

Experimental and Numerical Investigation of the Cold Extrusion of a Cup-Shaped Steel Joint Body and the Effect of Die Geometry and Lubrication Parameters

Elyas Haddadi¹*, Hossein Jafarzadeh²

¹Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

²Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Tabriz branch, Tabriz, Iran

ABSTRACT

The feasibility of manufacturing a cup-shaped steel joint body for the Peugeot 405 from CK45 steel using cold extrusion was investigated through experimental and numerical methods. The main goal was to study material behavior under various processing conditions and evaluate the influence of key parameters on forming force and final component hardness. After annealing, initial billets were processed by direct cold extrusion. Results confirmed that the process is fully capable of producing the complex geometry of the part. Findings showed that friction conditions, punch corner angle, and wall thickness significantly affect process response. Reducing the friction factor from 0.40 to 0.13 decreased the maximum punch force from 2450 to 1750 kN. Increasing the punch corner angle from 0° to 20° reduced extrusion force by 56% and improved material flow. Raising wall thickness from 4.5 to 5.8 mm enhanced stress control and further lowered the forming force from 2700 to 1500 kN. Hardness measurements revealed that optimal friction parameters combined with effective lubrication improve hardness uniformity and final component hardness. Numerical simulations using DEFORM showed approximately 10% deviation between experimental and finite element results.

KEYWORDS

Cold extrusion, Friction factor, cup-shaped joint body, Punch angle, Wall thickness of workpiece

* Corresponding author: Elyas Haddadi, Email: ehadadi@tvu.ac.ir

1. Introduction

With the continuous advancement of metal and non-metal forming industries and the considerable costs associated with design and experimental testing, manufacturers are increasingly motivated to adopt improved pre-process quality-control methods to reduce production time and expenses while enabling engineers to achieve more reliable and robust design outcomes [1-3]. As industry rapidly progresses, the demand for components with high strength, superior surface finish, excellent dimensional and geometric accuracy, complex shapes, high wear resistance, and high production rates has become more pronounced. Various manufacturing processes—such as casting, forging, machining, and sheet-metal forming—are well-established methods, each offering its own advantages and limitations. Among these, extrusion is regarded as one of the precise metal-forming techniques and, due to its significant capabilities, serves as an efficient method for producing high-quality components.

2. Methodology

In this study, medium-carbon steel CK45 was selected as the base material. Owing to its favorable strength, hardness, and machinability, this steel is widely used in the manufacturing of industrial components and power-transmission shafts [1]. The initial specimens were machined from non-extruded bars with a diameter of 24 mm and a length of 52 mm (Figure 1).



Figure 1. Initial test specimens

The extrusion process was carried out using a 700-ton hydraulic press at Iran Tractor Manufacturing Company. In this study, several key factors were examined to investigate the material deformation behavior and the influence of process parameters on the forming force. The main variables included the friction factor (m) at four levels of 0.13, 0.17, 0.21, and 0.40; die entry angle at 0° , 5° , and 20° ; wall thicknesses of 4.5, 6.5, and 8.5 mm; lubricant type (no lubricant, graphite, MoS_2 , and $\text{Zn}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2$); and the application of annealing heat treatment before and

after the process. For all tests, the punch velocity was set to 5 mm/s and the process temperature was maintained at environment temperature. The forming force was continuously recorded using a load cell, and for each experimental condition, the load–displacement curves were obtained and analyzed.

3. Results and Discussion

After the initial preparation of the specimens, the extrusion process was performed using the lubricant $\text{Zn}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2$, which provides a friction factor of 0.17, as shown in Figure 2. The load–displacement curves in experimental and numerical forming processes of the specimens were presented in Figure 3. Segment **OA** represents the onset of die filling and the initial material flow through both the walls (indirect extrusion) and the frontal section (direct extrusion), during which the force rises to approximately 2000 kN. This is because, in the indirect extrusion process, the workpiece is placed inside a chamber that is completely closed on one side, while the load is applied from the open side of the die. As extrusion continues, the extruded material flows in the direction opposite to the applied load. For this purpose, the punch is made hollow so that the extruded section can pass through it.

At the front end of extrusion, due to the additional force required to overcome frictional resistance, the pressure in the indirect extrusion region reaches its maximum. Therefore, the highest force is required at the beginning of the process, after which the load gradually stabilizes. Segment **AB** corresponds to the uniform flow in both the indirect and direct extrusion regions. Segment **BC** indicates the complete filling of the corners and the final shaping of the part. The subsequent increase in force is attributed to the additional load needed to transform the initial specimen geometry into the final shape. Figure 4 shows a cross-sectional view of regions **OA** and **BC** of the final extruded component.

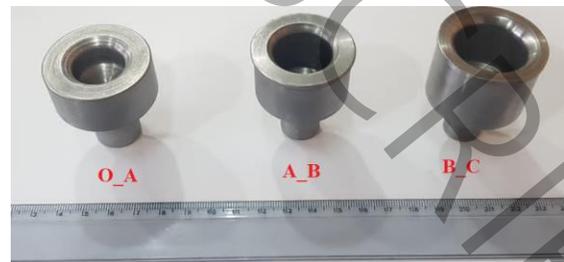


Figure 2. Step-by-step images of the specimens during the extrusion process

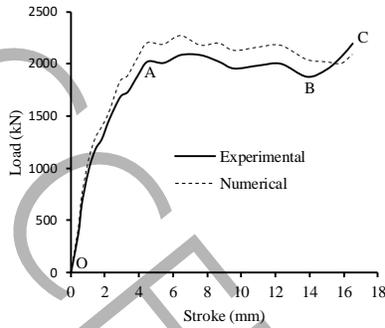


Figure 3. Comparison of load–stroke curves in experimental and numerical forming processes

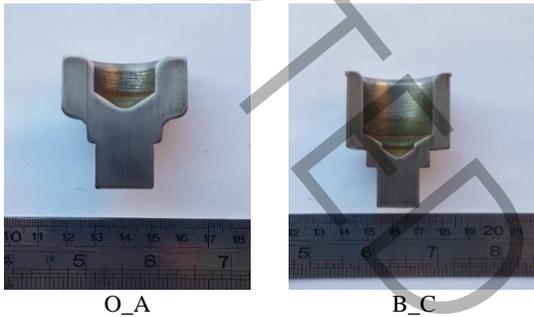


Figure 4. Cross-sectional views of the specimens during the extrusion process

Variations in wall thickness can influence the hardness of the extruded section. In general, reducing the wall thickness tends to increase the hardness of the extruded part, whereas increasing the thickness may lead to a reduction in hardness. This occurs because a thinner wall requires a higher deformation force, thereby resulting in greater hardness. Table 1 presents the effect of wall thickness on the final hardness and FPS of the workpiece in FEM and experimental methods. The results indicated that increasing the wall thickness accelerates the extrusion process and reduces the forming load, leading to lower hardness compared with specimens having thinner walls. This hardness difference varies across different regions of the part and is approximately 20%.

Table 1. Hardness and EPS of specimens at various points as a function of different wall thicknesses in FEM and experimental methods

Positions	4.5		6.5		8.5	
	HV	EPS	HV	EPS	HV	EPS
P1	308	5.3	270	2.7	262	1
P2	305	5.1	282	1.88	264	1.2

P3	310	5.5	295	4.8	290	2.3
P4	273	2	275	2.85	274	2.8
P5	275	2.9	273	1.99	276	3

4. Conclusions

The results of this study demonstrated that the cup-shaped joint body used in the front-suspension system of the Peugeot 405—an industrially high-demand component—can be successfully manufactured through the cold extrusion process. The findings also revealed that the cold extrusion parameters have a significant influence on the forming load and mechanical properties of CK45 steel. The punch force decreased by approximately 40% when the friction factor was reduced from 0.40 to 0.13, and MoS₂ lubricant outperformed graphite and the unlubricated condition. Hardness measurements and simulation results indicated that the hardness distribution in the final component is directly correlated with effective plastic strain, and high friction conditions lead to increased heterogeneity in both hardness and plastic strain distribution. Pre-extrusion annealing reduced the material's yield stress, thereby lowering the required forming force and enhancing hardness uniformity. Overall, the findings of this study demonstrate that, with optimal selection of process parameters, cold extrusion of CK45 steel can serve as a reliable method for producing cup-shaped industrial components for automotive applications.

5. References

- [1] V. Modanloo, B. Akhondi, and Y. Dadgar Asl, Minimizing the required forming force in the sheet hydroforming process using a fractional factorial design. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 2023. 9(12): p. 1–9.
- [2] V. Modanloo, V. Alimirzaloo, and M. Elyasi, 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*, 2019. 45.
- [3] E. Haddadi, H. Jafarzadeh, and M. Shmeli, Numerical and Experimental Study of Backward-Radial Extrusion Process for Flanged Brass Alloy C26000 Parts. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025: p. 1–22.

بررسی تجربی و عددی قابلیت اکستروژن سرد قطعه فولادی تنه مفصل فنجان‌شکل و

مطالعه تأثیر پارامترهای هندسی قالب و روانکاری

الیاس حدادی^{۱*} و حسین جعفرزاده^۲

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

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

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳۵۷۶۳۸۱۱، ehadadi@tvu.ac.ir

چکیده

امکان‌سنجی تولید تنه مفصل فنجان‌شکل خودروی پژو ۴۰۵ از جنس فولاد CK45 با استفاده از فرایند اکستروژن سرد به صورت تجربی و عددی بررسی شد. هدف، تحلیل رفتار ماده در شرایط مختلف و تعیین اثر پارامترهای کلیدی فرایند بر نیروی شکل‌دهی و سختی نهایی قطعه بود. نمونه‌های اولیه پس از عملیات آنیل تحت اکستروژن مستقیم سرد قرار گرفتند و نتایج نشان داد که این فرایند برای تولید هندسه پیچیده قطعه کاملاً قابل اجرا است. بررسی‌ها نشان داد که تغییر پارامترهای اصطکاک، زاویه گوشه سنبه و ضخامت دیواره تأثیر معنی‌داری بر پاسخ فرایند دارد. کاهش ضریب اصطکاک از ۰/۴۰ به ۰/۱۳، باعث افت قابل توجه نیروی ماکزیمم سنبه از ۲۴۵۰ به ۱۷۵۰ کیلونیوتن شد، در حالی که افزایش زاویه گوشه سنبه از صفر به ۲۰ درجه موجب کاهش ۵۶ درصدی نیروی اکستروژن و بهبود جریان ماده گردید. افزایش ضخامت دیواره از ۴/۵ به ۸/۵ میلی‌متر به کنترل تنش‌ها و کاهش نیروی شکل‌دهی از ۲۷۰۰ به ۱۵۰۰ کیلونیوتن کمک کرد. اندازه‌گیری سختی‌ها نیز نشان داد که ترکیب مناسب پارامترهای اصطکاک و استفاده از روانکار مؤثر موجب افزایش یکنواختی و ارتقای سختی نهایی قطعه می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان داد که اختلاف نیروی شکل‌دهی میلیون نتایج تجربی و عددی در حدود ۱۰٪ بود.

کلمات کلیدی

اکستروژن سرد، ضریب اصطکاک، تنه مفصل فنجان‌شکل، زاویه قالب، ضخامت دیواره قطعه

با پیشرفت روزافزون صنعت شکل‌دهی فلزات و هزینه‌های قابل‌توجه طراحی و انجام آزمون‌های تجربی، صنایع تولیدی به‌طور فزاینده‌ای به دنبال روش‌هایی هستند که ضمن کاهش زمان و هزینه تولید، امکان دستیابی به قطعاتی با کیفیت بالاتر را فراهم سازند [۱-۳]. در این راستا، نیاز به تولید قطعاتی با استحکام بالا، دقت ابعادی و هندسی مناسب، صافی سطح مطلوب، مقاومت به سایش و نرخ تولید بالا، به‌ویژه در صنایع خودروسازی، بیش از پیش احساس می‌شود. فرایندهای مختلفی نظیر ریخته‌گری، آهنگری، ماشین‌کاری و ورق‌کاری برای تولید قطعات فلزی به کار گرفته می‌شوند که هر یک، با وجود مزایای خاص خود، دارای محدودیت‌هایی از نظر دقت، خواص مکانیکی یا میزان اتلاف مواد هستند. در این میان، فرایند اکستروژن به‌عنوان یکی از روش‌های شکل‌دهی دقیق فلزات، به دلیل قابلیت تولید قطعات با هندسه پیچیده و خواص مکانیکی بهبودیافته، جایگاه ویژه‌ای در تولید قطعات صنعتی یافته است.

در سال‌های اخیر، اکستروژن سرد به‌عنوان یکی از فرایندهای کارآمد در تولید قطعات فلزی با دقت بالا و حداقل عملیات ثانویه، توجه پژوهشگران و صنعتگران را به خود جلب کرده است. این فرایند به‌ویژه در تولید قطعات خودروبی، نظیر اجزای سیستم تعلیق، قطعات اتصالی و قطعات توخالی با هندسه پیچیده، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات تجربی و عددی نشان داده‌اند که اکستروژن سرد می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی، افزایش استحکام تسلیم و عمر خستگی قطعات شود، هرچند نیروی بالای شکل‌دهی و اصطکاک زیاد میان ابزار و قطعه، از چالش‌های اصلی این فرایند به‌شمار می‌رود [۴، ۵]. پژوهش‌های متعددی در زمینه اکستروژن سرد و ترکیبی فلزات انجام شده است. مودانلو و همکاران با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش و شبیه‌سازی عددی، کاهش نیروی شکل‌دهی را در فرایندهای شکل‌دهی فلزات گزارش کردند [۱]. حدادی و همکاران نیز با مطالعه عددی و تجربی اکستروژن معکوس-شعاعی آلایژ برنج، تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش ارائه دادند که اهمیت تحلیل عددی در پیش‌بینی نیروی فرایند را نشان می‌دهد [۳]. از سوی دیگر، مطالعات انجام‌شده بر اکستروژن چندمرحله‌ای و اکستروژن ترکیبی بیانگر آن است که انتخاب نامناسب پارامترهای فرایندی می‌تواند منجر به افزایش نیروی اکستروژن و ناهمگنی توزیع تنش و کرنش شود [۶-۹].

یکی از عوامل کلیدی در موفقیت اکستروژن سرد فولادهای کربنی، شرایط اصطکاک و نوع روانکار مورد استفاده است. پژوهش‌های کلاسیک نشان داده‌اند که روانکاری مناسب می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش نیروی اکستروژن و سایش قالب ایفا کند [۱۰]. با این حال، در سال‌های اخیر تمرکز پژوهش‌ها به سمت روانکارهای پیشرفته‌تر و سازگار با محیط زیست سوق یافته است. مطالعات جدید گزارش کرده‌اند که استفاده از روانکارهای مبتنی بر فسفات، پوشش‌های جامد و روانکارهای هیبریدی، تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود جریان ماده و افزایش عمر ابزار در اکستروژن سرد فولادهای کربنی دارد [۱۱-۱۳].

علاوه بر مطالعات تجربی، تحلیل عددی مبتنی بر روش اجزای محدود به‌عنوان ابزاری قدرتمند در بررسی فرایند اکستروژن سرد معرفی شده است. این روش امکان پیش‌بینی نیروی اکستروژن، توزیع تنش و کرنش پلاستیک، تغییرات ضخامت و حتی توزیع سختی در قطعه نهایی را فراهم می‌سازد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب تحلیل عددی و آزمایش تجربی می‌تواند منجر به بهینه‌سازی مؤثر پارامترهای فرایندی و کاهش قابل‌توجه هزینه‌های توسعه محصول شود [۱۴، ۱۵]. با این وجود، اغلب این پژوهش‌ها یا صرفاً عددی بوده‌اند یا به بررسی پارامترها به‌صورت جداگانه پرداخته‌اند.

فولاد CK45 به‌عنوان یکی از فولادهای کربنی پرکاربرد در صنایع مکانیکی و خودروسازی، به دلیل قابلیت عملیات حرارتی، استحکام مناسب و داکتیلیته قابل قبول، گزینه‌ای مناسب برای تولید قطعات تحت بارهای دینامیکی محسوب می‌شود [۱۶]. با این حال، استحکام نسبتاً بالایی این فولاد سبب می‌شود که شکل‌دهی سرد آن، به‌ویژه در قطعات با هندسه پیچیده، با چالش‌هایی نظیر افزایش نیروی اکستروژن، سایش ابزار و ناهمگنی خواص مکانیکی همراه باشد. از این رو، بررسی همزمان اثر پارامترهای فرایندی و شرایط عملیات حرارتی در اکستروژن سرد این فولاد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

مرور ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی در زمینه اکستروژن سرد فولادهای کربنی، روانکاری و تحلیل عددی انجام شده است، اما بررسی همزمان اثر نوع روانکار، زاویه قالب، ضخامت دیواره و عملیات حرارتی بر نیروی اکستروژن و توزیع سختی در قطعات خودرویی با هندسه فنجان‌شکل، به‌ویژه برای فولاد CK45، کم‌تر گزارش شده است. این موضوع بیانگر وجود خلأ پژوهشی در زمینه ارائه یک رویکرد جامع و تلفیقی برای تحلیل و بهینه‌سازی فرایند اکستروژن سرد چنین قطعاتی می‌باشد. بر این اساس، هدف این پژوهش بررسی قابلیت اکستروژن سرد قطعه تنه مفصل فنجان‌شکل خودروی پژو ۴۰۵ از جنس فولاد CK45 است. در این تحقیق، اثر همزمان نوع روانکار، زاویه قالب، ضخامت دیواره و عملیات حرارتی بر نیروی اکستروژن و توزیع سختی، به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌کارگیری تحلیل اجزای محدود در کنار آزمون‌های تجربی، امکان درک دقیق‌تر رفتار ماده، کاهش مصرف انرژی، افزایش عمر قالب و بهبود کیفیت قطعه نهایی را فراهم می‌سازد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش، فولاد کربنی متوسط CK45 به عنوان ماده پایه انتخاب شد. این فولاد به دلیل خواص مناسب استحکام، سختی و ماشین‌کاری آسان، در ساخت قطعات صنعتی و شفت‌های انتقال نیرو کاربرد گسترده‌ای دارد [۱]. نمونه‌های اولیه از میله‌های اکستروژن شده با قطر ۲۴ میلی‌متر و طول ۵۲ میلی‌متر ماشین‌کاری شدند (شکل ۱). برای تعیین ترکیب شیمیایی نمونه‌ها از دستگاه اسپکترومتر برند پاورماتل^۱ و مدل متاویژن^۲ متعلق به شرکت تراکتورسازی استفاده شد. مقادیر عناصر اصلی شامل کربن، منگنز، سیلیسیم، فسفر و گوگرد با درصد‌های مشخص شده در جدول ۱ ارائه شده است که با استاندارد UNS C1045 تطابق دارد. سختی اولیه نمونه‌ها پیش از انجام فرایند اکستروژن با آزمون برینل اندازه‌گیری و مقدار متوسط ۱۸۷ برینل به‌دست آمد (شکل الف) (۲). سپس نمونه‌ها از نظر ساختاری و اندازه دانه‌ها بررسی شدند. متالوگرافی نمونه‌های اولیه براساس استاندارد ASTM E407 و ASTM E3 و با بزرگنمایی مختلف انجام گرفت (شکل ۳).



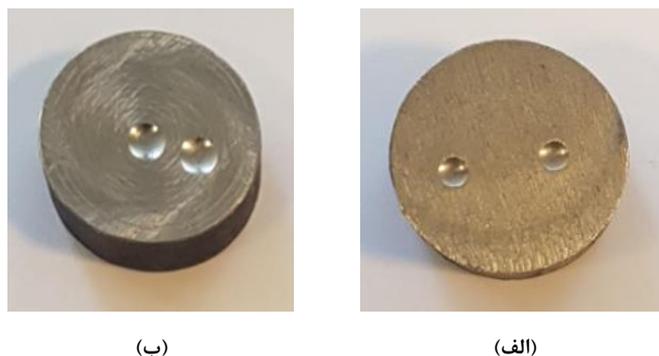
شکل ۱: قطعات اولیه

Fig. 1. initial test specimens

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد CK45

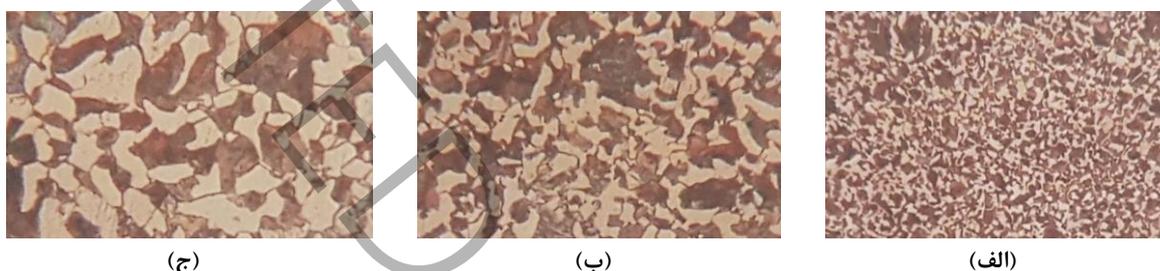
Table 1. Chemical composition (wt.%) of CK45 steel

S	P	Si	Mn	C	Fe	عنصر
۰/۰۲۰۵	۰/۰۱۹۵	۰/۳۴۸	۰/۷۳۲	۰/۵۷۳	۹۸/۳۰۷	ترکیب شیمیایی



شکل ۲: الف) نمونه بعد از انجام سختی‌سنجی و ب) نمونه آنیل اسفرودایزینگ شده بعد از انجام سختی‌سنجی

Fig. 2. a) specimen after hardness measurement, and b) spheroidized-annealed specimen after hardness testing

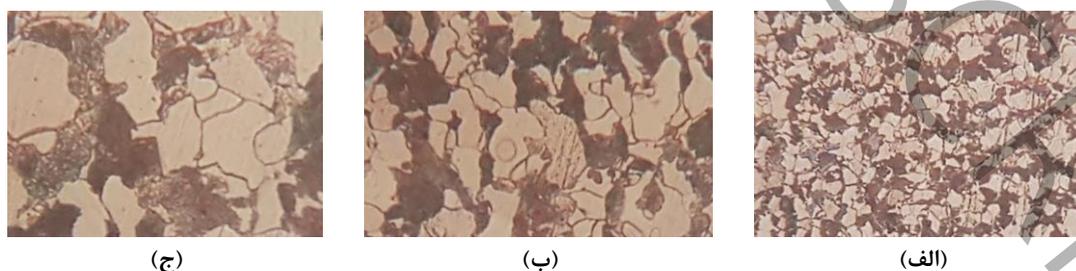


شکل ۳: متالوگرافی نمونه‌های قبل از آنیل با بزرگنمایی مختلف الف) ۱۰۰، ب) ۲۵۰ و ج) ۴۰۰

Fig. 3. Microstructural observations of the pre-annealed specimens at various magnifications: a) 100, b) 250, and c) 400

سپس نمونه‌های اولیه تحت عملیات حرارتی آنیل کردن^۱ قرار گرفتند تا ریزساختار فریتی-پرلیتی یکنواخت حاصل شود (شکل (ب)۲). دمای عملیات ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان نگهداری ۲ ساعت بود و سپس خنک‌کاری در کوره انجام گرفت. پس از آن، سطح نمونه‌ها با روش متالوگرافی مطابق استاندارد ASTM E3 و ASTM E407 آماده و با محلول نایتال^۲ دو درصد اچ شدند. تصاویر میکروسکوپی دانه‌های فریتی کرووی شده نشان‌دهنده یکنواختی ساختار پس از آنیل بود [۲].

اسفرودایزینگ^۳ کردن قطعات قبل از اکستروژن می‌تواند چندین مزیت داشته باشد. بازپخت به یک فرایند عملیات حرارتی اشاره دارد که معمولاً روی فلزات برای بهبود خواص مطلوب آن‌ها مانند سختی، شکل‌پذیری، چقرمگی و ماشین‌کاری انجام می‌شود. مزیت خاص آنیل کردن قطعات قبل از اکستروژن شامل بهبود کارایی، کاهش تنش پسماند، ریزساختار تقویت شده و شکل‌پذیری بهتر می‌شود. میزان سختی نمونه‌ها بعد از اسفرودایزینگ نیز مطابق شکل (ب)۲ انجام گرفت که میزان آن ۱۴۳ برینل بود. همچنین متالوگرافی نمونه‌های اولیه بعد از آنیل نیز انجام شد که در شکل ۴ نشان داده شده است.



1. Annealing
2. Nital
3. Spheroidizing

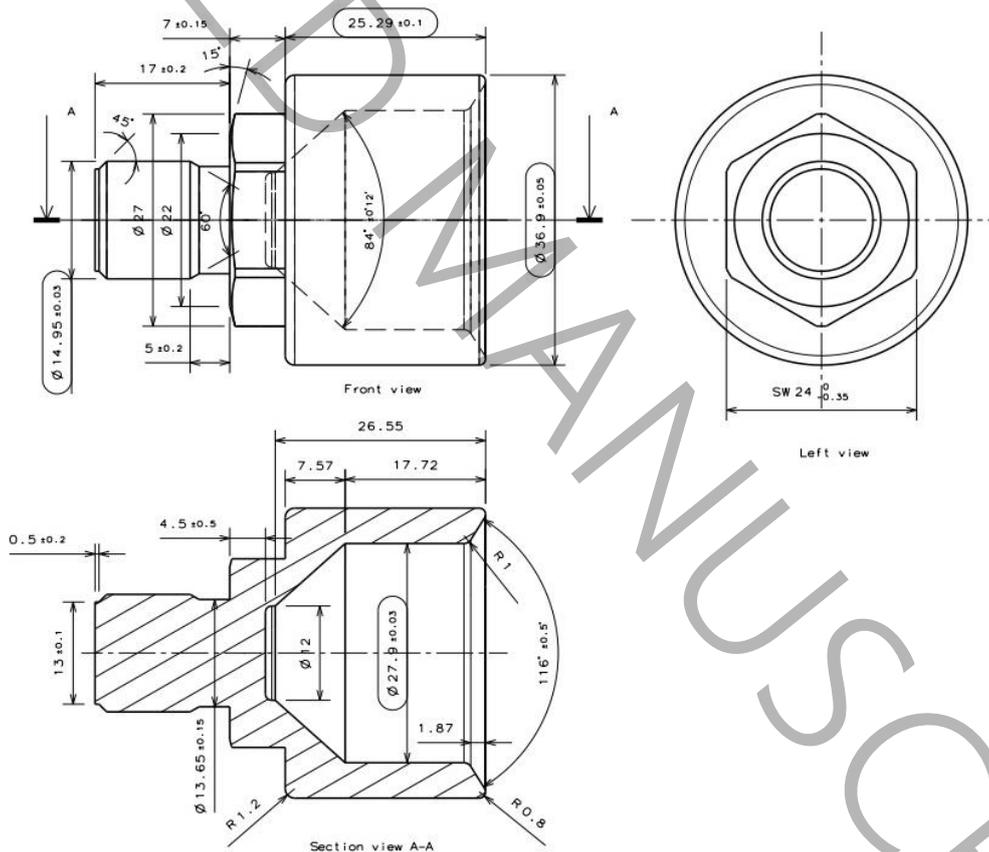
شکل ۴: متالوگرافی نمونه‌های آنیل شده با بزرگنمایی مختلف (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۵۰ و (ج) ۴۰۰

Fig. 4. Microstructural observations of the annealed specimens at various magnifications: a) 100, b) 250, and c) 400

۲-۲- فرایند ساخت قالب

نقشه قطعه فولادی تنه مفصل فنجان‌شکل و پارامترهای آن در شکل ۵ نشان داده شده است. لازم به توضیح است که، پس از تولید قطعه توسط فرایند اکستروژن سرد، برای رسیدن به قطعه نهایی لازم است که فرایند ماشین‌کاری مانند رزوه‌زنی نیز بر روی برخی بخش‌های قطعه فولادی تنه مفصل فنجان‌شکل انجام شود (شکل ۵).

برای ساخت قالب از انواع فولادهای سردکار و گرم‌کار (H13) مورد نیاز در ابعاد مختلف استفاده شد (شکل ۶). این قطعات در برابر تنش‌های فشاری و حرارت مقاوم هستند. عملیات ماشین‌کاری مورد نیاز بر روی قطعات مختلف انجام شد. سطوح کاری قالب (قسمت بیرونی سنبه^۱ و قسمت داخلی قالب^۲) پس از ماشین‌کاری، تحت عملیات پوشش‌دهی سطحی از جنس TiN به ضخامت ۴ میکرون و توسط روش PVD^۳ قرار گرفتند تا اصطکاک تماسی کاهش یافته و همچنین مقاومت سایشی قالب‌ها افزایش یابد. برای ایجاد شکل شش ضلعی در داخل قالب از قطعه مسی به عنوان ابزار اسپارک بعد از ماشین‌کاری استفاده گردید که در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۵: نقشه قطعه فولادی تنه مفصل فنجان‌شکل

Fig. 5. Engineering drawing of the cup-shaped steel joint body

1. Punch
2. Die
3. Physical Vapor Deposition (PVD)



شکل ۶: آماده‌سازی قطعات قالب

Fig. 6. Preparation of die components



شکل ۷: الف) قطعه مسی به عنوان ابزار اسپارک، ب) شش ضلعی ایجاد شده در قالب توسط دستگاه اسپارک

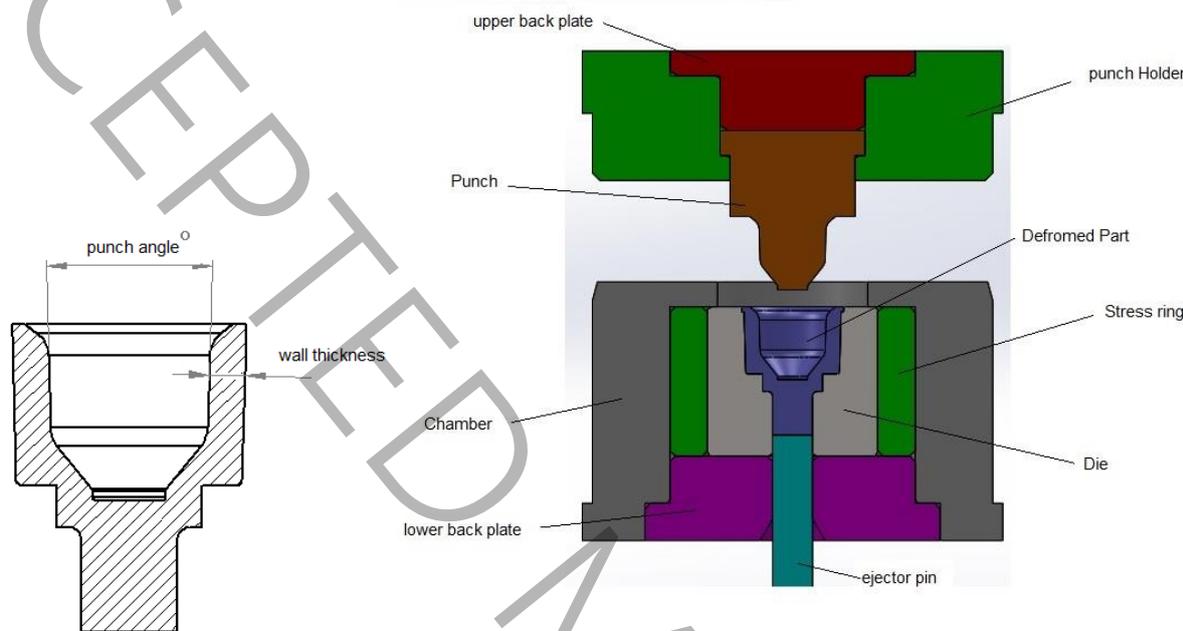
Fig. 7. a) Copper piece used as the EDM electrode, b) Hexagonal cavity created in the die by EDM

۲-۳- فرایند اکستروژن و پارامترهای بررسی شده

فرایند اکستروژن نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه پرس هیدرولیک ۷۰۰ تنی انجام گرفت. در این پژوهش، به منظور بررسی رفتار تغییرشکل ماده و اثر پارامترهای مؤثر بر نیروی شکل‌دهی، چندین عامل کلیدی مورد مطالعه قرار گرفت. متغیرهای اصلی مورد مطالعه شامل تغییرات ضریب اصطکاک در شرایط روانکاری مختلف شامل حالت‌های (بدون روانکار، گرافیت، MoS_2 و $\text{Zn}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2$) در چهار سطح ۰٫۱۳، ۰٫۱۷، ۰٫۲۱ و ۰٫۴۰، زاویه ورودی قالب در سه مقدار صفر، ۵ و ۲۰ درجه، ضخامت دیواره در سه حالت ۴٫۵، ۶٫۵ و ۸٫۵ میلی‌متر، و همچنین عملیات حرارتی آنیل قبل و بعد از فرایند است. در کلیه آزمون‌ها، سرعت حرکت سنبه برابر با ۵ میلی‌متر بر ثانیه و دمای فرایند برابر با دمای محیط تنظیم گردید. نیروی شکل‌دهی در این پژوهش به صورت غیرمستقیم و بر اساس اندازه‌گیری فشار مدار هیدرولیک پرس تعیین شده است. بدین منظور، از یک ترانسمیتر فشار هیدرولیکی^۱ نصب‌شده بر روی سیلندر اصلی پرس برای ثبت تغییرات فشار در طول کورس استفاده شد. سیگنال فشار با نرخ نمونه‌برداری ۵۰۰ هرتز به صورت پیوسته ثبت گردید. پیش از انجام آزمایش‌ها، ترانسمیتر فشار با استفاده از فشارهای مرجع استاندارد کالیبره شده و صحت و خطی بودن پاسخ آن در محدوده کاری دستگاه تأیید شد. به منظور حذف نویزهای فرکانس بالا ناشی از ارتعاشات مکانیکی سیستم هیدرولیک و تماس قالب-قطعه‌کار، داده‌های خام فشار با استفاده از یک فیلتر دیجیتال پایین‌گذر از نوع Butterworth مرتبه دوم با فرکانس قطع ۲۰ هرتز پردازش شدند. نیروی شکل‌دهی لحظه‌ای با استفاده از رابطه $F=P \times A$ محاسبه شد که در آن P فشار فیلترشده اندازه‌گیری شده و A سطح مؤثر پیستون سیلندر پرس

1. Hydraulic Pressure Transmitter

است. نمودارهای نیرو-کورس بر اساس داده‌های نیروی محاسبه‌شده ترسیم گردیدند. نیروی بیشینه به‌عنوان بیشترین مقدار پایدار نیروی ثبت‌شده در ناحیه شکل‌دهی پایدار استخراج شد و پیک‌های گذرای ناشی از تماس اولیه ابزار یا ناپایداری‌های لحظه‌ای سیستم در محاسبه آن لحاظ نشدند. اگرچه این روش نسبت به اندازه‌گیری مستقیم نیرو با سلول بار دقت کم‌تری دارد، اما به‌عنوان یک روش صنعتی متداول، دقت کافی برای تحلیل روند تغییرات نیروی شکل‌دهی و مقایسه شرایط مختلف فرایند را فراهم می‌کند. شکل شماتیک قالب نهایی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: شماتیکی از فرایند اکستروژن سرد قطعه فولادی تنه مفصل فنجان‌ی شکل

Fig. 8. Schematic of the cold extrusion process of the cup-shaped steel joint body

۳- شبیه‌سازی المان محدود

تغییر شکل پلاستیک ماده در حین فرایند اکستروژن با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی در محیط نرم‌افزار دفرم^۱ 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 فرض گردید. همچنین به دلیل تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ در قطعه کار از تغییر شکل الاستیک ماده نیز به دلیل ناچیز بودن آن صرف‌نظر شد. اطلاعات مربوط به منحنی سیلان پلاستیک تنش- کرنش آلیاژ فولاد CK45 از نتایج آزمون کشش تک‌محوری ارائه شده در کتابخانه نرم افزار دفرم برداشته شده و در بخش خصوصیات مواد در نرم‌افزار ثبت گردید. در قسمت برهم‌کنش، شرایط تماسی بین مجموعه قالب و قطعه کار تعریف گردید و مقادیر ضریب اصطکاک برای نمونه فولادی مشابه با مقادیر به‌دست آمده در روش آزمایش‌های تجربی و مطابق با مقادیر جدول ۲ در نظر گرفته شد. کلیه شرایط مرزی اعم از قیود موجود در روی اجزاء قالب و قطعه کار تعریف شد. نوع پرس با توجه به آزمایش‌های انجام شده از نوع هیدرولیکی می‌باشد که در نرم‌افزار مشخص شده و سرعت حرکت سنبه نیز مشابه با آزمایش‌های تجربی برابر با ۵ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در این تحلیل قطعه اولیه با استفاده از المان‌های چهاروجهی^۲ که برای تحلیل مسائل شکل‌دهی در حالت سه‌بعدی مناسب می‌باشند، با اندازه و توزیع یکنواخت گسسته‌سازی شده و مش‌بندی گردید. المان‌های چهاروجهی از جمله المان‌های جامد^۳ (کانتینیوم) می‌باشند. معمولاً از المان‌های چهاروجهی و شش‌وجهی برای تحلیل مسائلی که دارای تماس و مقدار کرنش بالا هستند، استفاده می‌شود. برای هر شبیه‌سازی، مش‌بندی با تعیین اندازه کوچک‌ترین المان، نسبت طول به عرض المان‌ها و همچنین تعیین معیار شبکه‌بندی مجدد با توجه به اندازه المان‌ها صورت گرفت. حرکت قالب به ازای هر مرحله نسبت به اندازه

1. DEFORM
2. Tetrahedral
3. Solid

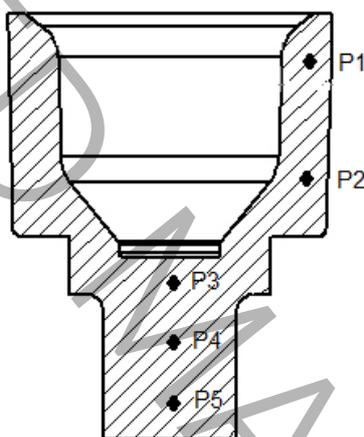
کوچک‌ترین المان موجود در نمونه تعیین می‌شود. این اندازه به‌طور معمول $\frac{1}{3}$ تا $\frac{2}{3}$ اندازه کوچک‌ترین المان موجود که در قسمت المان‌بندی تعیین شده است، می‌باشد. جهت جلوگیری از اعوجاج بیش از حد المان‌ها در حین تغییر شکل پلاستیک فرایند اکستروژن از الگوریتم‌های مش‌بندی مجدد استفاده شد.

نمودار حساسیت تحلیل عددی از لحاظ مقدار کرنش پلاستیک مؤثر اندازه‌گیری شده در نقطه P3 مشخص شده در شکل ۹ در وسط قطعه اکستروژد شده نسبت به سایز مش، مطابق با شکل ۱۰ رسم شده است. بعد از مقایسه المان‌ها، المان انتخابی بهینه برای قطعه اولیه با اندازه 0.75 میلی‌متر استفاده شد. در شکل ۱۱ مراحل مختلف شکل‌گیری قطعه فولادی تنه مفصل فنجان‌شکل و کرنش مؤثر مربوطه نشان داده شده است.

جدول ۲: روانکارهای مورد استفاده در تحقیق حاضر

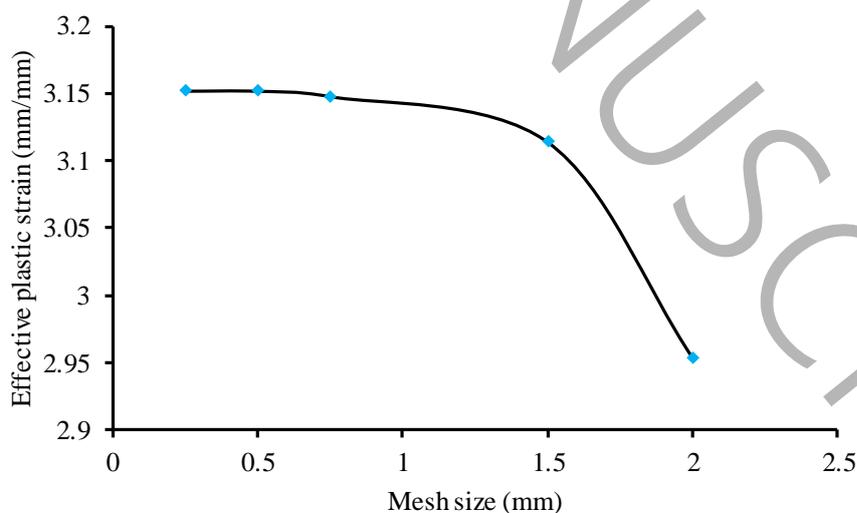
Table 2. Lubricants used in the present study

MoS ₂	Zn ₂ Fe (Po ₄) ₂	گرافیت	بدون روانکار	نوع روانکار
۰٫۱۳	۰٫۱۷	۰٫۲۱	۰٫۴	ضریب اصطکاک



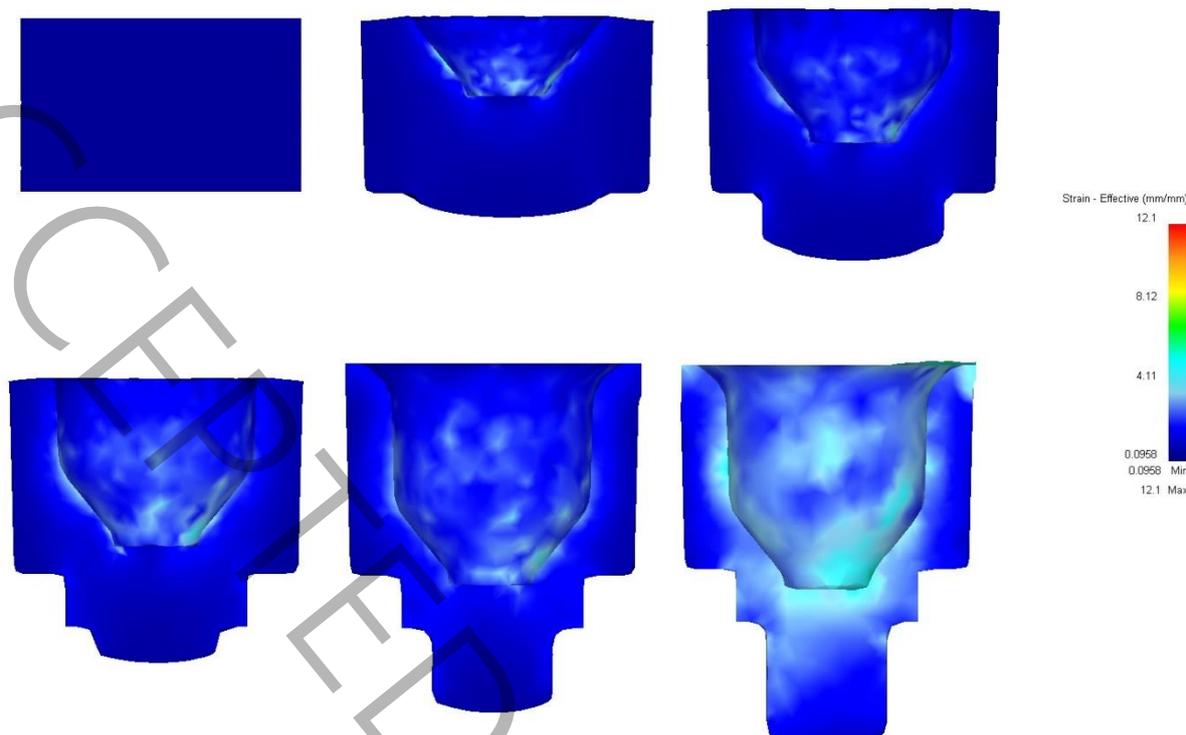
شکل ۹: نقاط مشخص جهت سختی‌سنجی نمونه‌های نهایی تولید شده با روش اکستروژن

Fig. 9. Vickers hardness measurement points on the final extruded specimens



شکل ۱۰: دیاگرام حساسیت مش با خروجی کرنش مؤثر پلاستیک

Fig. 10. Mesh sensitivity diagram based on the effective plastic strain



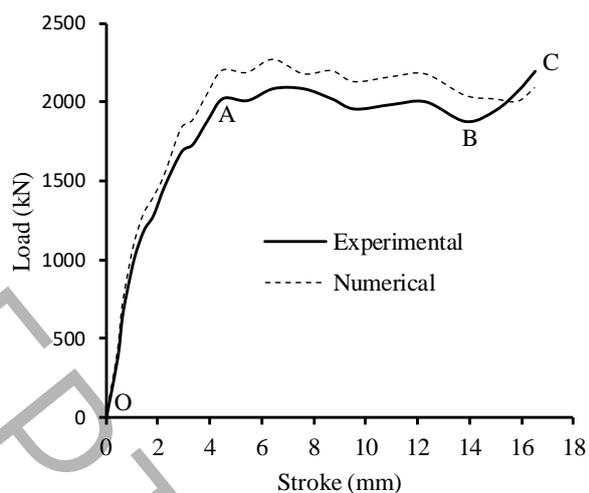
شکل ۱۱: مراحل مختلف شکل‌گیری قطعه فولادی تنه مفصل فنجان‌شکل

Fig. 11. Different stages of forming of the cup-shaped steel joint body

۴- نتایج و بحث

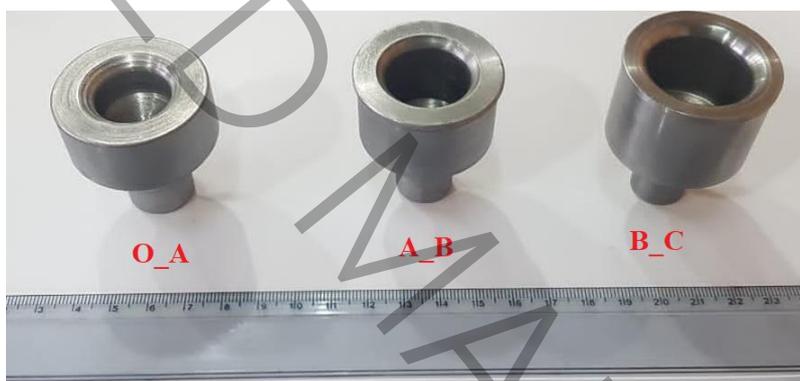
۴-۱- تغییرات نیرو-جابجایی در فرایند اکستروژن

منحنی نیرو-جابجایی یکی از شاخص‌های اصلی برای تحلیل مکانیکی فرایند اکستروژن سرد است، زیرا اثر هم‌زمان مقاومت تغییرشکل پلاستیک ماده، اصطکاک تماس قالب-قطعه‌کار و محدودیت‌های هندسی قالب را منعکس می‌کند. مطابق شکل ۱۲، منحنی نیرو-جابجایی حاصل از فرایند اکستروژن ترکیبی سرد قطعه فنجان‌شکل تنه مفصل دارای سه ناحیه متمایز OA، AB و BC است. ناحیه OA، تماس اولیه سنبه با قطعه‌کار و آغاز پر شدن محفظه قالب رخ می‌دهد. در این مرحله، به دلیل نبود مسیر جریان پایدار و تمرکز تغییرشکل در نواحی ابتدایی دیواره‌ها و گوشه‌های قالب، کرنش پلاستیک مؤثر به صورت موضعی افزایش یافته و نیروی سنبه با شیب تند تا حدود ۲۰۰۰ کیلو نیوتن افزایش می‌یابد. سهم غالب نیروی اعمالی در این ناحیه مربوط به غلبه بر تنش تسلیم فولاد CK45 آنیل شده و اصطکاک تماس اولیه است. در ناحیه AB، جریان ماده به حالت شبه پایدار می‌رسد. در این مرحله، ماده به‌طور هم‌زمان در نواحی اکستروژن مستقیم و غیرمستقیم 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 قطعه‌کار مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ رخ می‌دهد. در این مرحله، به دلیل افزایش محدودیت جریان ماده و شکل‌گیری نواحی با تغییرشکل محدود در گوشه‌ها، تمرکز تنش افزایش یافته و نیروی سنبه مجدداً روند افزایشی پیدا می‌کند. مقایسه نتایج تجربی و عددی در شکل ۱۲ 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، روانکار $Zn_2Fe(PO_4)_2$ در طول فرایند دچار تغییر رفتار موضعی می‌شود.



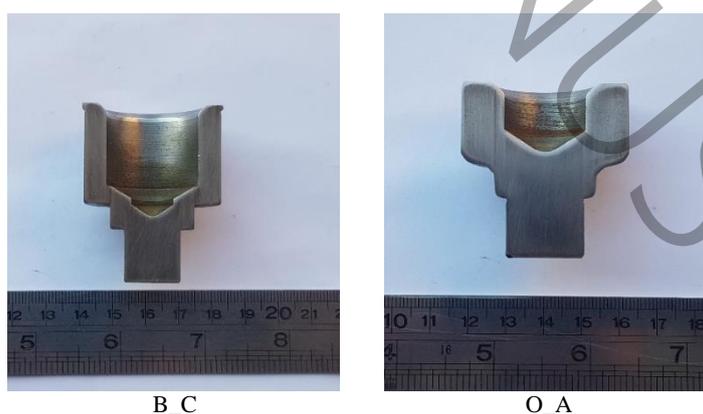
شکل ۱۲: مقایسه نمودار نیرو-جابجایی فرایند شکل‌دهی تجربی و عددی

Fig. 12. Comparison of load–stroke curves in experimental and numerical forming processes



شکل ۱۳: تصویر مرحله به مرحله نمونه‌ها حین فرایند اکستروژن

Fig. 13. Step-by-step images of the specimens during the extrusion process



شکل ۱۴: نمای برش خورده نمونه‌ها در طول فرایند اکستروژن

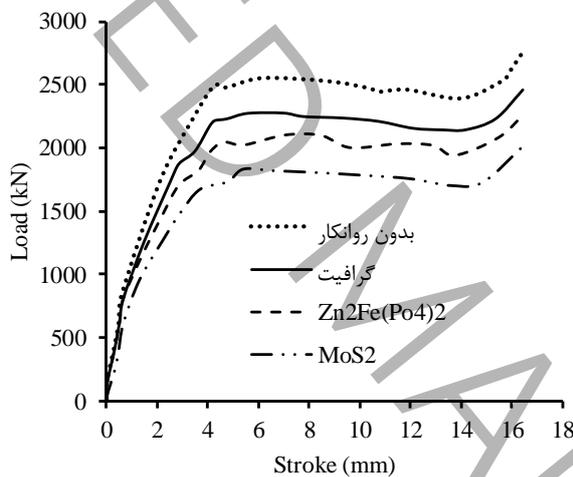
Fig. 14. Cross-sectional views of the specimens during the extrusion process

۲-۴- تأثیر ضریب اصطکاک و نوع روانکار

برای به‌دست‌آوردن ضرایب اصطکاک مختلف، از روش کاهش ارتفاع نمونه تا حدود نصف ارتفاع اولیه نمونه و به‌صورت فشرده‌سازی

توسط دستگاه پرس استفاده شده است [۳].

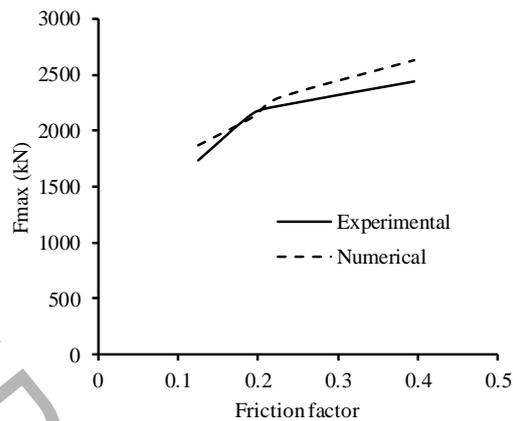
تأثیر ضریب اصطکاک و نوع روانکار بر نیروی شکل‌دهی در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. برای تولید قطعه نهایی، با کاهش ضریب اصطکاک نیروی لازم کاهش یافت (شکل ۱۵). از دیدگاه مکانیک تماس، افزایش ضریب اصطکاک موجب افزایش تنش برشی تماسی در فصل مشترک قالب-قطعه کار شده و جریان ماده در راستای دیواره‌ها را محدود 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 اکستروژن مورد نیاز است. این امر به این دلیل است که، ماده اکستروژن مقاومت بیشتری را از دیواره‌های محفظه اکستروژن 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 ۱۵: نمودار نیرو- جابجایی در روانکارهایی با ضرایب اصطکاک مختلف در روش تجربی

Fig. 15. Load-displacement curves for lubricants with different friction factors in experimental method

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 بیلت 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 بیلت 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 ۱۶ نشان داده شده است با افزایش ضریب اصطکاک میزان نیروی حداکثر نیز افزایش می‌یابد. میزان حداکثر نیروی سنبه در روانکار MoS₂ برابر ۱۷۵۰ کیلونیوتن است در حالی که این میزان در حالت بدون روانکار ۲۴۵۰ کیلونیوتن می‌باشد. این اختلاف ۴۰ درصد 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 ۱۶ 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.

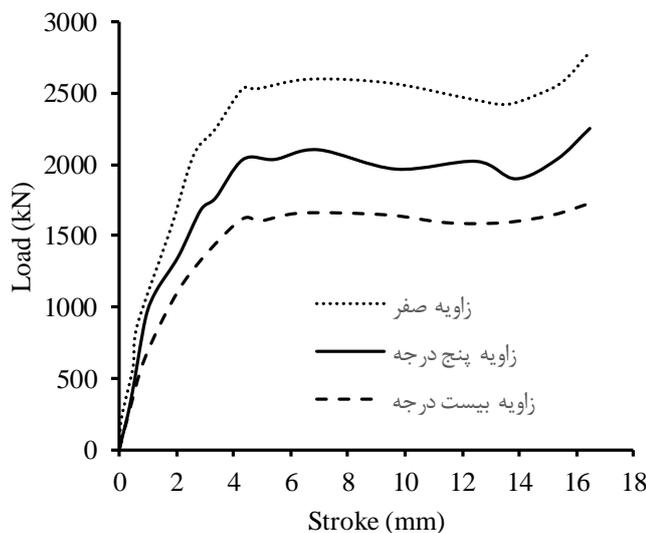


شکل ۱۶: نمودار ضریب اصطکاک به حداکثر نیرو در فرایند شکل‌دهی تجربی و عددی

Fig. 16. Effect of friction factor on maximum forming force in experimental and numerical processes

۳-۴- اثر زاویه قالب بر نیروی شکل‌دهی

هرگاه زاویه بین گوشه‌های ماتریس و سنبه بسیار کوچک باشد، ماده اکستروژده شده دچار تنش‌های بالایی می‌شود که این امر منجر به افزایش نیروی اکستروژن و دشوارتر شدن فرایند اکستروژن می‌گردد. در مقابل، بزرگ بودن بیش از حد این زاویه می‌تواند باعث اختلال در جریان مواد شده و بر مقدار نیروی اکستروژن تأثیر منفی بگذارد. به‌طور کلی، انتخاب یک زاویه بهینه و متوسط بین گوشه‌های ماتریس و سنبه موجب بهبود یکنواختی جریان مواد و کاهش نیروی اکستروژن می‌شود. در زاویه صفر درجه، تغییر مسیر ناگهانی جریان ماده در گوشه قالب موجب تمرکز شدید تنش و کرنش پلاستیک مؤثر می‌شود که این پدیده مقاومت تغییر شکل را افزایش داده و منجر به افزایش نیروی سنبه می‌گردد. با افزایش زاویه قالب، تغییر مسیر جریان ماده به‌صورت تدریجی انجام شده و مؤلفه‌های برشی تنش کاهش می‌یابند. این امر باعث توزیع یکنواخت‌تر کرنش پلاستیک و کاهش نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی می‌شود. با این حال، تأثیر دقیق زاویه بر نیروی اکستروژن ممکن است به عوامل مختلفی مانند ماده اکستروژده شده، ابعاد قالب اکستروژن و شرایط پردازش مورد استفاده بستگی داشته باشد. تأثیر زاویه بر نیروی شکل‌دهی اکستروژن در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با افزایش زاویه، نیروی شکل‌دهی کاهش یافت، به‌طوری که نیروی حداقل در زاویه صفر درجه در حدود ۲۵۰۰ کیلونیوتن و در زاویه ۲۰ درجه ۱۶۰۰ کیلونیوتن است که نشان می‌دهد، با انتخاب یک زاویه مناسب نیروی اکستروژن تا حدود ۵۶ درصد کاهش یافته است. زاویه سنبه ۵ درجه، زاویه ثابت آزمایش‌ها است.

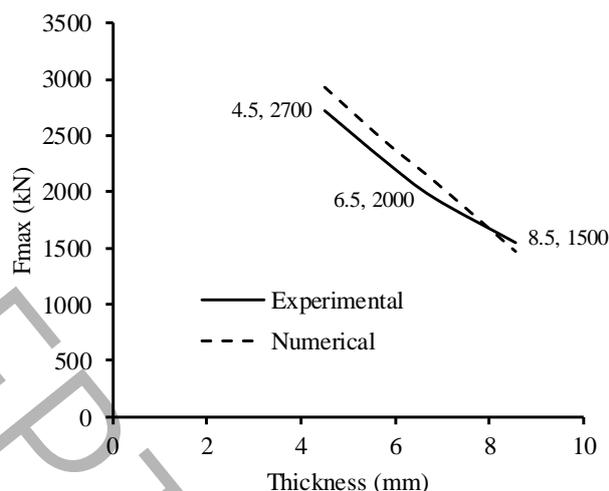


شکل ۱۷: تأثیر زاویه بر مقدار نمودار نیرو-جابجایی در روش تجربی

Fig. 17. Effect of die angle on the load-displacement diagram in experimental method

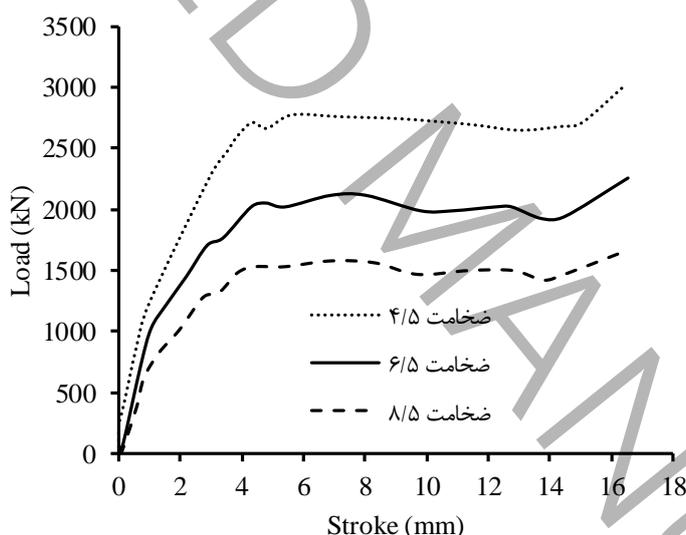
۴-۴- تأثیر ضخامت دیواره بر روی تغییرات نیرو

در این پژوهش سه نوع قطعه کار با ضخامت دیواره‌های مختلف و با اندازه‌های ۴٫۵، ۶٫۵ و ۸٫۵ میلی‌متر تولید شدند. مطابق شکل ۱۸، با افزایش میزان ضخامت، حداکثر نیروی شکل‌دهی نیز کاهش یافت. علت این امر این است که هر مقدار ضخامت دیواره کم‌تر باشد به نیروی بیشتری برای تغییر شکل نیاز است. در دیواره‌های نازک‌تر، 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 ضخامت دیواره باعث کاهش نسبت تغییر شکل و تسهیل جریان ماده در قالب شده و نیروی شکل‌دهی کاهش می‌یابد. کاهش نیروی شکل‌دهی با افزایش ضخامت دیواره را نمی‌توان صرفاً به «سهولت جریان ماده» نسبت داد، بلکه این پدیده ناشی از برهم‌کنش هم‌زمان چند عامل مکانیکی و هندسی است. با افزایش ضخامت دیواره، نسبت تغییر شکل حجمی^۱ در ناحیه دیواره 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 دیواره‌های نازک‌تر، 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 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 ضخامت دیواره 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 دیواره‌های نازک‌تر، سهم نیروهای اصطکاک در برابر نیروی تغییر شکل پلاستیک غالب‌تر است. بنابراین، با افزایش ضخامت دیواره، هم مؤلفه اصطکاک و هم مؤلفه تغییر شکل پلاستیک نیروی سنبه کاهش می‌یابند. نتایج شبیه‌سازی المان محدود نیز این تحلیل را تأیید می‌کند؛ به‌گونه‌ای که توزیع کرنش پلاستیک مؤثر در دیواره‌های ضخیم‌تر یکنواخت‌تر بوده و مقادیر بیشینه کرنش به‌طور محسوسه کاهش یافته است. این کاهش کرنش پلاستیک مؤثر، مطابق با نتایج تجربی، مستقیماً به افت نیروی شکل‌دهی مشاهده‌شده در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ منجر شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، حداکثر نیرو برای ضخامت ۸٫۵ میلی‌متر در حدود ۱۵۰۰ کیلونیوتن و برای ضخامت ۴٫۵ میلی‌متر در حدود ۲۷۰۰ کیلونیوتن است که نشان از افزایش نیروی حدود ۸۰ درصد دارد. البته باید به این نکته نیز توجه کرد که امکان کاهش یا افزایش بیش از اندازه ضخامت دیواره به دلیل پارگی و یا عدم توانایی در تولید نیز وجود دارد. در شکل ۱۹ نیز نشان داده شده است که میزان ضخامت دیواره 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 ۱۸: نمودار تأثیر ضخامت‌های مختلف دیواره بر روی حداکثر نیروی شکل‌دهی تجربی و عددی

Fig. 18. Effect of different wall thicknesses on the maximum forming force in experimental and numerical processes



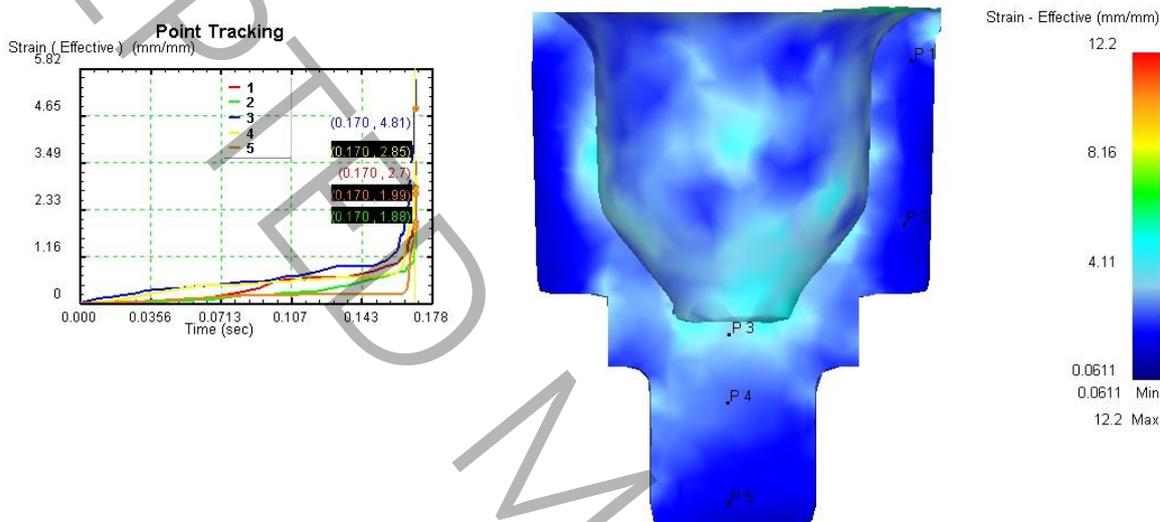
شکل ۱۹: نمودار نیرو-جابجایی بر حسب ضخامت دیواره قطعه‌کار در روش تجربی

Fig. 19. Load-displacement diagram as a function of workpiece wall thickness in experimental method

۴-۵- تغییرات سختی بر اساس نوع روانکار

اندازه‌گیری مقدار سختی میانگین و ماکروسکوپی یک قطعه‌کار توسط روش سختی‌سنجی برینل انجام گرفت. به طوری که مقدار سختی میانگین قطعه بدون آنیل حدود ۱۸۷ برینل و بعد از آنیل حدود ۱۴۳ برینل شد. در ادامه روش سختی‌سنجی ویکرز به منظور بررسی تغییرات موضعی سختی در نواحی مختلف قطعه و تحلیل ارتباط آن با کرنش پلاستیک مؤثر به کار گرفته شد. پس از تولید نهایی قطعه‌کار، آن را از وسط برش داده و مطابق شکل ۹ سختی ویکرز آن در پنج نقطه متفاوت برای ضخامت دیواره ۶/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. هنگامی که فلزی اکسترود می‌شود، ماده با فشار و حرارت بالا از طریق قالب جریان پیدا می‌کند. استفاده از روان‌کننده در این فرایند می‌تواند بر ویژگی‌های نهایی قطعه اکسترود شده از جمله سختی آن تأثیر بگذارد. ضریب اصطکاک روان‌کننده مورد استفاده می‌تواند بر دما، فشار و سرعت فلز در حین اکسترودن تأثیر بگذارد. ضریب اصطکاک بالاتر معمولاً نیروی مورد نیاز برای اکسترودن را افزایش می‌دهد.

دهد که می‌تواند به دلیل افزایش تغییر شکل پلاستیک منجر به مقدار سختی بالاتری شود. برعکس، ضریب اصطکاک کم‌تر به نیروی کم‌تری نیاز دارد و در نتیجه مقدار سختی کم‌تری ایجاد می‌شود. همان‌طور که گفته شد، عوامل زیادی وجود دارند که می‌توانند بر سختی نهایی قطعه اکستروژن شده تأثیر بگذارند که تأثیر ضریب اصطکاک روان‌کننده 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 ۲۰ کرنش پلاستیک مؤثر^۱ حاصل از فرایند شبیه‌سازی نشان داده شده و مقادیر آن در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به توضیحات داده شده و مطابق جدول ۳، می‌توان گفت که، با افزایش ضریب اصطکاک میزان سختی قطعه نیز افزایش یافته است. در بین نقاطی که سختی آن‌ها بررسی شده، نقطه سه به دلیل نزدیکی به انتهای نوک قطعه، سختی بیشتری دارد. لازم به توضیح است که سختی گزارش شده در جدول ۳ از قطعات آنیل شده می‌باشد.



شکل ۲۰: کرنش پلاستیک مؤثر حاصل از فرایند شبیه‌سازی در نقاط مختلف

Fig. 20. Effective plastic strain obtained from the simulation at different locations

جدول ۳: مقدار سختی و کرنش پلاستیک مؤثر در نقاط مختلف قطعات تولیدی و با روانکارهای مختلف در روش‌های تجربی و عددی

Table 3. Hardness and EPS values at different points of the produced specimens using various lubricants in EFM and experimental methods

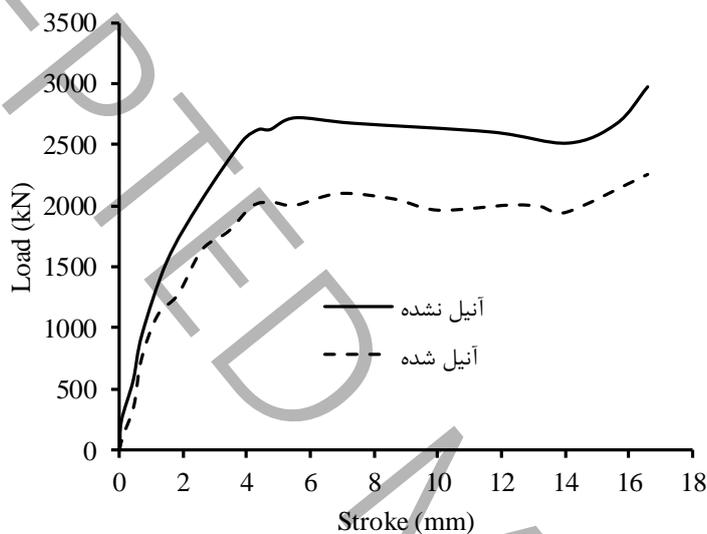
m=0.4		m=0.21		m=0.17		m=0.13		موقعیت
EPS	HV	EPS	HV	EPS	HV	EPS	HV	
۳٫۶	۲۸۹	۲٫۸	۲۷۸	۲٫۷	۲۷۰	۱٫۱	۲۶۳	P1
۴٫۹	۳۰۲	۳٫۷	۲۹۰	۱٫۸۸	۲۸۲	۲٫۸	۲۷۵	P2
۵٫۳	۳۱۷	۵٫۱	۳۰۵	۴٫۸	۲۹۵	۳٫۵	۲۸۷	P3
۴٫۶	۲۹۵	۱٫۹	۲۸۳	۲٫۸۵	۲۷۵	۱٫۷	۲۶۸	P4
۳٫۸	۲۹۲	۱٫۹	۲۸۲	۱٫۹۹	۲۷۳	۱٫۶	۲۶۶	P5

۶-۴- تأثیر عملیات حرارتی آنیل کردن

عملیات حرارتی بازپخت بسته به ماده مورد استفاده و فرایند خاص آنیل کردن می‌تواند اثرات متعددی بر روی قطعات اکستروژن شده داشته باشد. این فرایند اغلب برای کاهش تنش و بهبود شکل‌پذیری و چقرمگی یک ماده استفاده می‌شود. برای قطعات اکستروژن شده،

1. Effective Plastic Strain (EPS)

آنیل کردن می‌تواند به کاهش تنش‌های پسماند و بهبود پایداری ابعادی قطعه کمک کند. این امر می‌تواند به‌ویژه برای قطعاتی که در معرض عملیات ماشین‌کاری یا سنگ‌زنی قرار می‌گیرند، بسیار مهم باشد. بازپخت همچنین می‌تواند خواص مکانیکی ماده اکستروژن شده مانند استحکام و سختی آن را بهبود بخشد. این امر می‌تواند به‌ویژه برای قطعاتی که تحت بارهای زیاد و یا نیروهای ضربه‌ای قرار می‌گیرند مفید باشد. با این حال، اثرات خاص آنیل کردن بر روی قطعات اکستروژن شده به عوامل بسیاری از جمله مواد مورد استفاده، فرایند اکستروژن و شرایط خاص آنیل کردن بستگی دارد. با توجه به توضیحات بیان شده، نیروی لازم برای تغییر شکل قطعات آنیل شده و آنیل نشده در شکل ۲۱ نشان داده شده است. براساس مطالب گفته شده، قطعات آنیل شده به دلیل نداشتن تنش در داخل قطعه با نیروی کم‌تری تغییر شکل یافته‌اند.



شکل ۲۱: نمودار نیرو-جابجایی بر حسب قطعات آنیل شده و آنیل نشده در روش تجربی

Fig. 21. Load-displacement diagram for annealed and unannealed specimens in experimental methods

۴-۷- اثر ضخامت دیواره بر سختی نهایی

تغییر ضخامت دیواره می‌تواند بر سختی قسمت اکستروژن شده تأثیر بگذارد. به‌طور کلی، کاهش ضخامت دیواره می‌تواند منجر به افزایش سختی قطعه اکستروژن شده شود، در حالی که افزایش ضخامت می‌تواند منجر به کاهش سختی شود. این امر به این دلیل است که، یک دیوار نازک‌تر نیاز به نیروی زیادی برای تغییر شکل دارد و بنابراین باعث افزایش سختی آن می‌گردد. جدول ۴ تأثیر ضخامت دیواره بر روی سختی نهایی قطعه‌کار را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که، افزایش ضخامت دیواره باعث سرعت بیشتر فرایند اکستروژن و کاهش نیروی شکل‌دهی می‌شود، پس سختی کم‌تری در مقایسه با قطعه‌ای دارد که ضخامت نازک‌تری دارد. این تفاوت در میزان سختی در نقاط مختلف قطعه متفاوت بوده و به‌طور تقریبی حدود ۲۰ درصد می‌باشد.

جدول ۴: سختی و کرنش پلاستیک مؤثر نمونه‌ها در نقاط مختلف بر حسب ضخامت دیواره‌های مختلف در روش تجربی و عددی

Table 4. Hardness and EPS of specimens at various points as a function of different wall thicknesses in FEM and experimental methods

موقعیت	۸/۵		۶/۵		۴/۵	
	EPS	HV	EPS	HV	EPS	HV
P1	۱	۲۶۲	۲/۷	۲۷۰	۵/۳	۳۰۸
P2	۱/۲	۲۶۴	۱/۸۸	۲۸۲	۵/۱	۳۰۵
P3	۲/۳	۲۹۰	۴/۸	۲۹۵	۵/۵	۳۱۰
P4	۲/۸	۲۷۴	۲/۸۵	۲۷۵	۲	۲۷۳

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، قابلیت تولید قطعه فولادی تنه مفصل فنجان‌شکل خودروی پژو ۴۰۵ از جنس فولاد CK45 با استفاده از فرایند اکستروژن سرد به صورت تجربی و عددی بررسی شد. نتایج نشان داد که این فرایند قادر به تولید قطعه‌ای با هندسه پیچیده و کیفیت مناسب بوده و می‌تواند به عنوان جایگزینی کارآمد برای روش‌های متداول پرهزینه مورد استفاده قرار گیرد. کاهش ضریب اصطکاک از ۰/۴۰ به ۰/۱۳ موجب کاهش حدود ۴۰ درصدی حداکثر نیروی سنبه شد که بیانگر نقش تعیین‌کننده شرایط روانکاری در کنترل نیروهای شکل‌دهی است. همچنین افزایش زاویه قالب از صفر به ۲۰ درجه باعث کاهش حدود ۵۶ درصدی نیروی اکستروژن شد که ناشی از بهبود مسیر جریان ماده درون حفره قالب است. افزایش ضخامت دیواره از ۴/۵ به ۸/۵ میلی‌متر نیز با کاهش حدود ۸۰ درصدی نیروی شکل‌دهی همراه بود. نتایج سختی‌سنجی و شبیه‌سازی نشان داد که توزیع سختی در قطعه نهایی به طور مستقیم با کرنش پلاستیک مؤثر مرتبط است و شرایط اصطکاک بالا منجر به افزایش ناهمگنی در توزیع سختی و کرنش پلاستیک می‌شود. عملیات حرارتی آنیل قبل از اکستروژن نیز با کاهش تنش تسلیم ماده، نیروی لازم برای شکل‌دهی را کاهش داده و یکنواختی سختی را بهبود بخشید. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با انتخاب بهینه پارامترهای فرایند، اکستروژن سرد فولاد CK45 می‌تواند به عنوان یک روش قابل اعتماد برای تولید قطعات صنعتی فنجان‌شکل در کاربردهای خودرویی باشد.

منابع

- [1] V. Modanloo, B. Akhondi, and Y. Dadgar Asl, Minimizing the required forming force in the sheet hydroforming process using a fractional factorial design, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* 9(12) (2023) 1–9, (in Persian)
- [2] V. Modanloo, V. Alimirzaloo, and M. Elyasi, 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* 45 (2019).
- [3] E. Haddadi, H. Jafarzadeh, and M. Shameli, Numerical and Experimental Study of Backward-Radial Extrusion Process for Flanged Brass Alloy C26000 Parts, *Journal of Materials Engineering and Performance* (2025) 1–22.
- [4] M. Beyranvand and H. Haghighat, A New Deformation Model for Bimetal Tubes Extrusion Process, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 49(4) (2018) 819–828, (in Persian)
- [5] J. Seyed Mohammad and N. Ali Mohammad Naserian, Numerical and experimental investigation of non-Newtonian high viscosity flow field in multi materials extrusion process, *Amirkabir Journal Mechanical Engineering* 51(6) (2020) 121–130, (in Persian)
- [6] s. Hosseinzadeh, A. Davari, and A.H. Hashemian, Experimental and Numerical Analysis of the Extrusion Process in the Forming of Metal Composite metal billets, *Modares Mechanical Engineering* 24(2) (2024) 119–129, (in Persian)
- [7] A. Samadi Gooshchi, K. Abrinia, and M.K. Besharati Givi, Analysis of Three Dimensional of Forward Extrusion using Slab Method and Finite Element, *University College of Engineering* 43(4) (2009) 527–535.
- [8] H. Haghighat and H. Shayesteh, Upper bound analysis for hybrid sheet metals extrusion process through curved dies, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 24(10) (2014) 3285–3292.
- [9] J.H. Shim, J.H. Ok, H.J. choi, H.S. Koo, and B.B. Hwang, A process sequence design of multi-step cold extrusion process for hollow parts, in *Materials Science Forum* 475 (2005) 4195–4198.
- [10] A. Buschhausen, K. Weinmann, J.Y. Lee, and T. Altan, Evaluation of lubrication and friction in cold forging using a double backward-extrusion process, *Journal of materials processing technology* 33(1-2) (1992) 95–108.
- [11] M.S. Joun, M.C. Park, Y. Heo, and D.H. Kim, A Review of Friction and Lubricant in Metal Forming. *Lubricants* 13(12) (2025) 512.
- [12] Y. Sagisaka, et al., Evaluation of environmentally friendly lubricants for cold forging, *Journal of Materials Processing Technology* 212(9) (2012) 1869–1874.
- [13] A. Yahaya, S. Samion, N.A.M. Ahyan, and M.K.A. Hamid, Cold extrusion using biodegradable oil as lubricant: Experimental and simulation analysis, *Jurnal Tribologi*, 30 (2021) 116–132.
- [14] A.L. de Moraes Costa, U.S. da Silva, and H.S. Valberg, On the friction conditions in FEM simulations of cold extrusion, *Procedia Manufacturing* 47 (2020) 231–236.
- [15] H. Hou, L. Zhang, X. Wang, M. Mei, and Y. Zhao, Numerical and experimental research of the effect of friction on cold extrusion internal thread process, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 46(8) (2024) 515.
- [16] M. Lotfi, S. Gasemi Benadkoki, M. Kalantar, Investigation of the Effect of Intercritical Annealing Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of CK45 Steel Compared to Quench and Temper Conditions, in *The First National Conference on Advanced Materials* (2020) 45–58.