



بررسی قابلیت تولید قطعه برنجی محوری فلنچدار با استفاده از روش اکستروژن شعاعی- غیرمستقیم

حسین جعفرزاده^{۱*}، الیاس حدادی^۲، محرم شاملی^۳

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۳- پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: h.jafarzadeh@iaut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در پژوهش حاضر قابلیت تولید قطعه محوری فلنچدار از جنس آلیاژ برنجی C26000 با استفاده از روش اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم به صورت سرد و تحت شرایط تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، مجموعه قالب لازم برای تولید نمونه‌ها طراحی و ساخته و سپس با استفاده از پرس هیدرولیکی محصول نهایی تولید شد. به منظور شبیه‌سازی فرایند، از نرم‌افزار DEFORM استفاده شد و اثر هندسه قالب و ضریب اصطکاک بر روی خصوصیات محصول نهایی مانند توزیع سختی، پرشدگی قالب و سیلان مواد و نیروی سنبه تحلیل گردید. بالاترین سختی (۷۱ ویکرز) مربوط به قسمت فلنجی قطعه‌کار بود که به دلیل کارسختی و ریزش‌دهی دانه‌ها به این سختی دست یافت. ضریب اصطکاک از روش اصلاح شده فشردگی استوانه و در شرایط روغن‌کاری با گریس و با توجه به پارامترهای به‌کار گرفته شده محاسبه و مقدار ۰/۰۸ به دست آمد. بررسی ریزساختار نمونه‌ها نیز نشان داد که اندازه دانه از مقدار اولیه حدود ۴۰۰ میکرومتر به مقادیر ۲۲۰ تا ۲۶۱ میکرومتر در نواحی مختلف قطعه کاهش یافته است که ناشی از کرنش پلاستیک بالا و افزایش چگالی نابجایی‌ها در فرایند شکل‌دهی سرد می‌باشد. نتایج نمودار نیرو-جابجایی تجربی و عددی حاصل از اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم با هم‌دیگر تطابق خوبی داشتند، به‌گونه‌ای که اختلاف آن‌ها در بحرانی‌ترین حالت حداکثر ۱۰ درصد بود. نتایج نشان داد که فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم قابلیت بالایی در تولید قطعات فلنچدار برنجی در دمای اتاق دارد و شبیه‌سازی عددی می‌تواند به‌خوبی رفتار واقعی ماده را پیش‌بینی نماید.

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۱ تیر ۱۴۰۴

پذیرش: ۲۷ آبان ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم

برنج ۷۰-۳۰

شکل‌دهی سرد

ضریب اصطکاک

Investigating the feasibility of producing flanged axial brass parts using the radial-backward extrusion method

Hossein Jafarzadeh^{1*}, Elyas Haddadi², Moharram Shameli³

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Tabriz branch, Tabriz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

3- Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran

* Corresponding Author's Email: h.jafarzadeh@iaut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 12 July 2025

Accepted: 18 November 2025

Keywords:

Radial-Backward Extrusion

70-30 Brass

Cold Forming

Friction Coefficient

Abstract

The present research investigates the feasibility of producing a flanged axial component from C26000 brass alloy using the radial-backward cold extrusion process under both experimental and numerical conditions. To this end, a dedicated die set was designed and manufactured to fabricate the samples, and the final product was produced using a hydraulic press. The process was simulated using DEFORM software, analyzing the effects of die geometry and friction coefficient on the final product characteristics, including hardness distribution, die filling, material flow, and punch force. The highest hardness value (71 Vickers) was observed in the flange region of the workpiece, attributed to work hardening and grain refinement. The friction coefficient, determined through a modified cylinder compression test under grease-lubricated conditions, was calculated to be 0.08. Microstructural analysis revealed that the grain size decreased from an initial value of approximately 400 μm to a range of 220-261 μm across different regions of the component, resulting from high plastic strain and increased dislocation density during the cold forming process. The experimental and numerical force-displacement curves obtained from the radial-backward extrusion process exhibited good agreement, with a maximum discrepancy of 10% in the most critical condition. The results demonstrate that the radial-backward cold extrusion process offers high potential for producing flanged brass components at room temperature, and numerical simulation can effectively predict the material's actual behavior.

Please cite this article using:

Jafarzadeh H, Haddadi E, Shameli M. Investigating the feasibility of producing flanged axial brass parts using the radial-backward extrusion method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Sep 23;12(7):49-63. doi: 10.22034/ijme.2025.533557.2104 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

هم‌زمان با توسعه روزافزون صنعت شکل‌دهی فلزات و نیز هزینه‌های قابل توجه طراحی و انجام آزمایش‌های تجربی، مهندسان این حوزه بر آن شده‌اند که با ارائه روش‌های کنترل کیفیت قبل از فرایند، زمان و هزینه‌های تولید را کاهش داده و طراحی قابلیت اطمینان بالاتر ارائه دهند [۱، ۲]. با پیشرفت سریع و روزافزون صنعت، نیاز به قطعاتی با استحکام بالا، صافی سطح بالا، دقت ابعادی و هندسی بالا، شکل پیچیده، مقاومت به سایش بالا و نرخ تولید بالا احساس می‌شود. پروسه‌های مختلف ساخت قطعات نظیر ریخته‌گری، فورج، ماشین‌کاری، ورق‌کاری و غیره از پروسه‌های شناخته شده‌ای هستند، که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. فرایند اکستروژن به عنوان یکی از روش‌های شکل‌دهی دقیق فلزات و به دلیل قابلیت‌های بالا، یکی از روش‌های کارآمد تولید قطعات می‌باشد.

فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید^۱ به‌عنوان گروهی از فرایندهای شکل‌دهی فلزات معرفی شده‌اند که در این فرایندها کرنش پلاستیک بسیار زیادی به فلز با حجم مشخصی اعمال می‌گردد [۳]. نتیجه این کرنش شدید پلاستیک اعمال شده، پالایش و ریزش دانه‌ها می‌باشد که این امر منجر به بهبود بسیاری از خواص ماده می‌شود [۴]. تغییرشکل پلاستیک شدید یک روش بهینه جهت ریز دانه کردن و همچنین تولید مواد با نانو ساختار بسیار ریز است [۵]. با استفاده از روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید، می‌توان مقدار بالایی از کرنش پلاستیک را به مواد اعمال نمود [۶، ۷].

بیشتر قطعات آهنگری سرد بر اساس تجربه و آزمون و خطا تولید می‌شوند که باعث هزینه بالای تولید و زمان‌بر بودن می‌شود. اهمیت تجزیه و تحلیل برای فرایند اکستروژن در تعیین بار شکل‌دهی، ویژگی‌های جریان، دما و حالت تنش و کرنش نهفته است [۸]. فرایند اساسی درگیر در اکستروژن سرد بسته به جهت شکل‌دهی آن‌ها به صورت اکستروژن رو به جلو، عقب و شعاعی یا جانبی طبقه‌بندی می‌شود. قطعات پیچیده مانند فلنج‌های یقه‌ای، چرخ‌دنده‌های ساده، اسپلین‌ها با شفت‌ها و اتصالات لوله، چند نمونه از محصولات هستند که با اکستروژن شعاعی تولید می‌شوند. فرایندهای اکستروژن هم‌زمان ترکیبی وجود دارد که در آن‌ها یک شمش به طور هم‌زمان در جهت‌های جلو، عقب و شعاعی (جانبی) از طریق چندین روزه در مجموعه ابزار اکستروژن می‌شود.

اکستروژن شعاعی^۲ برای تولید قطعاتی که برآمدگی به صورت شعاعی دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹، ۱۰]. برخلاف اکستروژن مستقیم و اکستروژن غیرمستقیم که ماده در جهت موازی با پانچ یا قالب سیلان می‌کند، در اکستروژن شعاعی ماده در جهت عمود بر حرکت پانچ نیز سیلان می‌کند؛ اما برای تولید قطعات پیچیده مانند چرخ‌دنده‌ها، اتصالات برای چسباندن لوله‌ها به همدیگر و سایر موارد شناخته شده از ترکیب اکستروژن شعاعی با فرایند دیگری مانند اکستروژن مستقیم و یا معکوس استفاده می‌شود. تعدادی از این فرایندها شامل اکستروژن شعاعی معکوس-مستقیم [۱۱]، اکستروژن معکوس-مستقیم [۱۲]، اکستروژن معکوس دو مرحله‌ای [۱۳] و اکستروژن چند مرحله‌ای [۱۴] می‌باشند.

با توجه به این که برنج به دلیل دارا بودن، مقاومت به سایش بالا، ضریب اصطکاک پایین و مقاومت در برابر اکسیداسیون همواره مورد توجه صنایع بوده است. بنابراین در این تحقیق به بررسی قابلیت تولید قطعات برنجی محوری فلنج‌دار با استفاده از برنج ۷۰-۳۰ پرداخته شده است. از آنجایی که تولید قطعات با روش‌های ریخته‌گری و سایر روش‌های شکل‌دهی، همراه با صافی سطح کم، استحکام کم، تolerانس‌های ابعادی و هندسی کم، نیاز به عملیات ثانویه (ماشین‌کاری، شات‌پلاست و غیره) و همچنین هزینه تولید بالا می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق روش اکستروژن برای تولی به کار گرفته شده است. از خصوصیات این فرایند می‌توان به دقت بالای تolerانس‌های ابعادی و هندسی، تولید قطعات دارای هندسه پیچیده، استحکام بالا و هزینه پایین تولید اشاره نمود.

چوی و همکاران [۱۵] اولین کسانی بودند که اثر پارامترهای مؤثر بر فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم را با استفاده از روش تجربی و روش شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها داده‌های تجربی را با داده‌های حاصل از شبیه‌سازی از لحاظ نیروی شکل‌دهی و سیلان فلز مقایسه کردند و نشان دادند که تأثیر هندسه قالب خصوصاً شعاع و ارتفاع شکل‌دهی بر نیروی شکل‌دهی بیشتر از سایر پارامترها اثرگذار است. جعفرزاده و همکاران [۱۶] به بررسی آنالیز رفتار تغییرشکل مواد با استفاده از فرایند اکستروژن شعاعی ترکیب شده با اکستروژن مستقیم و غیرمستقیم به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی پرداختند. در این تحقیق آن‌ها پارامترهای هندسی مؤثر بر روی نحوه سیلان ماده در داخل مجموعه قالب و همچنین نیروی لازم جهت شکل‌دهی فرایند بر روی آلیاژ آلومینیوم

¹ Severe Plastic Deformation (SPD)

² Radial Extrusion

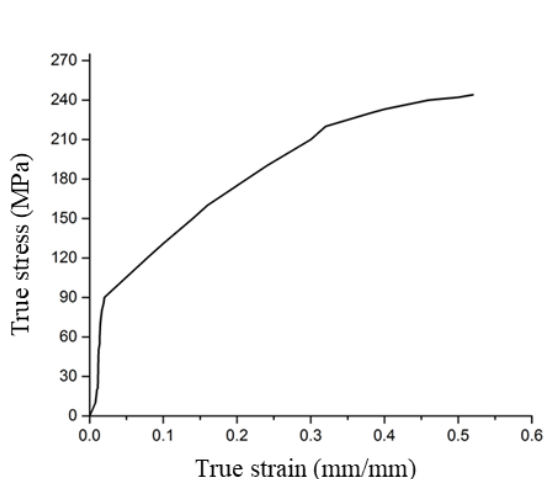
AA1050 مورد مطالعه و بررسی قرار دادند [۱۶]. جعفرزاده و همکاران [۱۷] به مطالعه عددی بر روی پارامترهای مهم و اثرگذار طراحی بر روی فرایند اکستروژن شعاعی بر روی الومینیوم AA6063 پرداختند. فرهمند و همکاران [۱۸] آنالیز اکستروژن شعاعی-مستقیم-غیرمستقیم را با استفاده از روش تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنان با استفاده از شبیه‌سازی عددی اثر پارامترهای هندسی و اصطکاک بر روی سیلان مواد، نیروی لازم جهت فرایند و توزیع کرنش را مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی این تحقیق، بررسی قابیت تولید قطعات محوری فلنج‌دار از آلیاژ برنج ۳۰-۷۰ با استفاده از فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم در دمای اتاق است. نوآوری این مطالعه در آن است که با ترکیب روش‌های شبیه‌سازی عددی المان محدود و آزمایش‌های تجربی، امکان ارزیابی دقیق رفتار سیلان ماده، تغییرات نیروی شکل‌دهی و تأثیر پارامترهای کلیدی فرایند بر کیفیت قطعه بدون نیاز به انجام آزمایش‌های تجربی گسترده فراهم شده است. این روش می‌تواند به عنوان یک رویکرد کارآمد برای طراحی و بهینه‌سازی فرایند اکستروژن سرد قطعات پیچیده فلنج‌دار در صنایع مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش آزمایش

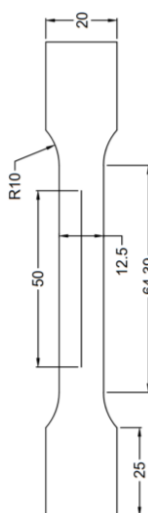
۲-۱- مواد و روش‌ها

جنس ماده اولیه مورد استفاده مطابق استاندارد UNS آلیاژ برنج C26000 می‌باشد که به صورت تجاری به برنج ۳۰-۷۰ معروف است. آلیاژ ۳۰-۷۰ از جمله آلیاژهای برنج رایج است که با نام تجاری برنج فشنگ نیز شناخته می‌شود. این آلیاژ در حالت معمولی حاوی ۷۰ درصد مس و ۳۰ درصد روی بوده و در حالت‌های خاص به ترتیب حداکثر ۰/۶ و ۰/۷ درصد آهن و سرب دارند. این آلیاژ تک‌فازی بوده و شامل یک محلول جامد الف با ساختار FCC است. از ویژگی‌های این آلیاژ قابلیت شکل‌پذیری عالی آن در فرایندهای شکل‌دهی سرد مثل اکستروژن می‌باشد. کوانتومتری انجام شده روی این نمونه نشان دهنده ۷۱/۰۱ درصد مس، ۲۸/۹۳ درصد روی، ۰/۱ درصد سرب، ۰/۰۲ درصد آهن و ۰/۱۸ درصد نیکل بوده است.

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 ده میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. شکل ۱-الف دستگاه کشش، شکل ۱-ب هندسه نمونه تست کشش و شکل ۱-ج منحنی تنش-کرنش را نشان می‌دهد. همچنین درصد ازیاد طول (۶۴ درصد)، تنش تسلیم (۹۰ مگاپاسکال) و تنش نهایی (۲۲۴ مگاپاسکال) مطابق نمودار فوق به دست آمد.



(ج)



(ب)

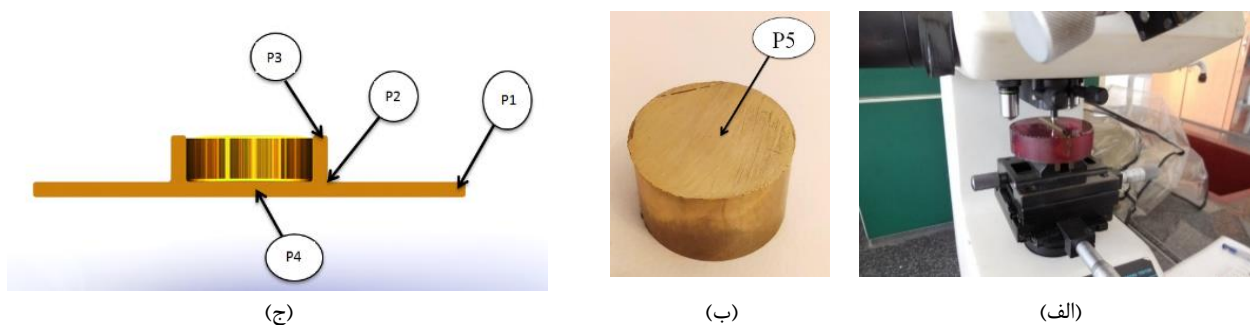


(الف)

شکل ۱ (الف) دستگاه کشش، (ب) هندسه نمونه تست کشش و (ج) منحنی تنش-کرنش

به منظور اندازه‌گیری سختی فلز پایه و فلز تغییرشکل داده شده، دستگاه سختی‌سنج با نشانگر ویکرز مورد استفاده قرار گرفت. سختی‌سنجی توسط دستگاه MICROMENT ساخت شرکت LHOH، با وزنه ۱۰۰ گرم و به مدت ۱۵ ثانیه در نقاط p4، p3، p2، p1 در

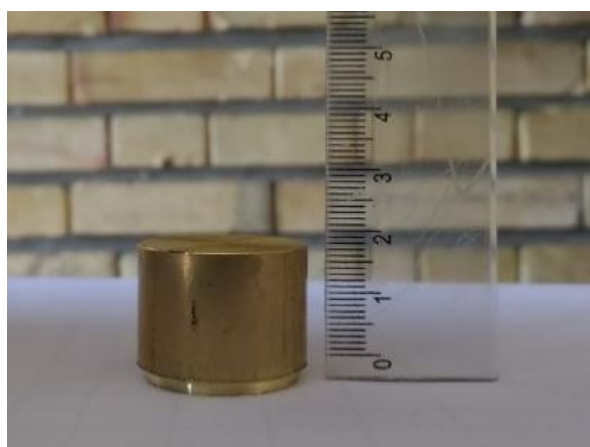
نمونه تغییرشکل داده شده و نقطه p5 در نمونه اولیه انجام گرفت. عدد سختی به دست آمده برای هر نقطه، از میانگین سه اثر در آن نقطه به دست آمده است. شکل ۲ دستگاه سختی سنج همراه با نمونه اولیه و تغییرشکل داده شده را نشان می دهد.



شکل ۲ الف) دستگاه سختی سنج، ب) نمونه اولیه و ج) نمونه تغییرشکل داده شده

۲-۲- آماده سازی نمونه آزمایش تجربی

پس از تهیه آلیاژ برنج C26000 نظر به اینکه باید حجم بیلت اولیه و حجم قطعه فلنجی یکسان باشد، با استفاده از نرم افزار حجم قطعه مورد مطالعه استخراج گردید و با اطلاع از چگالی ماده ارتفاع بیلت اولیه محاسبه گردید. که بیلتی با ارتفاع ۱۸/۵ میلی متر و به قطر ۲۷/۵۴ میلی متر جهت استفاده در آزمایش های تجربی با ماشین کاری تهیه شد. شکل ۳ بیلت اولیه مورد استفاده را نشان می دهد.

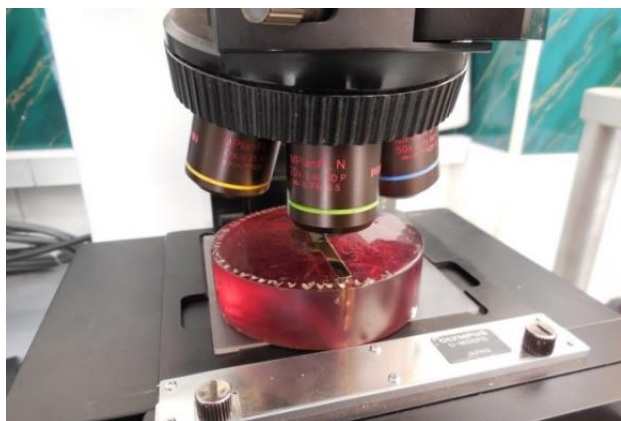


شکل ۳ بیلت اولیه

۲-۳- متالورژی و ریزساختار

به منظور بررسی ساختار ماده و تغییرات دانه بندی آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق و مقایسه وضعیت دانه ها قبل و بعد از شکل دهی، لازم است تا متالوگرافی بر روی نمونه ها صورت گیرد، بدین منظور از نمونه تولید شده مقطع زده شد، نمونه های متالوگرافی مطابق شکل ۴ برش کاری و سپس برای انجام عملیات مانت سرد آماده شدند. نمونه های مانت شده جهت دستیابی به صافی سطح مناسب توسط ورقه های سمباده تا درجه ۵۰۰۰ سمباده زنی و سپس با استفاده از دو نمده پولیش اولیه و ثانویه و پودرهای آلومینای ۷ و ۷/۵ میکرون عملیات پولیش بر روی سطح نمونه ها انجام گرفت. پس از آماده سازی سطح مورد نظر از محلول اچانت^۱ به منظور واضح سازی ساختار استفاده گردید. محلول اچانت مورد استفاده برای برنج C26000 محلول الکلی کلروفوریک می باشد [۱۹]. در ادامه، برای مشاهده ساختار نمونه اولیه و تغییرشکل داده شده از میکروسکوپ نوری و با بزرگنمایی های مختلف استفاده شد. شکل ۴ نمونه مانت شده و میکروسکوپ نوری استفاده شده را نشان می دهد.

^۱ Etchant



(ب)

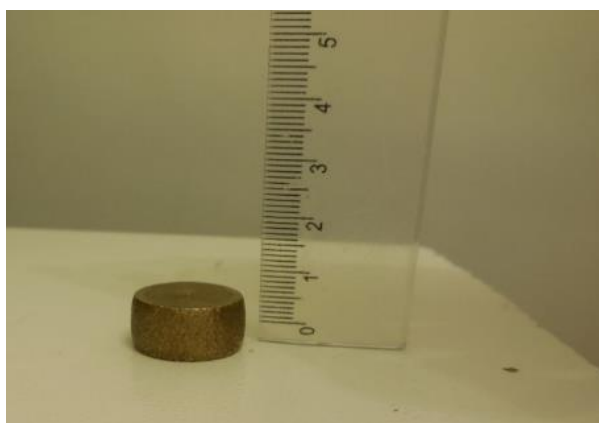


(الف)

شکل ۴ الف) نمونه تغییرشکل یافته و مقطع زده شده و ب) دستگاه میکروسکوپ نوری

۲-۴- بر آورد ضریب اصطکاک

برای به دست آوردن ضریب اصطکاک از روش اصلاح شده فشردگی استوانه که برای اولین بار توسط ابراهیمی و نجفی زاده ارائه گردید، استفاده شد [۲۰]. ضریب اصطکاک به دست آمده با نتایج روش فشردگی رینگ مطابقت قابل قبولی داشت. تنها حسن این روش عدم نیاز به تهیه نمونه در حالت رینگی می باشد به طوریکه می توان از قطعه کار بعد از مرحله سندان، برای تعیین ضریب اصطکاک استفاده کرد (شکل ۵). روشی که ابراهیمی و نجفی زاده برای تعیین ضریب اصطکاک بین قطعه کار و قالب استفاده کرده است، توسعه روابط تحلیلی حد بالا برای آپست کردن^۱ استوانه و سپس استخراج رابطه مستقل برای ضریب اصطکاک می باشد (رابطه ۶). در این مطالعه با توجه به دقت نتایج و همچنین به دلیل انجام آزمایش های تجربی در دمای اتاق و نیز آسانی تهیه نمونه های مورد نظر، برای تعیین ضریب اصطکاک از طریق آزمایش فشار استوانه ای، از این روش برای تعیین ضریب اصطکاک برشی استفاده شد.



(ب)

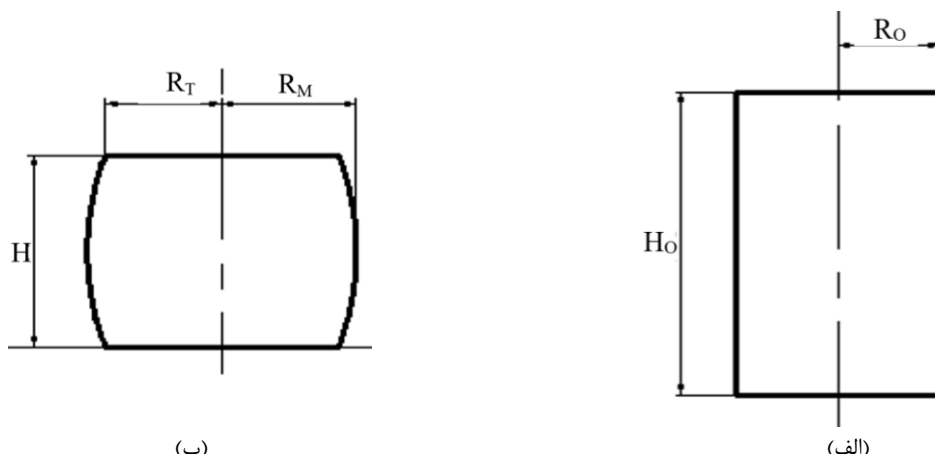


(الف)

شکل ۵ الف) دستگاه پرس و نمونه و ب) نمونه حاصل از آزمایش فشردگی استوانه برای تعیین ضریب اصطکاک

برای به دست آوردن ضریب اصطکاک نمونه، نمونه ای با طول اولیه H_0 ۱۶ میلی متر و قطر $2R_0$ ۱۶ میلی متر از برنج ماشینکاری شد و نمونه توسط دستگاه پرس حدوداً به نصف ارتفاع اولیه فشرده شد (شکل ۶). شماتیک نمونه تغییرشکل یافته در شکل ۶-ب نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نمونه با گریس در هنگام فشردگی توسط دستگاه پرس روانکاری شد. با استفاده از روابط ۱ تا ۶ و با استفاده از اندازه گیری پارامترهای لازم، نتایج تجربی به دست آمد [۲۰]. با توجه به روابط فوق و پارامترهای قطعه کار و شرایط اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم مقدار ضریب اصطکاک تحت شرایط روانکاری با گریس برابر با ۰/۰۸ در نظر گرفته شد.

¹ Cylinder Upset



شکل ۶ الف) شماتیک قطعه خام اولیه و ب) شماتیک قطعه بعد از مرحله آپست [۲۰]

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

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

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

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

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

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

که در آن ها 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 بشکته ای شدن و m ضریب اصطکاک می باشد.

۲-۵- شبیه سازی عددی فرایند

تغییر شکل پلاستیک ماده در حین فرایند اکستروژن با استفاده از مدل سازی متقارن محور^۱ در محیط نرم افزار DEFORM انجام گرفت. در این راستا، مجموعه اجزای تشکیل دهنده قالب به دلیل تغییر شکل ناچیز در مقایسه با تغییر شکل قطعه کار به صورت صلب^۲ در نظر گرفته شد. همچنین به دلیل تغییر شکل های پلاستیک بزرگ در قطعه کار از تغییر شکل الاستیک ماده نیز به دلیل ناچیز بودن آن صرف نظر شد. 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 های تجربی در روان کاری با گریس ۰/۰۸ در نظر گرفته شد. سرعت حرکت سنبه نیز مشابه با آزمایش های تجربی برابر ۱۰ (mm/min) تنظیم شد. بیلت اولیه با استفاده از المان های تتراهدرال^۴ که برای تحلیل مسائل شکل دهی مناسب می باشند، با اندازه و توزیع یکنواخت گسسته سازی شده و مش بندی گردید. جهت جلوگیری از اعوجاج^۵ بیش از حد المان ها در حین تغییر شکل پلاستیک فرایند اکستروژن از الگوریتم های مش بندی مجدد^۶ استفاده شد.

¹ Axisymmetric

² Rigid

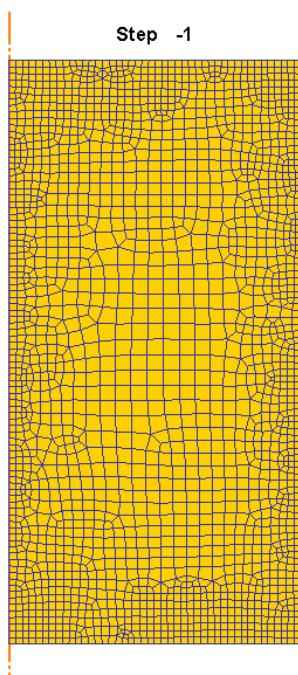
³ Interaction

⁴ Tetrahedral

⁵ Element Distortion

⁶ Remeshing

شکل ۷ نمونه‌ای از بیلت اولیه مش بندی شده جهت انجام شبیه سازی عددی در بستر نرم افزار DEFORM را نشان می دهد. 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 گرفته است. تمامی ابعاد و اندازه های قالب و قطعه کار مشابه آزمایش های تجربی در نظر گرفته شد. مش اولیه شامل حدود ۵۰۰۰۰ المان تراهدرال با اندازه متوسط ۰/۲ میلی متر بود. جهت اطمینان از استقلال نتایج نسبت به اندازه المان، آزمون حساسیت مش انجام شد. در این آزمون سه شبکه با اندازه متوسط المان های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ تحلیل شدند. مقایسه نتایج نشان داد که اختلاف نیروی شکل دهی در دو مش ریز متوالی کمتر از ۳٪ است، لذا مش با اندازه ۰/۲ میلی متر به عنوان شبکه بهینه انتخاب شد.

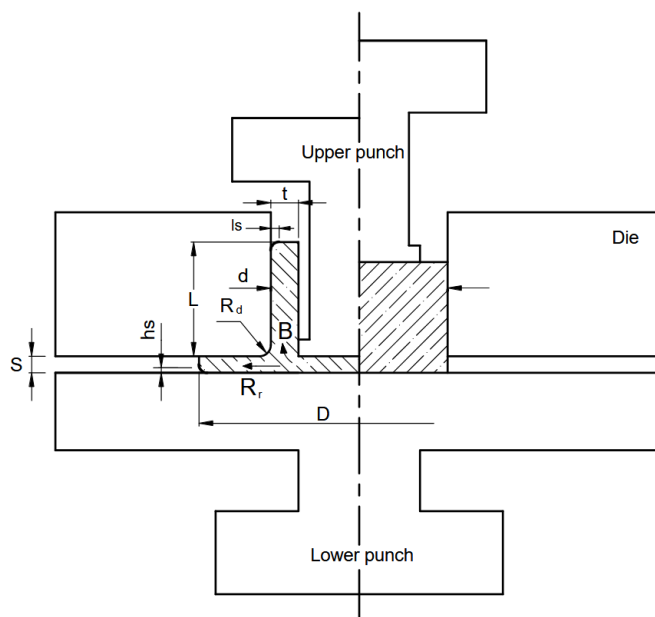


شکل ۷ بیلت اولیه مش بندی شده با المان های متقارن محور در نرم افزار DEFORM

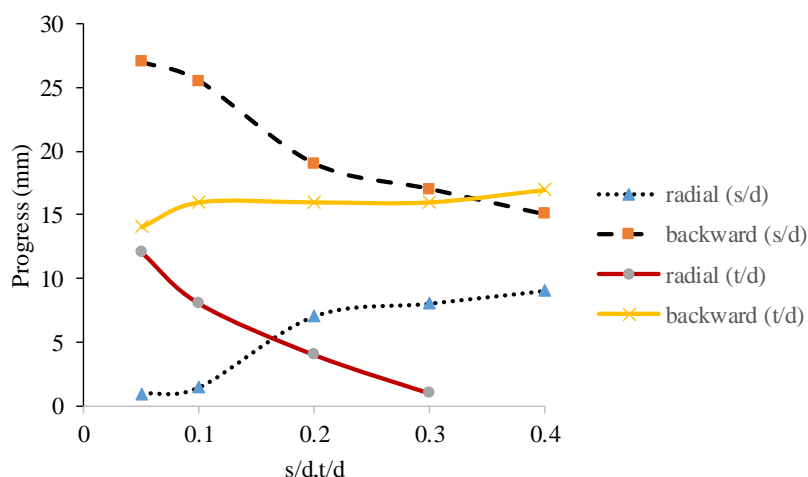
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی رفتار سیلان ماده در اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم

در فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم مطابق شکل ۸ پانچ بالایی به سمت پایین حرکت می کند درحالی که پانچ پایینی ثابت است، با ادامه حرکت پانچ بالایی، همان گونه که در شکل شماتیک نشان داده شده است مواد فقط در دو راستا امکان جاری شدن دارند. موادی که در راستای R_r و B جاری می شوند به ترتیب اکستروژن شعاعی و اکستروژن غیرمستقیم فرایند را تشکیل می دهند. تمایل مواد برای جریان یافتن به بخش های مختلف قالب با پیشروی مواد در جهت های عقب (B) و شعاعی (R_r) نشان داده شده است. تأثیر سه پارامتر مؤثر بر طول جریان مواد به داخل حفره قالب در دو جهت مختلف در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. این پارامترها عبارتند از ضریب اصطکاک، ضخامت نسبی دیواره (t/d) و ارتفاع نسبی شکاف (s/d) . شکل ۹ پیشروی مواد را در جهت های شعاعی و عقب در مقادیر مختلف ضخامت نسبی دیواره (t/d) و ارتفاع نسبی شکاف (s/d) نشان می دهد. از شکل ۹ مشخص است که ارتفاع نسبی شکاف (s/d) تأثیر قابل توجهی بر پیشروی مواد در دو جهت مختلف دارد. با افزایش ارتفاع نسبی شکاف، پیشروی مواد به داخل بخش شعاعی آسان تر می شود، بنابراین باعث جریان کمتر در جهت عقب می شود. همچنین تأثیر ضخامت نسبی دیواره (t/d) بر پیشروی مواد در این شکل مورد بحث قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، افزایش ضخامت دیواره باعث جریان بیشتر در جهت عقب می شود. علاوه بر این، پیشروی مواد در مقطع شعاعی با افزایش ضخامت نسبی دیواره (t/d) کاهش می یابد.



شکل ۸ شماتیکی از فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم

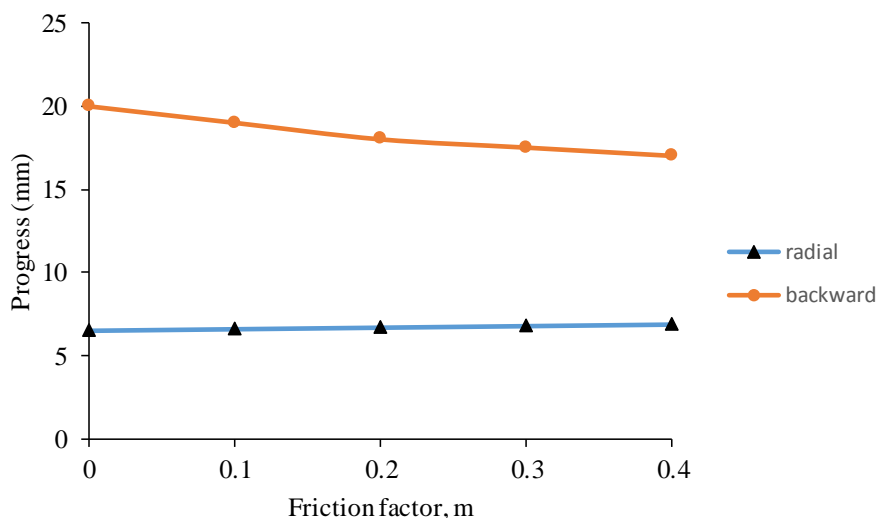


شکل ۹ تأثیر شکاف‌های قالب بر جریان مواد

شکل ۱۰ تأثیر ضریب اصطکاک بر رفتار پیشروی مواد را نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که تأثیر ضریب اصطکاک بر جریان مواد در جهت شعاعی ناچیز است؛ اما از سوی دیگر، تأثیر آن بر پیشروی رو به عقب قابل توجه است. با افزایش ضریب اصطکاک، جریان رو به عقب مواد کاهش یافته است.

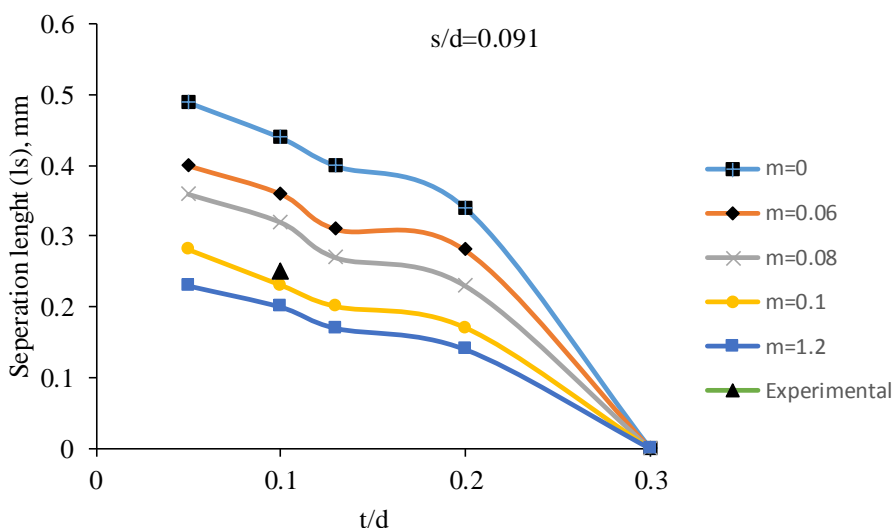
این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات هندسه قالب و شرایط اصطکاکی نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه توزیع جریان ماده دارند. با افزایش نسبت ارتفاع شکاف (s/d)، مسیر جریان در جهت شعاعی تسهیل می‌شود و در نتیجه تمایل ماده برای حرکت در جهت عقب کاهش می‌یابد. این رفتار از دیدگاه مکانیزم سیلان ناشی از تغییر در گرادیان تنش برشی در مرزهای قالب است. همچنین مشاهده شد که افزایش ضریب اصطکاک باعث کاهش جدایش لبه و محدود شدن جریان در نواحی تماس می‌شود، که این امر می‌تواند منجر به افزایش فشار موضعی و تمرکز تنش در نواحی میانی قطعه شود.

مطابق شکل ۸، در جریان رو به عقب و شعاعی، لبه‌های قطعه تحت شرایط خاصی از لبه‌های محفظه جدا می‌شوند. برای بررسی تأثیر پارامترهای فرایند بر این جدایش لبه، فاصله از لبه محفظه تا لبه دیواره جدا شده در جهت جریان رو به عقب و شعاعی به عنوان طول جدایش، l_s و ارتفاع جدایش، h_s تعریف می‌شوند. جریان نامتقارن مواد یکی از ویژگی‌های اصلی این فرایند است. در جهت شعاعی، تغییر شکل باعث جریان نامتقارن مواد به داخل شکاف فلنج می‌شود.



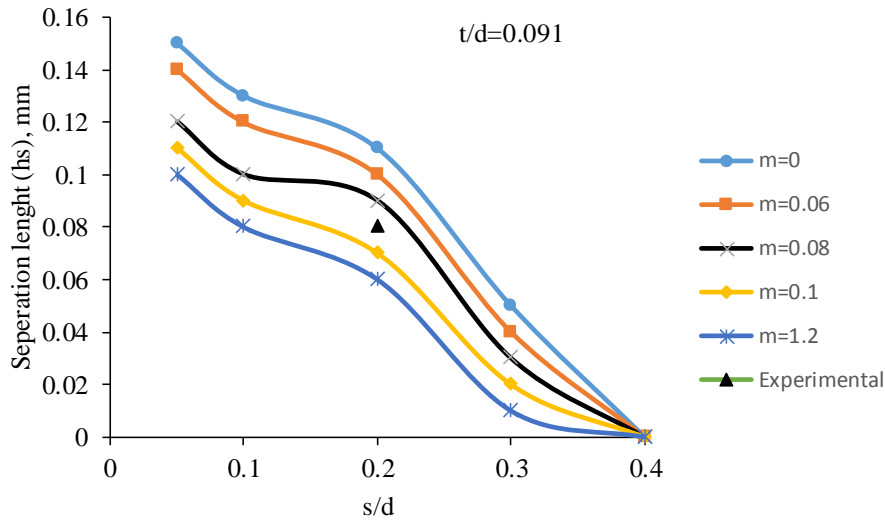
شکل ۱۰ تأثیر ضریب اصطکاک بر جریان مواد

شکل ۱۱ تغییرات طول جدایش (ls) را تحت شرایطی نشان می دهد که ارتفاع نسبی شکاف (s/d) ثابت نگه داشته می شود و ضخامت نسبی دیواره (t/d) و ضریب اصطکاک تغییر می کنند. همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، با افزایش ضخامت نسبی دیواره (t/d) از 0.1 تا 0.3، ls به 0.125 تا 0.3 برای همه شرایط اصطکاکی، طول جدایش (ls) کاهش می یابد. به خصوص، طول جدایش (ls) برای t/d = 0.3 با همه ضرایب اصطکاک صفر می شود. برای t/d ثابت، طول جدایش (ls) با افزایش ضریب اصطکاک (m) کاهش می یابد. می توان نتیجه گرفت که اصطکاک بالاتر، جریان مواد را در سطح تماس پایین تر قالب مختل می کند و این منجر به طول جدایش کمتر (ls) می شود. این نتایج نشان می دهد که هم ضخامت نسبی دیواره (t/d) بزرگ و هم ضریب اصطکاک (m) منجر به کوچک تر شدن طول جدایش (ls) روی صفر می شوند.



شکل ۱۱ طول جدایش (ls) در نسبت های مختلف t/d و ضرایب اصطکاک

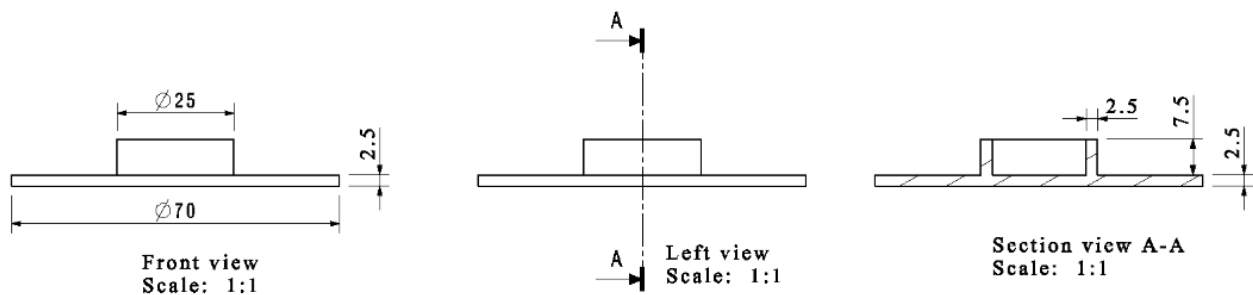
شکل ۱۲ تغییرات ارتفاع جدایش (hs) را در شرایطی که ضخامت نسبی دیواره (t/d) ثابت نگه داشته شده و ارتفاع نسبی شکاف (s/d) و ضریب اصطکاک تغییر می کنند، نشان می دهد. مطابق این شکل، افزایش ارتفاع نسبی شکاف (s/d) و ضریب اصطکاک باعث کاهش ارتفاع جدایش (hs) می شود. همچنین، در ضریب اصطکاک m = 0.4 در تمام ارتفاع های شکاف، مقدار ارتفاع جدایش (hs) صفر است.



شکل ۱۲ ارتفاع جدایش (hs) در نسبت‌های مختلف s/d و ضرایب اصطکاک

۲-۳- بررسی نیرو-جابه‌جایی حاصل از تحلیل تجربی و عددی

در این بخش نمودار نیرو-جابه‌جایی حاصل از فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم به‌منظور تولید قطعه نهایی مطابق با مشخصات شکل ۱۳ و مقایسه نتایج حاصل از آن با تحلیل شبیه‌سازی المان محدود بررسی شد. بدین منظور پس از طراحی و ساخت مجموعه قالب مورد نیاز، بیلت اولیه‌ای به قطر ۲۷٫۵۴ میلی‌متر و به ارتفاع ۱۸٫۵ میلی‌متر از جنس برنج ۷۰-۳۰ تهیه گردید و پس از نصب مجموعه قالب بر روی پرس عملیات شکل‌دهی انجام شد. به منظور کنترل دقیق کورس پرس در شکل‌دهی جهت ثبت جابه‌جایی و جلوگیری از اعمال فشار بیش از حد به سیستم و یا عدم پرشدگی قالب از یک ساعت اندیکاتور با رزولوشن ۰٫۰۱ میلی‌متر استفاده شد. فشار اعمالی از روی گیج فشار هیدرولیکی دستگاه پرس خوانده شده و مقدار جابه‌جایی سنبه با استفاده از ساعت اندیکاتور اندازه‌گیری گردید. داده‌ها در فواصل منظم (به‌طور میانگین هر نیم میلی‌متر جابه‌جایی) ثبت شدند. سپس مقادیر فشار بر سطح مقطع مؤثر سنبه تقسیم و نیروی معادل محاسبه گردید. برای نمایش تغییرات پیوسته نیرو بر حسب جابه‌جایی، داده‌های گسسته با استفاده از روش درون‌یابی^۱ در نرم‌افزار اکسل پردازش و منحنی هموار نیرو-جابه‌جایی ترسیم شد. شکل ۱۴ نمودار نیرو-جابه‌جایی در حالت تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

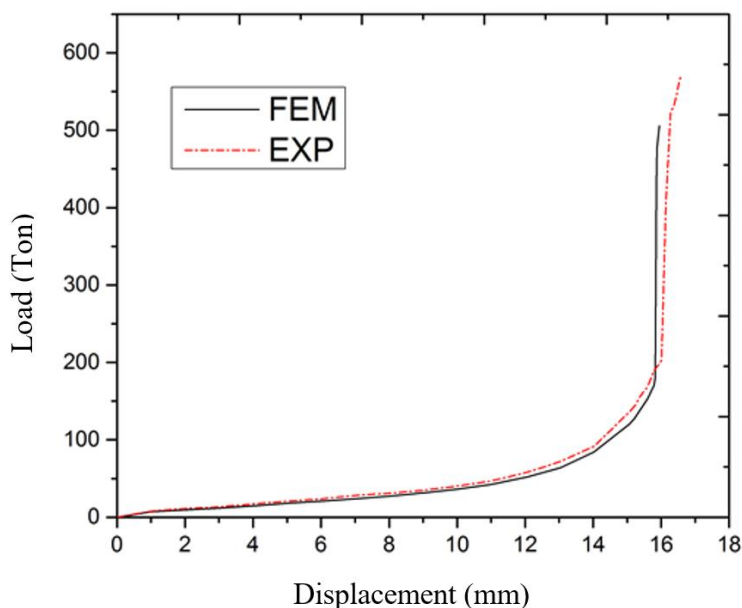


شکل ۱۳ مشخصات قطعه تولیدی

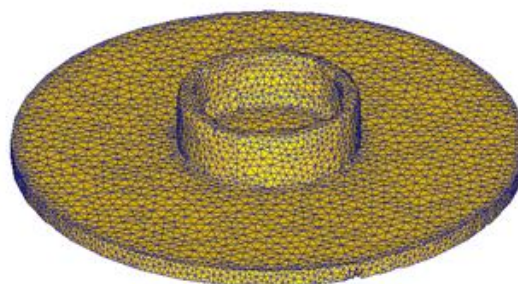
همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود نتایج تجربی و عددی با همدیگر تطابق خوبی دارند به گونه‌ای که اختلاف آن‌ها در بحرانی‌ترین حالت حداکثر ۱۰ درصد است. در بیشتر نقاط در یک کورس ثابت مقدار نیروی شکل‌دهی در فرایند تجربی بیشتر از نیروی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی است. از دلایل عمده این پدیده می‌توان به عدم یکنواختی ضریب اصطکاک در فرایند عملی

^۱ Spline Fitting

و بالا بودن آن در برخی نقاط نسبت به شبیه‌سازی عددی اشاره کرد و ایده‌آل فرض کردن شرایط می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، روند افزایشی نیرو با پیشروی سنبه مطابق رفتار متداول مواد فلزی در تغییرشکل پلاستیک است. در مراحل ابتدایی، افزایش تدریجی نیرو به دلیل تماس اولیه و تغییرشکل یکنواخت ماده است، در حالی که در مراحل انتهایی افزایش شیب نمودار نشان دهنده تمرکز کرنش و پرشدگی نهایی حفره قالب است. تطابق مناسب بین نتایج عددی و تجربی بیانگر آن است که مدل عددی مورد استفاده توانسته است رفتار واقعی ماده و شرایط اصطکاکی بین قطعه‌کار و قالب را به درستی بازتاب دهد. اختلاف جزئی موجود را می‌توان ناشی از ناهمگنی اصطکاک واقعی در فرایند عملی و فرض ایده‌آل آن در شبیه‌سازی دانست. شکل ۱۵ قطعه تولید شده با روش تجربی و شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد.



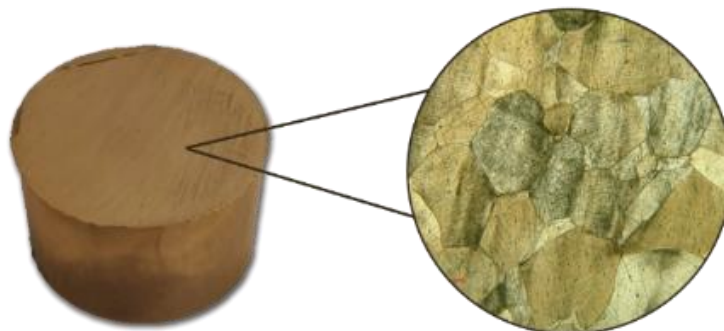
شکل ۱۴ نمودار نیرو-جابجایی تجربی و عددی



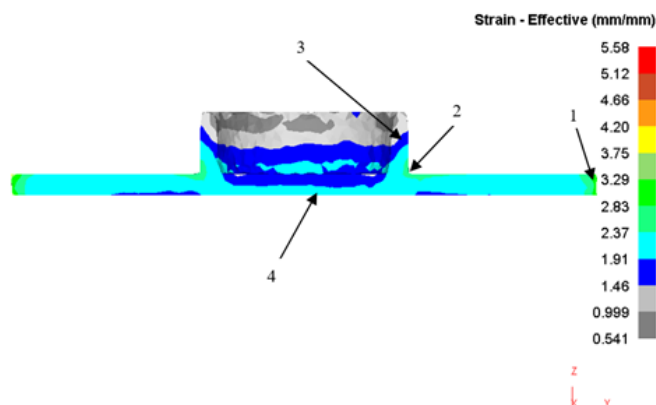
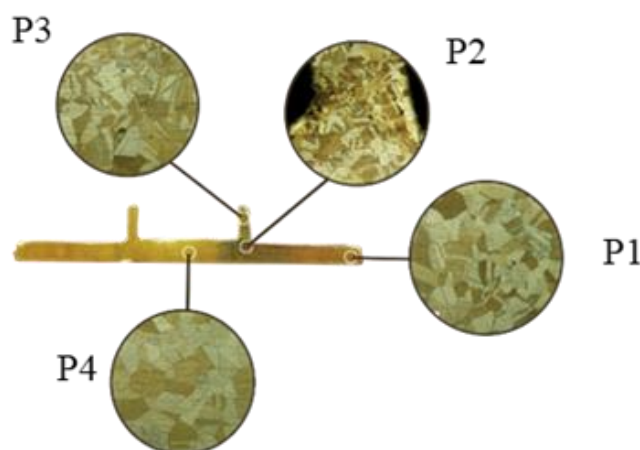
شکل ۱۵ قطعه تولید شده با روش تجربی و شبیه‌سازی عددی

۳-۳- بررسی ساختار متالوگرافی

در این قسمت ریز ساختار قسمت‌های مختلف قطعه حاصل از شکل‌دهی بررسی شد. بدین منظور فلز مورد استفاده در فرایند بعد از شکل‌دهی مقطع زده شد و بعد از مانع و عملیات پولیش‌کاری با محلول‌های اشاره شده اچ شده و تصاویر نقاط مورد نظر توسط میکروسکوپ نوری گرفته شد و در نهایت اندازه دانه‌های آن براساس استاندارد ASTM-E112-96 سنجیده شد. ریز ساختار برای فلز برنج مورد استفاده قبل از شکل‌دهی و ریزساختار قسمت‌های مختلف قطعه بعد از شکل‌دهی به ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است.



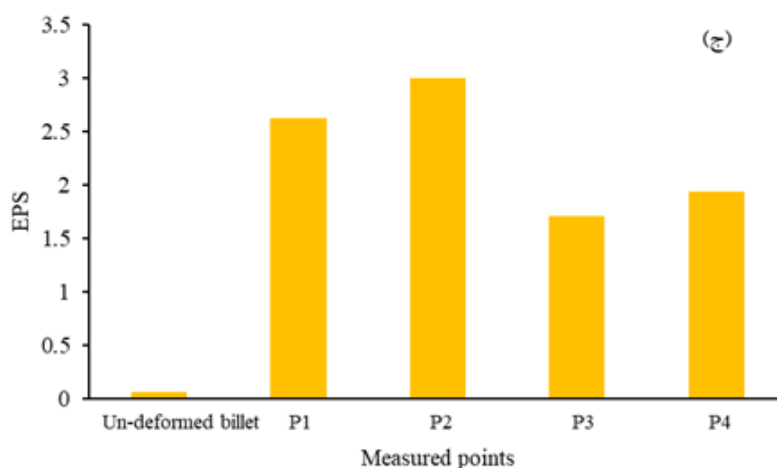
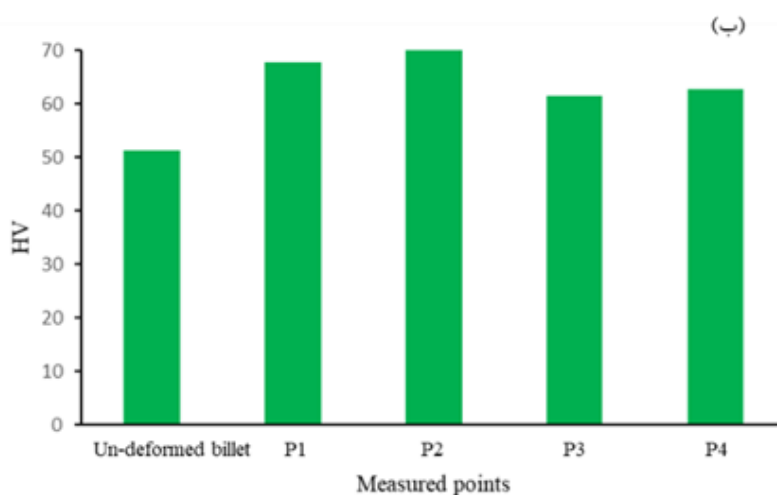
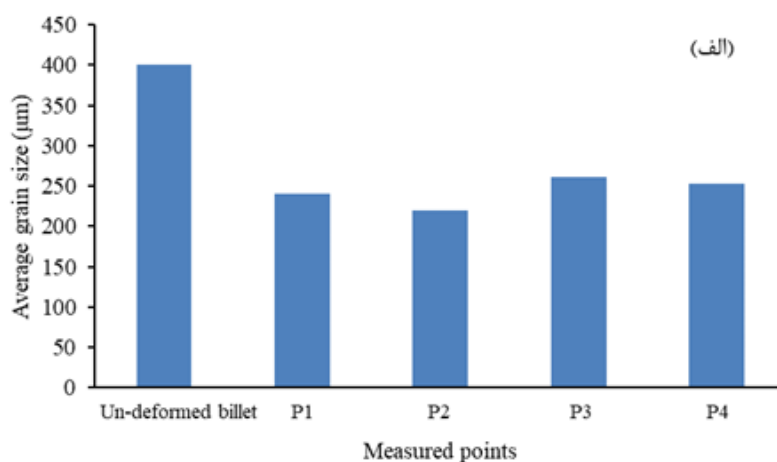
شکل ۱۶ ریزساختار قطعه برنجی قبل از شکل دهی (نقطه P5)



شکل ۱۷ تغییرات ریزساختاری و توزیع کرنش پلاستیک مؤثر در قسمت‌های مختلف قطعه برنجی بعد از شکل دهی

بررسی تصاویر متالوگرافی قطعه قبل و بعد از فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم نشان داد که اندازه دانه‌ها به طور قابل توجهی کاهش یافته است. نتایج متالوگرافی نشان داد که اندازه دانه ماده اولیه برنج ۷۰-۳۰ قبل از فرایند حدود ۴۰۰ میکرومتر بوده است. پس از فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم در دمای اتاق، اندازه دانه در نقاط مختلف قطعه به ترتیب ۲۴۰، ۲۲۰، ۲۶۱ و ۲۵۳ میکرومتر برای نقاط P1 تا P4 اندازه گیری و نتایج حاصله در شکل ۱۸ نشان داده شد. این کاهش در اندازه دانه، به ویژه در نواحی P1 و P2، ناشی از کرنش پلاستیک شدید و افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها در طول فرایند تغییر شکل پلاستیک سرد می‌باشد. در دمای اتاق، به دلیل نبود شرایط لازم برای تبلور مجدد دینامیکی، نابه‌جایی‌های درون دانه‌های انباشته شده و مرزدانه‌های فرعی تشکیل می‌دهند که باعث ریزش مؤثر دانه و افزایش سختی می‌شود. در نواحی با کرنش کم‌تر (نقاط P3 و P4)، تغییر شکل کم‌تری رخ داده و اندازه دانه

بزرگ تر باقی مانده است. بنابراین رابطه مستقیم بین شدت تغییرشکل، کاهش اندازه دانه و افزایش سختی در قطعه نهایی مشاهده می شود. توزیع سختی در طول قطعه با الگوی کاهش اندازه دانه هم خوانی دارد و نشان می دهد که سختی بالاتر در نواحی فلنجی نتیجه مستقیم ریزش دانه ها و کارسختی در طول فرایند اکستروژن است. این تحلیل، ارتباط مستقیم بین ریزساختار و ویژگی های مکانیکی قطعه را مشخص می کند و درک بهتری از توزیع سختی در قطعات تولید شده با فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم ارائه می دهد.



شکل ۱۸ تغییرات مقادیر الف) میانگین اندازه دانه، ب) سختی و ج) کرنش پلاستیک مؤثر در قسمت های مختلف قطعه برنجی قبل و بعد از شکل دهی

۳-۴- بررسی سختی سنجی

نتایج حاصل از سختی‌سنجی بر روی قطعه تولید شده در روش تجربی بررسی شد. برای این منظور پس از تولید قطعه مطابق با مشخصات اشاره شده در شکل ۱۳ قطعه در راستای محور طولی برش زده شد و بررسی‌های سختی‌سنجی بر روی قطعه با استفاده از بار ۱۰۰ گرم و به مدت ۱۵ ثانیه انجام شد [۱۸].

آزمون سختی حداقل سه بار بر روی هر نمونه تکرار شد تا از صحت نتایج به دست آمده اطمینان حاصل شود و در نهایت میانگین این سه داده به عنوان داده نهایی گزارش شد. نتایج تجربی به دست آمده از این آزمون در جدول ۱ نشان داده شده است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷).

بالاترین سختی مربوط به نقطه P2 (۷۱ ویکرز) می‌باشد که به دلیل ریزش دانه‌ها به این سختی دست یافته است. تغییرات سختی در نقاط مختلف قطعه ارتباط مستقیمی با میزان کرنش پلاستیک اعمال شده دارد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار سختی (۷۱ ویکرز) در ناحیه فلنجی (P2) مربوط به بیشترین تراکم کرنش و ریزترین اندازه دانه است. در مقابل، در نواحی با تغییرشکل کم‌تر مانند مرکز قطعه (P3 و P4) سختی کم‌تری مشاهده شد. این رفتار تأییدی بر وقوع کارسختی ناشی از تغییرشکل سرد در فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم است و نشان می‌دهد که افزایش کرنش موجب افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها و به تبع آن افزایش مقاومت مکانیکی ماده شده است.

جدول ۱ نتایج تجربی سختی‌سنجی نقاط مختلف قطعه کار قبل از تغییرشکل و بعد از تغییرشکل (شکل‌های ۱۶ و ۱۷)

نقاط مورد آزمون	سختی حاصل از آزمون ۱ (VH)	سختی حاصل از آزمون ۲ (VH)	سختی حاصل از آزمون ۳ (VH)	سختی میانگین (VH)
P1	۶۹	۶۶	۶۸,۱	۶۷,۷
P2	۶۸	۷۳	۷۲	۷۱
P3	۵۷	۶۲	۶۵,۵	۶۱,۵
P4	۶۶,۲	۶۴	۵۸	۶۲,۸
P5	۵۱	۵۳	۵۰	۵۱,۳

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق قابلیت تولید قطعه محوری فلنج‌دار از آلیاژ برنج ۷۰-۳۰ توسط فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم با استفاده از روش‌های تجربی و شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از پارامترهای انتخابی، قطعه محوری فلنج‌دار با آلیاژ برنج ۷۰-۳۰ توسط فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم در دمای اتاق و بدون عیب به طور موفقیت آمیز تولید گردید. پارامترهای مؤثر فرایندی از قبیل هندسه قالب و ضریب اصطکاک بر روی خصوصیات محصول نهایی مانند توزیع سختی، پرشدگی قالب و سیلان مواد مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. بالاترین سختی (۷۱ ویکرز) مربوط به قسمت فلنجی قطعه کار (نقطه P2) بود که به دلیل کارسختی و ریزش دانه‌ها به این سختی دست یافت. برای انجام شبیه‌سازی‌های المان محدود از بسته نرم‌افزار DEFORM استفاده گردید. نتایج نمودار نیرو-جابجایی تجربی و عددی حاصل از اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم با هم‌دیگر تطابق خوبی داشتند، به گونه‌ای که اختلاف آن‌ها در بحرانی‌ترین حالت حداکثر ۱۰ درصد بود. بررسی ریزساختار نمونه‌ها نیز نشان داد که اندازه دانه از مقدار اولیه حدود ۴۰۰ میکرومتر به مقادیر ۲۲۰ تا ۲۶۱ میکرومتر در نواحی مختلف قطعه کاهش یافته است که ناشی از کرنش پلاستیک بالا و افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها در فرایند شکل‌دهی سرد می‌باشد. نتایج نمودار نیرو-جابجایی تجربی و عددی حاصل از اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم با هم‌دیگر تطابق خوبی داشتند، به گونه‌ای که اختلاف آن‌ها در بحرانی‌ترین حالت حداکثر ۱۰ درصد بود. نتایج نشان داد که فرایند اکستروژن شعاعی-غیرمستقیم قابلیت بالایی در تولید قطعات فلنج‌دار برنجی در دمای اتاق دارد و شبیه‌سازی عددی می‌تواند به خوبی رفتار واقعی ماده را پیش‌بینی نماید.

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](https://doi.org/10.22034/IJME.2023.400065.1788) [in Persian]
- [2] Modanloo V, Alimirzaloo V, Elyasi M. Optimal design of stamping process for fabrication of titanium bipolar plates using the integration of finite element and response surface methods. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020 Feb;45(2):1097-107. doi: [10.1007/s13369-019-04232-8](https://doi.org/10.1007/s13369-019-04232-8)
- [3] Negendank M, Jain N, Hanaor D, Gurlo A, Mueller S. Effect of Extrusion Processing on Mechanical Properties of Aluminum/Graphene Nanoplatelet Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025 Mar 24:1-8. doi: [10.1007/s11665-025-11016-9](https://doi.org/10.1007/s11665-025-11016-9)
- [4] Ahmadi F, Foroughi A. Design and manufacture of Cyclic Expansion Extrusion (CEE) die and investigation of microstructure and strength of aluminum 1050 under the process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Aug 22;11(6):42-53. doi: [10.22034/IJME.2024.466177.1982](https://doi.org/10.22034/IJME.2024.466177.1982) [In Persian]
- [5] Estrin Y, Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science. *Acta materialia*. 2013 Feb 1;61(3):782-817. doi: [10.1016/j.actamat.2012.10.038](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.038)
- [6] Jafarzadeh H, Shalchi E, Shameli M. Fabrication and characterization of the mechanical properties of Al1050-CNT composites using accumulative channel-die compression bonding process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Apr 20;11(2):69-81. doi: [10.22034/IJME.2024.437634.1922](https://doi.org/10.22034/IJME.2024.437634.1922) [In Persian]
- [7] 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]
- [8] Orangi S, Abrinia K, Bihamta R. Process parameter investigations of backward extrusion for various aluminum shaped section tubes using FEM analysis. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2011 Feb;20(1):40-7. doi: [10.1007/s11665-010-9655-8](https://doi.org/10.1007/s11665-010-9655-8)
- [9] Kalpakjian S, Schmid S. *Manufacturing, Engineering and Technology SI 6th Edition-Serope Kalpakjian and Stephen Schmid: Manufacturing, Engineering and Technology. Digital Designs; 2006.*
- [10] Pale JA, Altan T. Development of equipment and capabilities for investigation of the multi-action forming of complex parts. 1989.
- [11] Lin FC, Lin SY. Radius ratio estimation and fold situation prediction of the deformation profile in forging-extrusion process. *Computers & structures*. 2002 Sep 30;80(24):1817-26. doi: [10.1016/S0045-7949\(02\)00220-1](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00220-1)
- [12] Choi HJ, Choi JH, Hwang BB. The forming characteristics of radial-backward extrusion. *Journal of materials processing technology*. 2001 Jun 15;113(1):141-7. doi: [10.1016/S0924-0136\(01\)00705-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00705-1)
- [13] Buschhausen A, Weinmann K, Lee JY, Altan T. Evaluation of lubrication and friction in cold forging using a double backward-extrusion process. *Journal of materials processing technology*. 1992 Aug 1;33(1-2):95-108. doi: [10.1007/s40544-022-0717-3](https://doi.org/10.1007/s40544-022-0717-3)
- [14] Shim JH, Ok JH, Choi HJ, Koo HS, Hwang BB. A process sequence design of multi-step cold extrusion process for hollow parts. In *Materials Science Forum 2005* Jan 15;475:4195-4198. doi: [10.4028/www.scientific.net/MSF.475-479.4195](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.475-479.4195)
- [15] 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):375-81.
- [16] 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 1;68(2):191-199. doi: [10.1007/s12666-014-0441-4](https://doi.org/10.1007/s12666-014-0441-4)
- [17] 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):857-863. doi: [10.1080/10426910903536741](https://doi.org/10.1080/10426910903536741)
- [18] Farhoumand A, Ebrahimi R. Analysis of forward-backward-radial extrusion process. *Materials & Design*. 2009 Jun 30;30(6):2152-2157. doi: [10.1016/j.matdes.2008.08.025](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.025)
- [19] American Society for Metals. *Metallography and microstructures*. In: *ASM handbook*. Vol. 9. Metals Park (OH): ASM International; 1985.
- [20] Ebrahimi R, Najafzadeh A. A new method for evaluation of friction in bulk metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004 Oct 20;152(2):136-143. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2004.03.029](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.029)