره بر سیلان ماده، توزیع کرنش پلاستیک مؤثر، سختی و نیروی شکل‌دهی ارزیابی شده است. نوآوری اصلی این پژوهش، ارائه روشی برای تولید چرخ‌دنده یکپارچه بر روی محور توخالی با استفاده از ماده واسط انتقال فشار جامد، بدون نیاز به سامانه‌های پیچیده هیدرولیکی، و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی با آزمایش‌های تجربی است. نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی و توسعه فرایندهای شکل‌دهی سرد قطعات توخالی با هندسه پیچیده و کاهش هزینه‌های تولید مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش آزمایش

۲-۱- مواد و روش‌ها

در بخش اول از این تحقیق، قابلیت تولید چرخ‌دنده متصل به لوله توخالی از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ بصورت یکپارچه و به کمک ماده واسط فشارنده از جنس سرب مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، فرایند شکل‌دهی در دمای اتاق و در مجموعه قالب بسته انجام گرفته است. مراحل تغییر شکل لوله آلومینیومی به این صورت است که سنبه بالایی متصل به کوبه پرس هیدرولیک به سمت پایین حرکت کرده و لوله آلومینیومی پر شده با سرب که به صورت ثابت در درون محفظه بسته قالب قرار گرفته است، فشار می‌دهد. با اعمال فشار از طرف سنبه بالایی لوله و ماده سربی داخل آن شروع به سیلان پلاستیک در دو راستای طولی و شعاعی نموده و فضاهای خالی محفظه قالب که به شکل چرخ‌دنده می‌باشد را پر می‌کند.



شکل ۱ شماتیک اکستروژن شعاعی جهت شکل‌دهی چرخ‌دنده متصل به لوله با ماده واسط فشارنده سربی

به منظور ساخت مجموعه قالب، ابتدا مدل چرخ‌دنده با توجه به پارامترهای جدول ۱ و با استفاده از نرم‌افزار GearTrax ایجاد شد. سپس با استفاده از این مدل فایل dxg * مربوط به پروفیل مقطع چرخ‌دنده جهت انجام عملیات وایرکات مورد استفاده قرار گرفت. جنس سنبه و قالب چرخ‌دنده از فولاد گرمکار DIN ۱.۲۳۴۴ انتخاب گردید و تمام این قطعات تا ۵۰ HRC سخت‌کاری شدند.

جدول ۱ مشخصات ابعادی چرخ‌دنده

پارا مترهای چرخ‌دنده مورد بررسی در تحقیق حاضر

3	m	مدول
12	Z	تعداد دندانه
9.424 mm	p	اندازه گام
36 mm	d_p	قطر دایره گام
28.998 mm	d_f	قطر دایره پایه دنده
42 mm	d_k	قطر دایره سر دنده
10 mm	h	ارتفاع دنده
20°	φ	زاویه فشار

پرس مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها اصلی، پرس هیدرولیکی ۵۰۰ تنی Amsler می‌باشد. در شکل ۲ تصویر این دستگاه پرس که مجموعه قالب بر روی آن نصب شده مشاهده می‌شود. سرعت پایین آمدن فک بالایی در پرس مشابه مقدار تنظیمی در انجام شبیه‌سازی عددی به اندازه ۱۰ mm/min تنظیم شد. همزمان با پایین آمدن سنبه، ثبت نمودار نیرو-کُرس در پرس بصورت اتوماتیک انجام می‌گرفت.



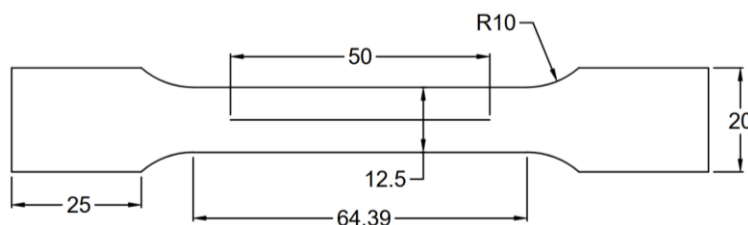
شکل ۲ مجموعه پرس هیدرولیک مورد استفاده در آزمایش‌ها تجربی و مجموعه قالب نصب شده بر روی آن

۲-۲- آماده‌سازی نمونه آزمایش تجربی و بررسی خصوصیات مکانیکی

آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به دلیل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خوب، کاربردهای مختلفی در صنایع مختلف هوایی و دفاع، بدنه دوچرخه، صنایع کشتی‌سازی، پل‌های سبک و غیره دارد. در فرایندهای شکل‌دهی فلزات، مهم‌ترین ویژگی این آلیاژها، خاصیت اکستروپذیری آنها است؛ که این آلیاژها را به عنوان بهترین گزینه در کاربردهای ساختمانی و پروفیل‌سازی مطرح کرده است. در تحقیق حاضر نمونه‌های اولیه آلومینیوم ۶۰۶۱ بصورت میلگرد به قطر اولیه ۵۰ میلی‌متر و طول ۱۰۰ میلی‌متر خریداری گردید. سپس با استفاده از فرایند تراش کاری لوله‌های اولیه آلومینیومی از میلگردهای تهیه شده ماشین کاری گردید. بدین منظور نمونه‌های آلومینیومی به قطر خارجی ۴۰ میلی‌متر با قطر داخلی ۱۴ میلی‌متر و طول ۹۰ میلی‌متر آماده‌سازی شد. جهت عملیات شکل‌دهی در قالب بسته این لوله‌ها تحت عملیات حرارتی آنیل قرار گرفتند. این عملیات بیشتر به منظور حذف تنش‌های پسماند قبلی و آثار تغییرشکل پلاستیک قبلی ناشی از نورد میلگرد و همچنین جهت افزایش تغییرشکل‌پذیری آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در دمای محیط انجام گرفت. بدین منظور نمونه‌های حاصل از تراشکاری به مدت ۲/۵ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد داخل کوره گرم شدند. سپس سرمایش کوره با نرخ ۱۰ درجه در ساعت بصورت کنترل‌شده انجام گرفت تا دمای نمونه‌ها به ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد رسید. در نهایت نمونه‌ها از کوره خارج شده و در محیط خارج کوره به دمای اتاق رسید. در این پژوهش، از سرب خالص تجاری^۱ به عنوان محیط انتقال فشار استفاده شد. انتخاب این ماده به دلیل شکل‌پذیری بسیار زیاد، تنش تسلیم پایین و قابلیت انتقال نسبتاً یکنواخت فشار در حین فرایند شکل‌دهی انجام گرفت. در ادامه سوراخ داخلی تمامی نمونه‌ها توسط سرب پر شده و جهت شکل‌دهی داخل حفره قالب آماده گردید. به منظور تعیین خواص مکانیکی ماده اولیه مورد استفاده، از آزمایش کشش استفاده شد. آزمون کشش توسط دستگاه AUTOGRAPH مطابق با استاندارد ASTM-E8 به روی نمونه‌های آماده‌سازی شده با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. در شکل ۳، دستگاه کشش و هندسه نمونه تست کشش نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳ الف) هندسه نمونه تست کشش و ب) دستگاه کشش

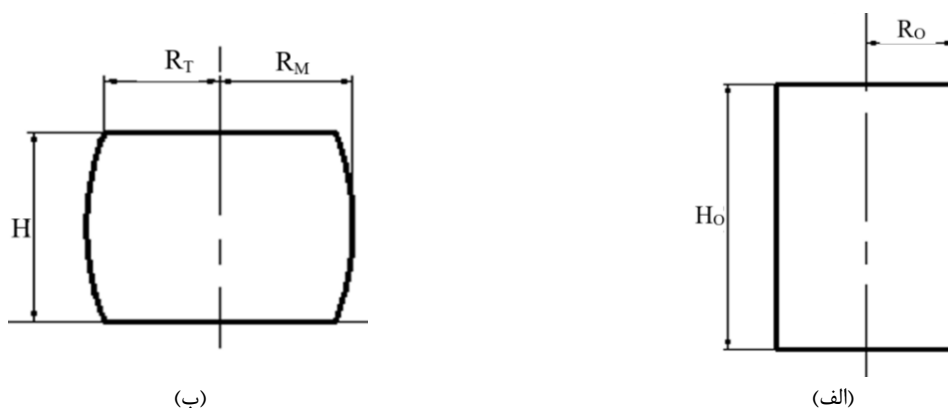
جهت مطالعه خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده توسط فرایند از میکروسختی ویکرز استفاده شد. بدین منظور سطوح مورد نظر نمونه‌های اولیه و همچنین اکستروژنه شده با استفاده از سنباده‌های مناسب آماده‌سازی شد. ریزسختی‌سنج توسط دستگاه MICROMENT ساخت شرکت LHOH، با وزنه ۵۰ گرم و به مدت ۳۰ ثانیه در دمای محیط در نقاط مشخص در نمونه تغییرشکل داده شده و در نمونه اولیه انجام گرفت. جهت اطمینان از صحت نتایج آزمون سختی‌سنجی، عدد سختی بدست آمده برای هر نقطه، از میانگین سه اثر در آن نقطه بدست آمده است. پس از پایان فرایند شکل‌دهی، ماده واسط سربی از قطعه خارج شد. به دلیل تشکیل برآمدگی شعاعی چرخ‌دنده، سرب در ناحیه زیر چرخ‌دنده دچار قفل مکانیکی موضعی می‌شود و امکان خروج آن تنها با اعمال نیروی محوری وجود ندارد. از این رو، ابتدا بخش مرکزی سرب با عملیات سوراخکاری حذف شده و سپس سرب باقی‌مانده توسط عملیات داخل‌تراشی روی دستگاه تراش از

¹ Commercial Pure Lead

داخل قطعه خارج می‌شود. با توجه به استحکام و سختی پایین سرب در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، این عملیات بدون آسیب به قطعه انجام می‌شود. براده‌های حاصل نیز قابلیت ذوب و بازیافت داشته و می‌توان از آن‌ها مجدداً به عنوان ماده واسط انتقال فشار در فرایند استفاده کرد. لازم به ذکر است که هدف این پژوهش، بررسی امکان‌پذیری فرایند و تحلیل رفتار شکل‌دهی بوده است؛ بنابراین عملیات جداسازی ماده واسط، به عنوان یک عملیات تکمیلی پس از شکل‌دهی انجام شده و بخشی از فرایند اصلی شکل‌دهی محسوب نمی‌شود.

۲-۳- برآورد ضریب اصطکاک

جهت محاسبه مقادیر ضریب اصطکاک در شرایط استفاده از روانکارهای مختلف از روش اصلاح شده فشردگی استوانه که توسط ابراهیمی و همکاران ارائه گردید، استفاده شد [۲۱]. همانطوریکه در شکل شماتیک ۴ نشان داده شده است، مهمترین حسن این روش عدم نیاز به تهیه نمونه در حالت رینگی می‌باشد به طوریکه می‌توان از قطعه کار بعد از مرحله آپست، برای تعیین ضریب اصطکاک استفاده کرد. در این روش، مطابق روابط ۱ تا ۶، از توسعه روابط تحلیلی حد بالا برای آپست کردن^۱ استوانه و استخراج یک رابطه مستقل تعیین ضریب اصطکاک بین قطعه کار و قالب استفاده شده است. برای بدست آوردن ضریب اصطکاک نمونه، نمونه‌ای با طول اولیه H_0 ۱۶ میلی‌متر و قطر $2R_0$ ۱۶ میلی‌متر ماشین‌کاری شد و نمونه توسط دستگاه پرس حدوداً به نصف ارتفاع اولیه فشرده شد (شکل ۴). لازم به ذکر است که نمونه‌ها در سه شرایط روانکاری مختلف شامل استفاده از روانکار گریس، دی‌سولفیدمولیبدن و حالت بدون روانکاری تحت فشردگی توسط دستگاه پرس قرار گرفت. در ادامه با استفاده از روابط ۱ تا ۶ و با استفاده از اندازه‌گیری پارامترهای لازم، نتایج تجربی به دست آمد [۲۱]. با توجه به روابط فوق و پارامترهای اندازه‌گیری شده مقدار ضریب اصطکاک تحت شرایط روانکاری با گریس برابر با ۰/۲، با دی‌سولفیدمولیبدن ۰/۱۳ و حالت بدون روانکاری ۰/۳۸ بدست آمد.



شکل ۴ الف) شماتیک قطعه خام اولیه و ب) شماتیک قطعه بعد از مرحله آپست [۲۱]

$$R_T = \sqrt{3 \times \frac{H_0}{H} \times R_0^2 - 2R_M^2} \quad (1)$$

$$\Delta R = R_M - R_T \quad (2)$$

$$R = R_0 \sqrt{\frac{H_0}{H}} \quad (3)$$

$$\Delta H = H_0 - H \quad (4)$$

$$b = 4 \times \frac{\Delta R}{R} \times \frac{H}{\Delta H} \quad (5)$$

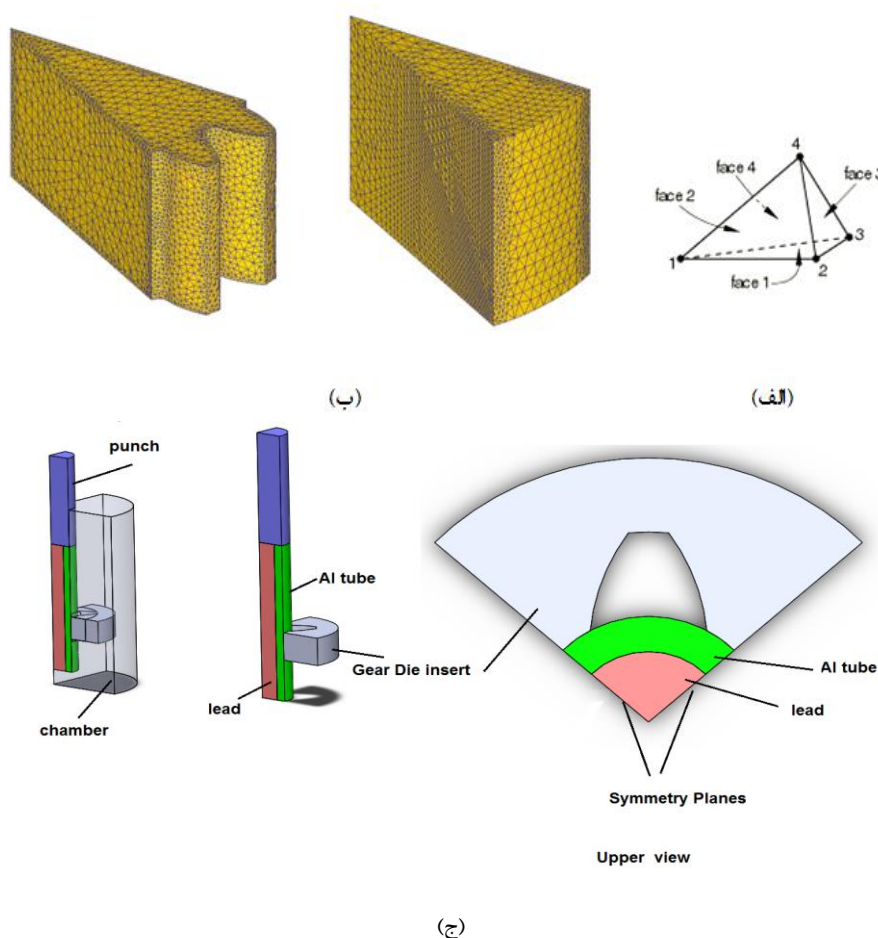
$$m = \frac{\left(\frac{R}{H}\right)^b}{\left(\frac{4}{\sqrt{3}}\right) - \left(\frac{2b}{3\sqrt{3}}\right)} \quad (6)$$

¹ Cylinder Upset

که در آن‌ها R_T شعاع نوک قطعه کار بعد از تغییر شکل، H_0 ارتفاع اولیه قطعه کار، H ارتفاع قطعه کار بعد از تغییر شکل، R_0 شعاع اولیه قطعه کار، R_M شعاع ماکزیمم قطعه کار بعد از تغییر شکل، R شعاع متوسط قطعه کار بعد از تغییر شکل، b پارامتر بشک‌ای شدن و m ضریب اصطکاک می‌باشد.

۲-۴- شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند

چرخ‌دنده قطعه‌ای است که امکان بررسی آن به صورت دو بعدی وجود ندارد، به همین علت جهت مدل‌سازی کامل سیلان فلز و مطالعه تاثیر پروفیل چرخ‌دنده بر روی پارامترهای مورد بررسی، بایستی فرایند به صورت سه‌بعدی بررسی شود. با توجه به اینکه در مدل چرخ‌دنده تقارن وجود دارد، مطابق شکل ۵، فقط یک دنده و یک فضای خالی دنده از کل مدل به عنوان یک قطاع از کل مدل سه‌بعدی جهت شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. بدین‌صورت سطوح قطاع مطابق شکل ۵ به عنوان سطوح تقارن در تمامی قطعات مجموعه مونتاژی در نظر گرفته شد. این فرض شبیه‌سازی با استفاده از مدل قطاعی جهت کاهش زمان محاسبات در شبیه‌سازی عددی فرض شد.

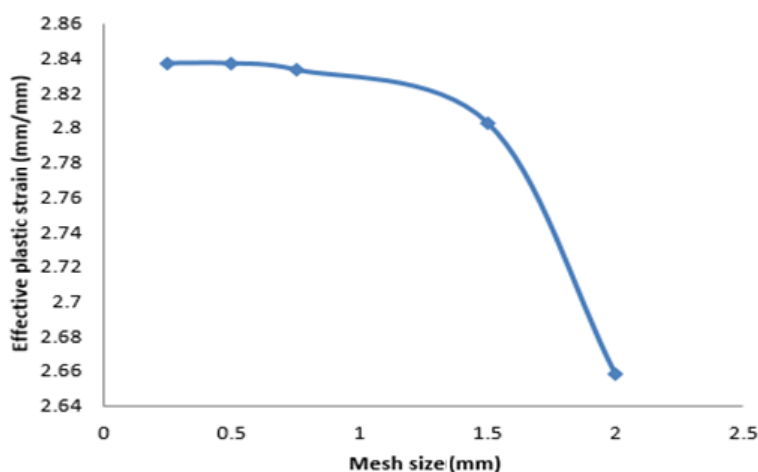


شکل ۵ الف) المان چهار وجهی، ب) بیلته اولیه المان‌بندی شده و قطعه کار بعد از انجام فرایند ج) اجزای قالب و قطعات در مدل سه‌بعدی متقارن قطاعی در شبیه‌سازی اجزای محدود

با توجه به اینکه در این تحقیق از نرم‌افزار Deform-3D برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است، این نرم‌افزار توانایی ایجاد مدل هندسی به صورت سه‌بعدی را ندارد، لذا باید مدل‌های هندسی سه‌بعدی قالب‌ها و قطعه‌های پیش‌فرم در یک نرم‌افزار مدل‌سازی سه‌بعدی ایجاد شده و به صورت فایل stl به محیط نرم‌افزار Deform وارد شود. بنابراین تمام قالب‌ها و قطعات پیش‌فرم در نرم‌افزار Catia مدل‌سازی و به صورت فایل stl آماده استفاده در محیط نرم‌افزار Deform گردید. تغییر شکل پلاستیک ماده در حین فرایند اکستروژن در محیط نرم‌افزار DEFORM انجام گرفت. در این راستا، مجموعه اجزای تشکیل دهنده قالب به دلیل تغییر شکل ناچیز در

مقایسه با تغییر شکل قطعه کار بصورت صلب^۱ فرض گردید. همچنین بدلیل تغییر شکل های پلاستیک بزرگ در قطعه کار از تغییر شکل الاستیک ماده نیز بدلیل ناچیز بودن آن صرف نظر شد. در شبیه سازی المان محدود، سرب همانند قطعه آلومینیومی به صورت ماده صلب-پلاستیک^۲ مدل شد و رفتار آن بر اساس منحنی تنش- کرنش حقیقی در نرم افزار DEFORM تعریف گردید. قالب ها نیز به صورت اجسام صلب در نظر گرفته شدند. در قسمت برهم کنش^۳، شرایط تماسی بین مجموعه قالب صلب و قطعه کار، تعریف گردید و مقادیر ضریب اصطکاک برای نمونه و نتایج حاصله از آزمایش ها تجربی مطابق نتایج آزمون فشار بشکته ای در نظر گرفته شد. سرعت حرکت سنبه نیز مشابه با آزمایش ها تجربی برابر ۱۰ mm/min تنظیم شده است. در این تحلیل از المان های چهاروجهی مطابق شکل ۵ که برای تحلیل مسائل شکل دهی در حالت سه بعدی مناسب می باشند، استفاده شده است. المان های تتراهدرال از جمله المان های جامد (کانتینیوم) می باشند. معمولاً از المان های چهاروجهی و شش وجهی برای تحلیل مسایلی که دارای تماس و مقدار کرنش بالا هستند، استفاده می شود. با توجه به اینکه در این تحلیل ها مقدار کرنش بالا بوده و قطعه کار دارای گوشه های تیز و جزئیات خاص می باشد با در نظر گرفتن قابلیت بالای المان چهاروجهی در شکل دادن گوشه ها و همچنین قابلیت آن در فرایند مش بندی مجدد، از این المان برای مش بندی قطعه کار استفاده شده است. جهت جلوگیری از اعوجاج^۴ بیش از حد المان ها در حین تغییر شکل پلاستیک فرایند اکستروژن از الگوریتم های مش بندی مجدد^۵ استفاده شد.

برای هر شبیه سازی، مش بندی با تعیین اندازه کوچک ترین المان، نسبت طول به عرض المان ها و همچنین تعیین معیار شبکه بندی مجدد با توجه به اندازه المان ها صورت گرفت. حرکت قالب به ازای هر مرحله نسبت به اندازه کوچک ترین المان موجود در نمونه تعیین می شود. این اندازه به طور معمول $\frac{1}{3}$ تا $\frac{2}{3}$ اندازه کوچک ترین المان موجود که در قسمت المان بندی تعیین شده است، می باشد. به منظور بررسی استقلال نتایج شبیه سازی از اندازه شبکه، تحلیل حساسیت نسبت به اندازه مش انجام شد. برای این منظور، مقدار کرنش پلاستیک مؤثر در وسط ضخامت دیواره قطعه اکستروژنه برای اندازه های مختلف مش استخراج و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج این بررسی در شکل ۶ ارائه شده است. بعد از مقایسه المان ها، المان انتخابی بهینه برای قطعه اولیه با اندازه ۰/۸ میلی متر استفاده شد.



شکل ۶ دیاگرام حساسیت مش با خروجی کرنش مؤثر پلاستیک

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تجربی قابلیت فرایند

در بخش تجربی بررسی فرایند شکل دهی از این تحقیق، قابلیت تولید چرخ دنده متصل به لوله توخالی از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ بصورت یکپارچه و به کمک ماده واسط فشارنده از جنس سرب مورد بررسی قرار گرفت. فرایند شکل دهی در دمای اتاق و در مجموعه قالب بسته انجام گرفت. مراحل تغییر شکل لوله آلومینیومی به این صورت است که سنبه بالایی متصل به کوبه پرس هیدرولیک به سمت پایین

¹ Rigid

² Rigid-Plastic

³ Interaction

⁴ Element Distortion

⁵ Remeshing

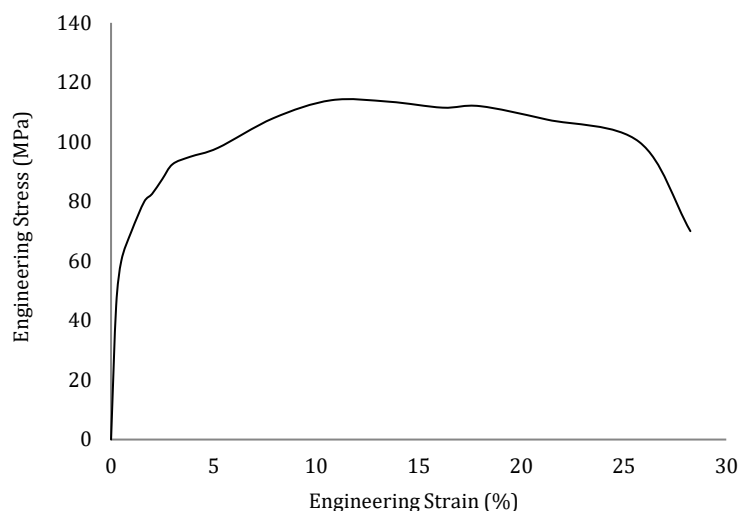
حرکت کرده و لوله آلومینیومی پر شده با سرب که به صورت ثابت در درون محفظه بسته قالب قرار گرفته است، فشار می‌دهد. با اعمال فشار از طرف سنبه بالایی لوله و ماده سربی داخل آن شروع به سیلان پلاستیک در دو راستای طولی و شعاعی نموده و فضاهای خالی محفظه قالب که به شکل چرخ‌دنده می‌باشد را پر می‌کند. در فرایند شکل‌دهی که یک فرایند اکستروژن شعاعی می‌باشد، سنبه بالایی به سمت پایین حرکت می‌کند، درحالی‌که پانچ پایینی ثابت است، با ادامه حرکت سنبه بالایی، همان‌گونه که در شکل شماتیک فرایند نشان داده شد، مواد فقط در راستای شعاعی یا جانبی و در محفظه مرتبط با چرخ‌دنده امکان جاری شدن دارند. در شکل ۷ مراحل مختلف شکل‌گیری قطعه مورد نظر نشان داده شده است. همچنین شکل ۷ قطعه آلومینیومی لوله‌ای پر شده با فلز سرب در انتهای فرایند شکل‌دهی و پس از خروج از حفره قالب را نشان می‌دهد. این نتایج نشان داد که می‌توان توسط فرایند شکل‌دهی سرد اکستروژن شعاعی چرخ‌دنده‌های متصل به لوله توخالی از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ را بصورت موفقیت آمیزی تولید نمود. در این مرحله قطعه تولید شده بدون هرگونه ترک یا عدم پرشدگی حفره به‌دست آمد.



شکل ۷ تولید قطعات در مراحل مختلف فرایند شکل‌دهی

۳-۲- نتایج آزمون کشش و تعیین ضریب اصطکاک

در بخش شبیه‌سازی عددی فرایند شکل‌دهی بایستی جهت دستیابی به نتایج دقیق و قابل اعتماد، خصوصیات مکانیکی ماده لوله آلومینیومی در محیط نرم‌افزار و بخش خصوصیات مکانیکی تعریف شود. یکی از روش‌های تعیین خصوصیات مکانیکی فلزات استفاده از آزمون کشش تک‌محوری است. ماده انتخاب شده برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌ها تجربی در این مطالعه آلومینیوم ۶۰۶۱ می‌باشد که خواص مکانیکی آن و رابطه تنش-کرنش حقیقی مرتبط با تغییر شکل پلاستیک آن با استفاده از آزمایش کشش به‌دست آمد. منحنی تنش-کرنش آلیاژ مورد بررسی در شکل ۸ نشان داده شده است. لازم به توضیح این که به دلیل تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ در حین فرایند شکل‌دهی و همچنین جهت جلوگیری از پیچیدگی محاسبات و ناچیز بودن تغییر شکل‌های الاستیک از محدوده تغییر شکل الاستیک در روش شبیه‌سازی عددی صرف‌نظر گردید. در این پژوهش، به دلیل در دسترس بودن تجهیزات آزمون و همچنین استفاده متداول از منحنی‌های حاصل از آزمون کشش برای تعریف رفتار پلاستیک آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در تحلیل‌های المان محدود، منحنی تنش-کرنش مورد نیاز از آزمون کشش استخراج و پس از تبدیل به مقادیر حقیقی، در نرم‌افزار DEFORM مورد استفاده قرار گرفت. در قسمت برهم‌کنش بین مجموعه قالب و قطعه کار بایستی مقادیر ضریب اصطکاک در نرم‌افزار اجزای محدود تعریف شود. این برهم‌کنش می‌تواند شامل برهم‌کنش‌های حرارتی و یا تماسی باشد. به دلیل این که در این تحقیق از انتقال حرارت بین مجموعه قالب و قطعه کار صرف‌نظر شده است و فرایند بصورت سرد انجام شده است، در قسمت تعریف برهم‌کنش سطوح، فقط برهم‌کنش تماسی تعریف گردید. اصطکاک و شرایط سطح تماس بین قالب قطعه کار و سنبه قطعه کار یکی از پارامترهایی است که تاثیر ویژه‌ای به حداکثر نیروی لازم برای شکل‌دهی و از آن مهم‌تر نحوه سیلان فلز در حین فرایند شکل‌دهی دارد. در این تحقیق از سه نوع روانکار مختلف جهت بررسی تاثیر شرایط اصطکاکی بر رفتار سیلان ماده و همچنین تغییرات نیروی شکل‌دهی استفاده شد. نتایج بدست آمده از آزمون فشار شبکه‌ای جهت تعیین مقادیر ضریب اصطکاک نشان داد برای روانکار دی‌سولفیدمولیبدن MOS2 مقدار ضریب اصطکاک ۰/۱۳ و برای روانکار گریس و بدون استفاده از ماده روانکار مقادیر ضریب اصطکاک به ترتیب ۰/۲ و ۰/۳۸ بدست آمد.



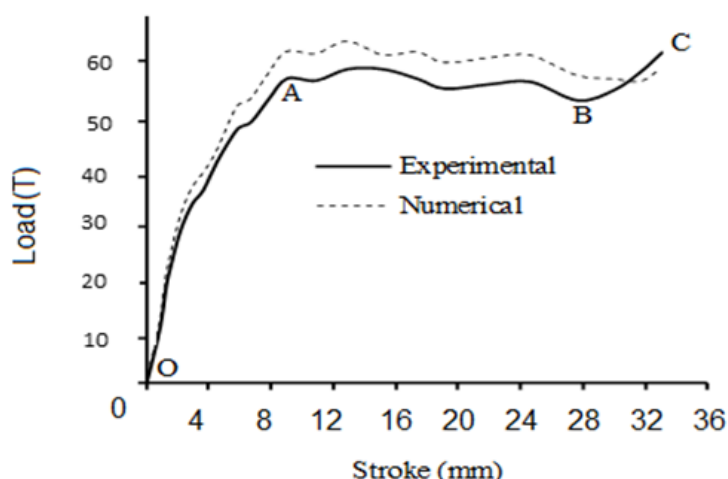
شکل ۸ نمودار تنش-کرنش آلومینیوم ۶۰۶۱ حاصل از کشش تک محوری

۳-۳- بررسی نیرو-جابجایی و رفتار سیلان ماده حاصل از تحلیل تجربی و عددی

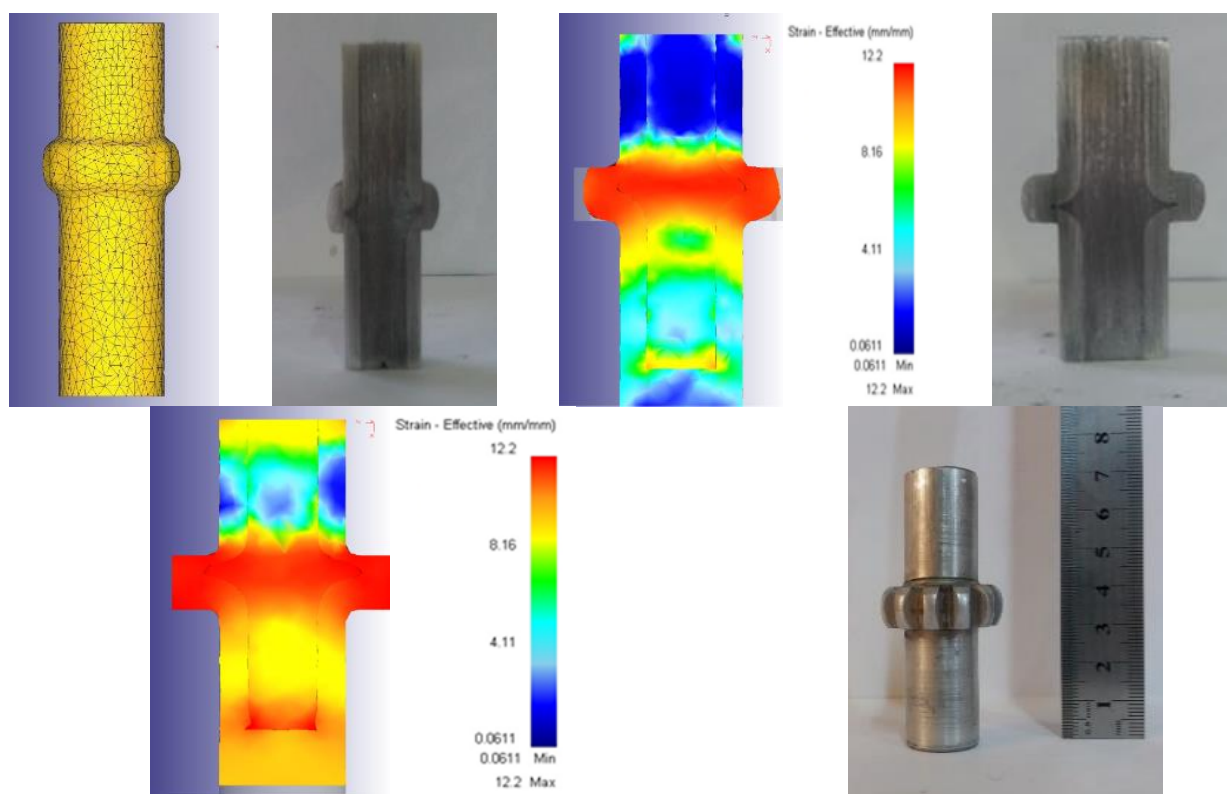
منحنی نیرو-جابجایی یکی از شاخص‌های اصلی برای تحلیل مکانیکی فرایندهای شکل دهی پلاستیک سرد است، زیرا اثر هم‌زمان مقاومت تغییر شکل پلاستیک ماده، اصطکاک تماس قالب-قطعه کار و محدودیت‌های هندسی قالب را منعکس می‌کند. مطابق شکل ۹، منحنی نیرو-جابجایی حاصل از فرایند اکستروژن شعاعی سرد قطعه چرخ دنده آلومینیومی ۶۰۶۱ متصل و یک پارچه بر روی لوله دارای سه ناحیه متمایز OA، AB و BC است. در آزمایش‌ها تجربی نمونه با استفاده از روانکار دی‌سولفیدمولیبدن روانکاری شده و در شبیه‌سازی عددی نیز مقدار ضریب اصطکاک بدست آمده از آزمون فشار استوانه برابر ۰/۱۳ در نظر گرفته شد. سایر شرایط هندسی و ابعادی قطعه و قالب در شبیه‌سازی عددی مشابه آزمایش‌ها تجربی لحاظ گردید. در ناحیه OA، تماس اولیه سنبه با قطعه کار و آغاز پر شدن محفظه قالب رخ می‌دهد. در این مرحله، به دلیل نبود مسیر جریان پایدار و تمرکز تغییر شکل در نواحی ابتدایی دیواره‌ها و گوشه‌های قالب، کرنش پلاستیک مؤثر به صورت موضعی افزایش یافته و نیروی سنبه با شیب تند تا حدود ۵۵ تن افزایش می‌یابد. سهم غالب نیروی اعمالی در این ناحیه مربوط به غلبه بر تنش تسلیم آلومینیوم ۶۰۶۱ انیل شده و اصطکاک تماس اولیه است. در ناحیه AB، جریان ماده به حالت شبه پایدار می‌رسد. در این مرحله، ماده به طور هم‌زمان در ناحیه اکستروژن شعاعی جریان یافته و توزیع کرنش پلاستیک مؤثر یکنواخت‌تر می‌شود. تثبیت مسیر جریان و کاهش گرادیان تنش موجب کاهش شیب منحنی نیرو-جابجایی می‌گردد. در ناحیه BC، پر شدن کامل گوشه‌ها و شکل‌گیری نهایی هندسه قطعه کار رخ می‌دهد. در این مرحله، به دلیل افزایش محدودیت جریان ماده و شکل‌گیری نواحی با تغییر شکل محدود در گوشه‌ها، تمرکز تنش افزایش یافته و نیروی سنبه مجدداً روند افزایشی پیدا می‌کند. مقایسه نتایج تجربی و عددی در شکل ۹ نشان می‌دهد که مدل المان محدود توانسته است رفتار کلی منحنی نیرو-جابجایی را با اختلاف حدود ۱۰ درصد پیش‌بینی کند. این اختلاف عمدتاً به فرض ضریب اصطکاک ثابت و ایده‌آل‌سازی شرایط تماس در شبیه‌سازی نسبت داده می‌شود، در حالی که در آزمایش تجربی، شرایط روانکاری در طول فرایند دچار تغییر رفتار موضعی می‌شود.

در ادامه رفتار سیلان مواد در داخل حفره قالب بسته توسط روشهای تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تغییر شکل پلاستیک لوله آلومینیومی بطور کلی از سه قسمت اصلی تشکیل شده است به طوری که در مرحله نخست از فرایند شکل دهی با اعمال فشار از طرف سنبه بالایی و شروع سیلان پلاستیک ماده درون حفره قالب شمشال اولیه به حالت بشکه‌ای در می‌آید. بعد از اعمال نیروی بیشتر از جانب سنبه مواد شروع به سیلان در داخل حفره دندانه‌ها می‌کند، در این حالت به دلیل وجود اصطکاک به حالت بشکه‌ای در داخل حفره سیلان پیدا می‌کند و سرب داخل بیلت نیز به حالت بشکه‌ای سیلان پیدا می‌کند که لبه‌ها آن تیز می‌باشد شکل ۱۰ حالت نفوذ مواد به داخل حفره‌ها را نشان می‌دهد. در ادامه فرایند و حرکت بیشتر سنبه به پایین، سیلان مواد به داخل حفره قالب بیشتر شده و در نهایت با اعمال فشار بیشتر سنبه مواد در داخل حفره پر شده و شکل هندسی کامل چرخ دنده به صورت کاملاً یک پارچه بر روی لوله آلومینیومی ایجاد می‌شود. با مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی المان محدود مشاهده می‌شود که اگرچه الگوی کلی تغییر شکل و سیلان ماده در دو روش از تطابق مناسبی برخوردار است،

در نمونه تجربی گوشه‌های انتهایی دندانه‌ها به‌طور کامل پر نشده‌اند. این اختلاف ناشی از محدودیت ظرفیت پرس مورد استفاده در آزمایش است؛ به‌گونه‌ای که در مرحله پایانی شکل‌دهی، نیروی مورد نیاز برای پر کردن کامل گوشه‌های قالب بیش از ظرفیت دستگاه بوده و فرایند پیش از دستیابی به پرشدگی کامل متوقف شده است. در مقابل، در شبیه‌سازی عددی این محدودیت وجود نداشت و فرایند تا تکمیل کامل حرکت سنبه ادامه یافت؛ از این‌رو پرشدگی کامل حفره قالب در نتایج عددی مشاهده می‌شود. در شبیه‌سازی، حرکت سنبه به‌صورت جابه‌جایی کنترل‌شده تا رسیدن به انتهای کورس ادامه یافت؛ بنابراین نرم‌افزار محدودیتی از نظر ظرفیت پرس نداشت و پرشدگی کامل حفره قالب پیش‌بینی شد. شکل ۱۰ توزیع کرنش پلاستیک مؤثر حاصل از شبیه‌سازی المان محدود را در انتهای فرایند نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار کرنش در ناحیه ریشه دندانه ایجاد شده است.



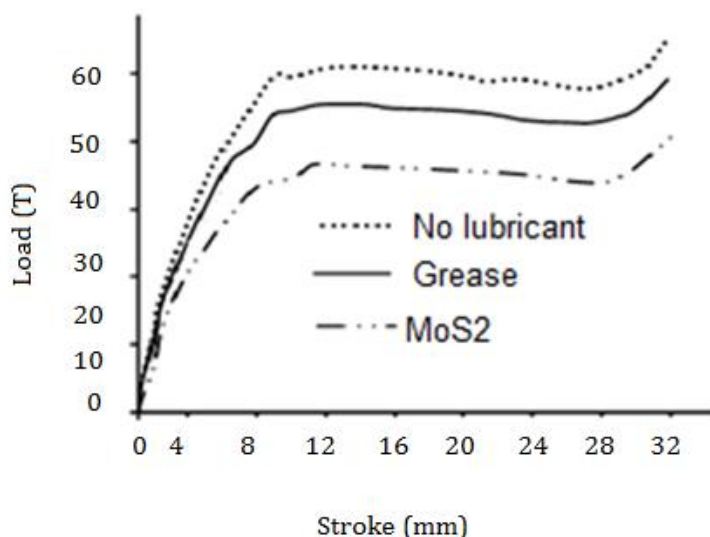
شکل ۹ مقایسه نمودار نیرو (تن) - جابجایی (میلی‌متر) فرایند شکل‌دهی تجربی و عددی در شرایط استفاده از روانکار دی‌سولفیدمولیبدن با ضریب اصطکاک ۰/۱۳



شکل ۱۰ رفتار سیلان ماده داخل حفره قالب در مراحل مختلف شبیه‌سازی عددی (توزیع کرنش پلاستیک مؤثر) و تجربی

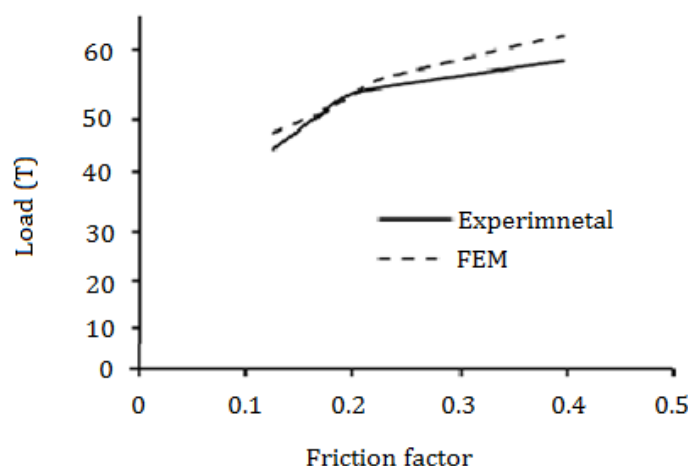
۳-۴- بررسی تأثیر شرایط روان‌کاری

تأثیر ضریب اصطکاک و نوع روان‌کار بر نیروی شکل‌دهی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج حاصله نشان می‌دهد، برای تولید قطعه نهایی، کاهش مقدار ضریب اصطکاک منجر به کاهش نیروی لازم شکل‌دهی شده است (شکل ۱۱). از دیدگاه مکانیک تماس، افزایش ضریب اصطکاک موجب افزایش تنش برشی تماسی در فصل مشترک قالب-قطعه‌کار شده و جریان ماده در راستای دیواره‌ها را محدود می‌کند. این محدودیت جریان، تمرکز کرنش پلاستیک مؤثر را در نواحی نزدیک به گوشه‌های قالب افزایش داده و در نتیجه نیروی سنبه مورد نیاز برای ادامه تغییر شکل افزایش می‌یابد. در مقابل، روانکارهایی با ضریب اصطکاک پایین‌تر با کاهش تنش برشی تماس، لغزش نسبی مناسب‌تری بین ماده و قالب ایجاد کرده و مسیر جریان ماده را یکنواخت‌تر می‌سازند. هنگامی که ضریب اصطکاک بالا باشد، نیروی بیشتری برای فشار دادن مواد از طریق قالب مورد نیاز است. این امر به این دلیل است که ماده مقاومت بیشتری را از دیواره‌های محفظه قالب تجربه می‌کند که باعث افزایش نیروی اصطکاک برخلاف جهت اکستروژن می‌شود. همچنین این امر منجر به افزایش نیروی سنبه اکستروژن مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت و فشار دادن مواد از طریق قالب می‌شود. برعکس، زمانی که ضریب اصطکاک پایین است، نیروی کم‌تری برای فشار دادن مواد از طریق قالب اکستروژن مورد نیاز است. به‌طور کلی، ضریب اصطکاک بین مواد تولیدی به روش اکستروژن و دیواره‌های محفظه عامل مهمی در تعیین نیروی سنبه اکستروژن است.



شکل ۱۱ نمودار نیرو- جابجایی در روانکارهایی با ضرایب اصطکاک مختلف در روش تجربی

شرایط روانکاری می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روی حداکثر نیروی شکل‌دهی در فرایند اکستروژن داشته باشد. نوع روانکار، روش روانکاری و میزان روانکاری بر حداکثر نیروی شکل‌دهی تأثیرگذار هستند. به‌طور کلی، شرایط روانکاری خوب می‌تواند به کاهش اصطکاک بین شمش و قالب اکستروژن در حین فرایند اکستروژن کمک کند. هنگامی که روانکاری کافی وجود نداشته باشد، اصطکاک بین بیل و قالب می‌تواند افزایش یابد و منجر به تنش و افزایش نیروهای مورد نیاز اکستروژن شود. با این حال، تعادلی بین شرایط روانکاری و متغیرهای فرایند اکستروژن، مانند دمای بیل و سرعت وجود دارد. روانکاری بیش از حد می‌تواند باعث مشکلاتی مانند جریان بیش از حد فلز یا پوشش ضعیف سطح شود که می‌تواند تأثیر منفی بر قسمت اکستروژن شده بگذارد. با توجه به توضیحات داده شده همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، با افزایش ضریب اصطکاک میزان نیروی حداکثر نیز افزایش می‌یابد. میزان حداکثر نیروی سنبه در حالت بدون روانکاری است، در حالی که در حالت روانکاری با دی‌سولفیدمولیبدن با ضریب اصطکاک ۰/۱۳ کمترین مقدار نیروی ماکزیموم شکل‌دهی می‌باشد. اختلاف در حدود ۴۰ درصد نیروی ماکزیموم در دو حالت بدون روانکاری و استفاده از روانکار دی‌سولفیدمولیبدن به خوبی میزان تأثیر نوع روانکار را در چنین فرایندهایی که به خودی خود نیاز به نیروی سنبه زیادی می‌باشد، نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل ۱۲ نشان می‌دهد، تطابق نتایج عددی و تجربی در بررسی اثر ضریب اصطکاک بر حداکثر نیروی شکل‌دهی با اختلافی کم‌تر از ۸ درصد قابل قبول است که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل عددی در پیش‌بینی رفتار فرایند می‌باشد.



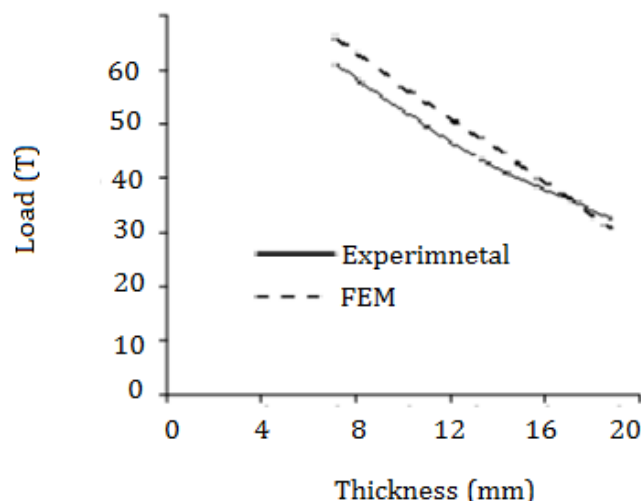
شکل ۱۲ نمودار تغییرات نیروی حداکثر بر حسب تغییرات مقدار ضریب اصطکاک در فرایند شکل‌دهی تجربی و عددی

یکی از پارامترهایی که چگونگی سیلان فلز را به صورت روشن بیان می‌کند پارامتر سرعت سیلان شعاعی مواد قطعه‌کار در مقاطع مختلف شکل‌دهی است. تاثیر ضریب اصطکاک بیشتر از آنکه در افزایش نیرو بروز یابد در نحوه سیلان فلز قطعه‌کار در حین فرایند نمایان می‌شود. افزایش ضریب اصطکاک در سطوح تماس بین قالب، سنبه و قطعه‌کار موجب افزایش تنش برشی اصطکاکی و کاهش قابلیت لغزش ماده روی سطوح ابزار می‌شود. در نتیجه، توزیع سرعت جریان ماده تغییر کرده و الگوی سیلان فلز در حین اکستروژن تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین حالتی شبیه به شبکه‌ای شدن در قطعه‌کار به وجود می‌آید که باعث می‌شود گوشه‌های قطعه‌کار در مراحل پایانی فرایند پر نشود و پر شدن قالب به نیروی بیشتری نیاز دارد.

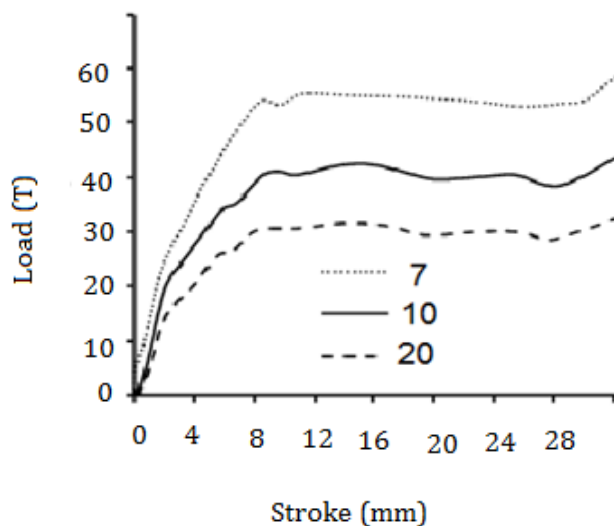
۳-۵- بررسی تاثیر ارتفاع چرخ‌دنده

در این بخش تاثیر ارتفاع چرخ‌دنده (h) که در شکل ۱ در شماتیک فرایند نیز نشان داده شده، در فرایند شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تاثیر تغییرات اندازه ارتفاع چرخ‌دنده، مقادیر مختلف ۷ و ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر از طریق شبیه‌سازی المان محدود و آزمایش‌ها تجربی مورد بررسی قرار گرفت. توضیح اینکه مقادیر سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است. اندازه قطر ۲۴ میلی‌متر و طول ۸۰ میلی‌متر برای مواد اولیه در تمام شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین برای ضریب اصطکاک بین سطح مشترک قالب و قطعه کار ۰/۲ نظر گرفته شد. تاثیر ارتفاع چرخ‌دنده در تغییرات نیروی حداکثر شکل‌دهی و همچنین تغییرات نیروی شکل‌دهی بر حسب جابجایی سنبه به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشخص است، با افزایش ارتفاع چرخ‌دنده، مقادیر نیروی حداکثر و همچنین نیرو بر حسب کورس کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۱۳، با افزایش میزان ارتفاع چرخ‌دنده، حداکثر نیروی شکل‌دهی نیز کاهش یافت. علت این امر این است که هر مقدار ارتفاع چرخ‌دنده کم‌تر باشد به نیروی بیشتری برای تغییر شکل نیاز است. در مقادیر کمتر از ارتفاع چرخ‌دنده، ماده ناچار به تحمل کرنش‌های پلاستیک بالاتر در حجم محدودتری است که این امر منجر به افزایش تنش جریان و نیروی سنبه می‌شود. در مقابل، افزایش مقدار ارتفاع چرخ‌دنده باعث کاهش نسبت تغییر شکل و تسهیل جریان ماده در قالب شده و نیروی شکل‌دهی کاهش می‌یابد. کاهش نیروی شکل‌دهی با افزایش مقدار ارتفاع چرخ‌دنده را نمی‌توان صرفاً به سهولت جریان ماده نسبت داد، بلکه این پدیده ناشی از برهم‌کنش هم‌زمان چند عامل مکانیکی و هندسی است. با افزایش مقدار ارتفاع چرخ‌دنده، نسبت تغییر شکل حجمی در ناحیه ارتفاع چرخ‌دنده کاهش می‌یابد؛ به این معنا که ماده برای دستیابی به هندسه نهایی، نیاز به تحمل کرنش پلاستیک مؤثر کم‌تری دارد. این موضوع به‌طور مستقیم باعث کاهش تنش جریان و در نتیجه کاهش نیروی سنبه می‌شود. از سوی دیگر، در مقادیر کمتر از ارتفاع چرخ‌دنده، محدودیت هندسی جریان ماده افزایش یافته و ماده ناچار است در یک ناحیه باریک‌تر تغییر شکل یابد. این امر منجر به افزایش گرادیان کرنش پلاستیک و شکل‌گیری نواحی با تمرکز تنش بالا در امتداد دیواره جانبی و ناحیه اتصال کف به دیواره می‌شود. افزایش تمرکز تنش، سهم مؤلفه تغییر شکل پلاستیک از نیروی سنبه را افزایش داده و به رشد قابل توجه نیروی شکل‌دهی می‌انجامد. همچنین افزایش مقدار ارتفاع چرخ‌دنده باعث کاهش نسبت سطح تماس به حجم

ماده در حال تغییر شکل می‌شود. کاهش این نسبت منجر به کاهش سهم اصطکاک از نیروی کل فرایند می‌گردد، زیرا در مقادیر کمتر از ارتفاع چرخ‌دنده، سهم نیروهای اصطکاکی در برابر نیروی تغییر شکل پلاستیک غالب‌تر است. بنابراین، با افزایش مقدار ارتفاع چرخ‌دنده، هم مؤلفه اصطکاکی و هم مؤلفه تغییر شکل پلاستیک نیروی سنبه کاهش می‌یابند. نتایج شبیه‌سازی المان محدود نیز این تحلیل را تأیید می‌کند؛ به گونه‌ای که توزیع کرنش پلاستیک مؤثر در مقادیر بیشتر از ارتفاع چرخ‌دنده، یکنواخت‌تر بوده و مقادیر بیشینه کرنش به‌طور محسوس کاهش یافته است. از طرف دیگر مطابق با نتایج تجربی بدست آمده در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ افزایش ارتفاع چرخ‌دنده منجر به افت محسوس نیروهای شکل‌دهی شده است. در شکل ۱۴ نیز نشان داده شده است که میزان ارتفاع چرخ‌دنده چه تأثیری بر روی میزان نیروی لازم برای شکل‌دهی دارد. منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش عددی تقریباً با نمودار تجربی تطابق دارد. مقدار اختلاف بین نمودار حاصل از شبیه‌سازی با نمودار به‌دست آمده از آزمایش تجربی در حدود ۷ درصد می‌باشد.



شکل ۱۳ نمودار تأثیر ضخامت‌های مختلف دیواره جانبی بر روی حداکثر نیروی شکل‌دهی تجربی و عددی

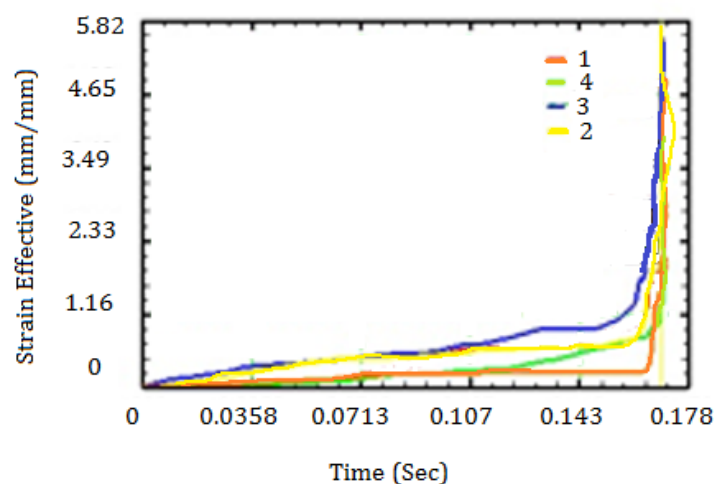


شکل ۱۴ نمودار نیرو-جابجایی بر حسب ضخامت دیواره جانبی قطعه‌کار در روش تجربی

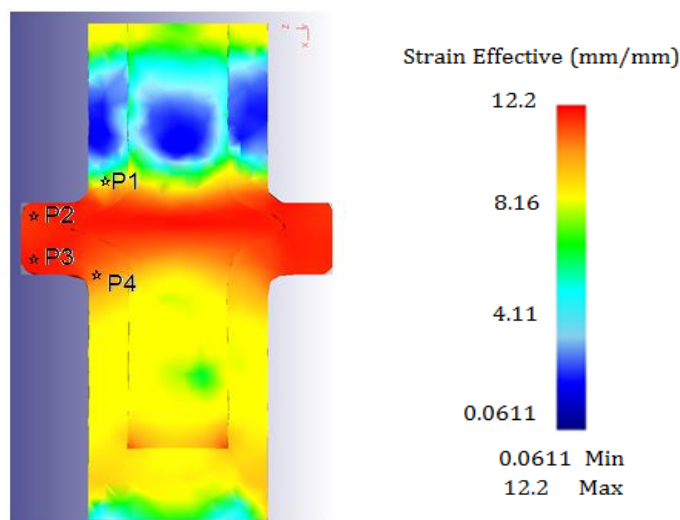
۳-۶- تغییرات سختی و کرنش پلاستیک مؤثر بر اساس نوع روانکار

پس از تولید قطعه، نمونه از صفحه تقارن برش داده شد و مطابق شکل ۱۶، سختی ویکرز در چهار نقطه واقع در ضخامت ناحیه چرخ‌دنده در نمونه‌های حاصل از آزمایش‌ها تجربی اندازه‌گیری گردید. محل انتخاب این نقاط به گونه‌ای است که تغییرات سختی از ریشه تا نوک دندان قابل بررسی باشد. علاوه بر این، توزیع کرنش پلاستیک مؤثر حاصل از شبیه‌سازی المان محدود نیز در همان مقطع و همان نقاط استخراج شد تا ارتباط بین میزان تغییر شکل پلاستیک و سختی موضعی قطعه مورد ارزیابی قرار گیرد. اندازه‌گیری مقدار سختی میانگین

و ماکروسکوپی یک قطعه کار توسط روش سختی‌سنجی برینل انجام گرفت. به‌طوری‌که مقدار سختی میانگین قطعه آلومینیوم ۶۰۶۱ بعد از آنیل حدود ۳۰ برینل شد. در ادامه روش سختی‌سنجی ویکرز به منظور بررسی تغییرات موضعی سختی در نواحی مختلف قطعه مشخص شده در شکل ۱۵ و در نمونه‌های تجربی و تحلیل ارتباط آن با کرنش پلاستیک مؤثر به‌کار گرفته شد. در شکل ۱۵-الف، تاریخچه کرنش پلاستیک مؤثر اعمال شده در نقاط P1 تا P4 از ابتدای جابجایی سنبه تا انتهای شکل‌گیری کامل چرخ‌دنده درون حفره قالب نشان داده شده است. همچنین مقادیر کرنش پلاستیک در انتهای فرایند نیز در همان نقاط بصورت کانتوری در شکل ۱۵-ب نشان داده شده است. مقادیر کرنش پلاستیک مؤثر اعمال شده در انتهای فرایند بصورت عددی در جدول ۲ نیز ارائه گردیده است. همانطوریکه از شکل ۱۵ مشخص است مقدار کرنش پلاستیک مؤثر اعمال شده در نقاط P2 و P3 که در منطقه اکستروژن شعاعی و سر دنده قرار دارند از سایر نقاط بیشتر می‌باشد. از آنجایی که این نقاط از منطقه تغییر شکل ۹۰ درجه عبور کرده و داخل کانال شعاعی قرار گرفته کرنشهای برشی قابل توجهی را تجربه کرده‌اند و در انتهای فرایند بیشترین مقدار کرنش پلاستیک مؤثر در این مناطق قابل مشاهده است. سختی ویکرز در نمونه‌های حاصل از آزمایش‌ها تجربی در نقاط مشابه اندازه‌گیری شده و نتایج بدست آمده در جدول ۲ ارائه شده است. همانطوریکه در جدول ۲ مشاهده می‌شود مقادیر سختی اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف یاد شده متناسب با مقادیر کرنش پلاستیک مؤثر اعمال شده در شبیه‌سازی عددی می‌باشد. بطوریکه نقاط P2 و P3 بیشترین مقدار سختی ویکرز را نشان می‌دهند. این یافته کاملاً منطبق بر یافته‌های تحقیقات دیگران در حوزه شکل‌دهی فلزات و ارتباط مستقیم کرنش پلاستیک مؤثر و سختی فلز در دمای اتاق است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۵ تاریخچه کرنش پلاستیک مؤثر اعمال شده در نقاط مختلف در الف) طول فرایند و ب) در انتهای فرایند در اکستروژن شعاعی چرخ‌دنده شبیه‌سازی

هنگامی که فلزی دچار تغییر شکل پلاستیک می شود، ماده با اعمال فشار بالا از طریق قالب جریان پیدا می کند. استفاده از روان کننده در این فرایند می تواند بر ویژگی های نهایی قطعه اکستروژن شده از جمله سختی آن تأثیر بگذارد. ضریب اصطکاک روان کننده مورد استفاده می تواند بر دما، فشار و سرعت فلز در حین اکستروژن تأثیر بگذارد. ضریب اصطکاک بالاتر معمولاً نیروی مورد نیاز برای اکستروژن را افزایش می دهد که می تواند به دلیل افزایش تغییر شکل پلاستیک منجر به مقدار سختی بالاتری شود. برعکس، ضریب اصطکاک کم تر به نیروی کم تری نیاز دارد و در نتیجه مقدار سختی کم تری ایجاد می شود. همان طور که گفته شد، عوامل زیادی وجود دارند که می توانند بر سختی نهایی قطعه اکستروژن شده تأثیر بگذارند که تأثیر ضریب اصطکاک روان کننده تنها یکی از آنها است. عوامل دیگر عبارتند از ترکیب فلز، دمای اکستروژن، سرعت و فشار فرایند اکستروژن و هرگونه عملیات حرارتی بعدی که ممکن است قطعه تحت تأثیر آن قرار گیرد. در شکل ۱۵ کرنش پلاستیک مؤثر ۱ حاصل از فرایند شبیه سازی نشان داده شده و مقادیر آن در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به توضیحات داده شده و مطابق جدول ۲، می توان گفت که با افزایش ضریب اصطکاک میزان سختی قطعه نیز افزایش یافته است. در بین نقاطی که سختی آن ها بررسی شده، نقطه سه به دلیل نزدیکی به انتهای نوک قطعه، سختی بیشتری دارد. لازم به توضیح است که سختی گزارش شده در جدول ۲ از قطعات آنیل شده می باشد.

جدول ۲ مقدار سختی و کرنش پلاستیک مؤثر در نقاط مختلف قطعات تولیدی و با روانکارهای مختلف در روش های تجربی و عددی

m=0.38		m=0.2		m=0.13		موقعیت
EPS	HV	EPS	HV	EPS	HV	
2.8	389	2.7	385	1.1	345	P1
3.7	456	1.88	362	2.8	390	P2
5.1	495	4.8	480	3.5	440	P3
1.9	358	2.85	400	1.7	352	P4

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، قابلیت تولید چرخ دنده ساده یکپارچه بر روی محور توخالی از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از ماده واسط فشارنده سربی به روش اکستروژن شعاعی در دمای محیط، به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی قادر است بدون بروز کمزش داخلی لوله، قطعه را با پرشدگی مناسب قالب تولید کند. همچنین تطابق مناسب نتایج شبیه سازی المان محدود با نتایج تجربی، بیانگر اعتبار مدل عددی در پیش بینی رفتار تغییر شکل ماده و نیروی شکل دهی است. مهم ترین یافته های این پژوهش به شرح زیر است:

- استفاده از ماده واسط فشارنده از جنس سرب، با ایجاد توزیع مناسب فشار در داخل لوله، موجب بهبود تغییر شکل پلاستیک و جلوگیری از کمزش داخلی در حین اکستروژن شعاعی شد و امکان تولید موفق چرخ دنده یکپارچه را فراهم کرد.
- مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی المان محدود نشان داد که مدل عددی، علاوه بر پیش بینی مناسب سیلان ماده، قادر است روند تغییرات نیروی شکل دهی را نیز با دقت قابل قبول پیش بینی کند؛ به گونه ای که اختلاف بین نتایج عددی و تجربی حدود ۷ درصد به دست آمد.
- بررسی اثر ارتفاع چرخ دنده نشان داد که با افزایش این پارامتر، بیشینه نیروی شکل دهی کاهش می یابد. همچنین منحنی های نیرو-جابجایی بیانگر آن است که فرایند شکل دهی شامل سه مرحله اصلی، یعنی بشکته ای شدن اولیه، پر شدن تدریجی حفره های چرخ دنده و پر شدن کامل گوشه های قالب است که بیشترین نیروی شکل دهی در مرحله نهایی مورد نیاز است.
- نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع چرخ دنده موجب دشوارتر شدن پرشدگی کامل حفره های قالب و گوشه های چرخ دنده می شود؛ بنابراین انتخاب مناسب این پارامتر نقش مهمی در دستیابی همزمان به کیفیت شکل دهی و کاهش نیروی مورد نیاز فرایند دارد.
- افزایش ضریب اصطکاک موجب افزایش کرنش پلاستیک مؤثر و در نتیجه افزایش سختی موضعی در نواحی مختلف چرخ دنده گردید که بیانگر ارتباط مستقیم شرایط اصطکاک با میزان کار سختی قطعه است.

¹ Effective Plastic Strain (EPS)

در این پژوهش، از سرب به عنوان محیط انتقال فشار استفاده شد. انتخاب این ماده به دلیل شکل‌پذیری زیاد، قابلیت انتقال مناسب فشار و امکان اجرای فرایند بدون نیاز به سامانه‌های پیچیده هیدرولیکی انجام شد. در پایان فرایند نیز سرب به دلیل عدم ایجاد اتصال متالورژیکی با قطعه آلومینیومی، به صورت مکانیکی از داخل قطعه خارج شده و قابلیت استفاده مجدد را دارد. با این حال، استفاده از سرب با محدودیت‌هایی نظیر ملاحظات زیست‌محیطی، مسائل بهداشتی و وزن نسبتاً زیاد همراه است؛ از این رو انتخاب محیط انتقال فشار باید با توجه به شرایط فنی، اقتصادی و الزامات کاربردی انجام گیرد.

از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به بررسی تنها یک آلیاژ آلومینیوم، استفاده از یک نوع ماده واسط فشارنده و انجام آزمایش‌ها در شرایط دمای محیط اشاره کرد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، امکان استفاده از مواد واسط جایگزین با مخاطرات زیست‌محیطی کمتر، بررسی رفتار سایر آلیاژهای آلومینیوم و مطالعه اثر پارامترهایی نظیر دما، سرعت شکل‌دهی و هندسه‌های پیچیده تر قطعات بر کیفیت شکل‌دهی و نیروی فرایند مورد بررسی قرار گیرد.

References

- [1] Modanloo V, Akhouni B, Dadgar Asl Y. Minimizing the required forming force in the sheet hydroforming process using a fractional factorial design. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023;9(12):1-9. doi: 10.22034/IJME.2023.400065.1788 [In Persian]
- [2] Giarmas E, Tzetzis D. Optimization of die design for extrusion of 6xxx series aluminum alloys through finite element analysis: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022 Apr;119(9):5529-51. doi: 10.1007/s00170-022-08694-3
- [3] Hu Z, Zheng J, Hua L, Sun Q. Investigation of forging formability, microstructures and mechanical properties of pre-hardening Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024 Dec 12;131:2082-100. doi: 10.1016/j.jmapro.2024.10.004
- [4] Kalpakjian S, Schmid S. *Manufacturing, engineering and technology SI 6th edition-serope kalpakjian and stephen schmid: manufacturing, engineering and technology*. Digital Designs; 2006.
- [5] Pale JA, Altan T. Development of equipment and capabilities for investigation of the multi-action forming of complex parts. Report No.: ERC/NSM-B-89-28. Columbus (OH): Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University; 1989 Jul.
- [6] Cho HY, Min GS, Jo CY, Kim MH. Process design of the cold forging of a billet by forward and backward extrusion. *Journal of materials processing technology*. 2003 Apr 20;135(2-3):375-81. doi: 10.1016/S0924-0136(02)00870-1
- [7] Jafarzadeh H, Barzegar S, Babaei A. Analysis of deformation behavior in backward-radial-forward extrusion process. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2015 Apr;68(2):191-9. doi: 10.1007/s12666-014-0441-4
- [8] Ebrahimzadeh S, Jafarzadeh H. The influences of radial-forward-backward extrusion on the microstructure and mechanical evolution of AM60 magnesium alloy by experimental and finite element micromechanical based cellular automaton approach. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Nov 21;7(9):25-41. [In Persian]
- [9] Jafarzadeh H, Zadshakoyan M, Abdi Sobbouhi E. Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010 Jul 30;25(8):857-63. doi: 10.1080/10426910903536741
- [10] Farhoumand A, Ebrahimi R. Analysis of forward-backward-radial extrusion process. *Materials & Design*. 2009 Jun 1;30(6):2152-7. doi: 10.1016/j.matdes.2008.08.025
- [11] Alaswad A, Benyounis KY, Olabi AG. Tube hydroforming process: A reference guide. *Materials & Design*. 2012 Jan 1;33:328-39. doi: 10.1016/j.matdes.2011.07.052
- [12] Bell C, Corney J, Zuelli N, Savings D. A state of the art review of hydroforming technology: Its applications, research areas, history, and future in manufacturing. *International Journal of Material Forming*. 2020 Sep;13(5):789-828. doi: 10.1007/s12289-019-01507-1
- [13] Chen G, Yao SJ, Chen BG, Chu GN. Research on tube hydro-forming process of trapezoid-sectional parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 Mar;107(3):1901-8. doi: 10.1007/s00170-020-05151-x
- [14] Politis DJ, Lin J, Dean TA, Balint DS. An investigation into the forging of Bi-metal gears. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014 Nov 1;214(11):2248-60. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.04.020
- [15] Alzahrani B, Ngaile G. Preliminary investigation of the process capabilities of hydroforming. *Materials*. 2016 Jan 12;9(1):40. doi: 10.3390/ma9010040

- [16] Magrinho JP, Ferreira MF, Martins PA, Silva MB. Injection Forging of Thin-Walled Tubes. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2026;9:430-9. doi: [10.1016/j.ijlmm.2025.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2025.07.001)
- [17] Li HX, Wang K, Luo R, Zhu ZZ, Deng S, Luo R, Zhang JY, Fang FS. Influence of radial forging process on strain inhomogeneity of hollow gear shaft using finite element method and orthogonal design. *Journal of Central South University*. 2020 Jun;27(6):1666-77. doi: [10.1007/s11771-020-4398-7](https://doi.org/10.1007/s11771-020-4398-7)
- [18] Winiarski G, Gontarz A, Samołyk G. Theoretical and experimental analysis of a new process for forming flanges on hollow parts. *Materials*. 2020 Sep 15;13(18):4088. doi: [10.3390/ma13184088](https://doi.org/10.3390/ma13184088)
- [19] Soleymanipoor A, Maeno T. Effect of Pulsating Motion Conditions on Relubrication Behavior and Dimensions of Laterally Extruded Internal Gears. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2025 Jun 10;9(6):190. doi: [10.3390/jmmp9060190](https://doi.org/10.3390/jmmp9060190)
- [20] Achuthankutty A, Narayanan K, Ramesh A, Velamati RK. A Comprehensive Investigation on Shell Hydroforming of AA5052 Through Numerical Modeling and Experimental Analysis. *Symmetry*. 2025 Jun 23;17(7):989. doi: [10.3390/sym17070989](https://doi.org/10.3390/sym17070989)
- [21] Ebrahimi R, Najafizadeh A. A new method for evaluation of friction in bulk metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004 Oct 20;152(2):136-43. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2004.03.029](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.029)