

شبیه‌سازی اکستروژن پروفیل آلومینیوم با در نظر گرفتن اثر روانکار

سعید محمدزاده

مهسا خرازی*

داود جلالی وحید

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

چکیده

فرآیند اکستروژن آلومینیوم روشی متداول برای تولید پروفیل‌های آلومینیومی با سطح مقطع ثابت و طول زیاد است. در فرآیند اکستروژن آلومینیوم اصطکاک یکی از مهمترین عوامل بوده و نقش بسیار مهمی دارد. اصطکاک روی شکل پروفیل خروجی، توزیع دما، نیروی اکستروژن و بسیاری دیگر از جنبه‌های مهم فرآیند تاثیرگذار است. یکی از روش‌های کنترل و کمتر کردن اصطکاک بین سطوح در فرآیندهای مختلف استفاده از روانکار می‌باشد. هدف این مقاله بررسی تاثیر روانکار بصورت تغییرات ضریب اصطکاک بین سطوح مختلف در فرآیند اکستروژن آلومینیوم آلیاژ AA 6082 می‌باشد. برای این امر روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار تجاری DEFORM بکار گرفته شده و به منظور سنجش دقت نتایج بدست آمده، از مقادیر تجربی ارائه شده در مراجع استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با کاهش مقدار اصطکاک، نیروی اکستروژن مورد نیاز و دمای حداکثر قطعه کار به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. همچنین شکل پروفیل خروجی با کاهش مقدار اصطکاک به علت کاهش اختلاف سرعت در نقاط مختلف پروفیل بهبود یافته و نقاط مرده جریان کاهش پیدا می‌کنند. **واژه‌های کلیدی:** فرآیند اکستروژن آلومینیوم، پروفیل‌های آلومینیومی، اصطکاک، روانکار، روش المان محدود.

Simulation of aluminum profile extrusion considering the effect of lubricant

S. Mohammadzadeh

Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

M. Kharazi

Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

D. Jalali Vahid

Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Abstract

Aluminum extrusion processes is a common method for production of prismatic aluminum profiles with identical cross-section. In extrusion process, friction is one of the most important factors and it plays a crucial role in this process. Friction affects the output profile shape, temperature distribution, extrusion load and etc. One of the best methods to control and reduce the friction between different surfaces during extrusion process is using a lubricant. The aim of this paper is studying the effect of lubricant in aluminum extrusion process of the AA6082 alloy by employing the varying friction coefficient between interfaces. For this purpose the finite element analysis has been adopted by using the commercial DEFORM 3D finite element software and in order to verify the obtained results, the experimental results which are available in the literature have been used. The results show that, the friction reduction decreases the required extrusion force and maximum temperature of work piece significantly. In addition, by reducing the amount of friction between interfaces, the more uniform velocity distribution at the output profile is obtained which leads to improvement in the output profile shape and reduction in the dead metal zones.

Keywords: Aluminum extrusion process, Aluminum profiles, Friction, Lubricant, Finite element method.

می‌شود، پروفیل با سطح مقطع‌های متنوعی ایجاد می‌شود. از مهمترین ویژگی‌های فرآیند اکستروژن فشار بالای مورد نیاز برای اکستروژن کردن پروفیل است. فشار باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک در قطعه و افزایش اصطکاک قطعه کار با سطوح تجهیزات و در نتیجه افزایش دما می‌شود. لذا این عمل بایستی به آهستگی انجام شود تا مانع از بالا رفتن بیش از حد دمای پروفیل خروجی و ذوب شدن آن شود. از مزایای عمده استفاده از فرآیند اکستروژن می‌توان به خصوصیات فیزیکی مناسب، استحکام بالای پروفیل اکستروژن شده، ابعاد دقیق، صرفه اقتصادی، سرعت تولید بالا و توانایی طراحی قالب برای تولید محصولات متنوع اشاره کرد.

فرآیند اکستروژن دارای معایبی نیز است که باعث اختلال در روند تولید می‌شود. به علت وجود اصطکاک بین سطح خارجی بیلت و محفظه و بدلیل وجود مقاومت در برابر لغزش سطوح روی هم، یک جریان شعاعی از خارج بیلت به سمت مرکز آن بوجود آمده و باعث

۱- مقدمه

اکستروژن^۱ یک فرآیند تغییر شکل بر اساس رفتار پلاستیک مواد می‌باشد. در این فرآیند شمش فلزی که بیلت^۲ نامیده می‌شود توسط کوبه تحت فشار قرار می‌گیرد و چون بیلت توسط محفظه^۳ احاطه شده است تنش ایجاد شده در آن به شدت افزایش می‌یابد و زمانی که تنش ایجاد شده در بیلت به تنش سیلان^۴ ماده برسد، بیلت از طریق مجرای قالب^۵ که در واقع تنها مسیر ممکن جهت عبور مواد است سیلان پیدا می‌کند. از آنجایی که قالب بر حسب نیاز به شکل‌های گوناگونی ساخته

¹ Extrusion
² Billet
³ Container
⁴ Flow stress
⁵ Die

بخشی جویباری [۴] در سال ۲۰۰۲ جهت مطالعه اصطکاک اکستروژن، نیروی مورد نیاز برای اکستروژن را به سه بخش تقسیم کرد. این بخش‌ها شامل نیروی اصطکاک بین بیلت و محفظه، نیروی اصطکاک بین بیلت و قالب و نیروی تغییر شکل بودند. در اکستروژن مستقیم با پر شدن کامل مجرای قالب از مواد، نیروی اصطکاک آن به حداکثر رسیده و نیروی مورد نیاز برای تغییر شکل نیز تقریباً ثابت باقی می‌ماند. اما در طرف دیگر با پیشروی کوبه سطح تماس بین بیلت و محفظه به مرور کمتر می‌شود و در نتیجه نیروی اصطکاک آن در طی فرآیند کاهش می‌یابد. بنابراین در اکستروژن مستقیم بعد از رسیدن نیروی اکستروژن کل به مقدار حداکثر، نیروی اکستروژن رفته رفته کاهش می‌یابد. در این مطالعه مقدار ضریب اصطکاک بین سطوح ۰٫۸۴ پیشنهاد داده شده است.

فلیتا و شپرت [۵] در سال ۲۰۰۲ تاثیر دما روی مقدار ضریب اصطکاک در فرآیند اکستروژن آلومینیوم را مورد مطالعه قرار دادند. آنها بیلت‌هایی با دماهای مختلف از ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه سلسیوس را با شرایط مشابه اکستروژن کردند. سپس با مقایسه مقادیر تجربی با مقادیر بدست آمده از شبیه سازی به ازای ضرایب اصطکاک مختلف در دماهای متفاوت، مقدار ضریب اصطکاک را استخراج کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که مقدار ضریب اصطکاک حساس به دما بوده و با افزایش دمای اولیه بیلت مقدار آن حالت صعودی پیدا می‌کند. در این آزمایش ضرایب اصطکاک از مقدار ۰٫۶۵۴ به ازای دمای اولیه ۳۰۰ درجه سلسیوس به ۰٫۹۱۷ در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس افزایش یافت.

کیم و همکارانش [۶] در سال ۲۰۰۶ درباره اثر تغییر اصطکاک در شکل خروجی پروفیل مستطیلی جدار نازک مطالعاتی انجام دادند. آنها در شبیه سازی، آلومینیوم را به صورت پلاستیک صلب^۱ در نظر گرفتند. یعنی اینکه از تغییر شکل الاستیک ماده به خاطر ناچیز بودن در مقابل تغییر شکل‌های پلاستیک صرف نظر کردند. بررسی آنها نشان داد که تغییرات ضریب اصطکاک باعث تغییر شکل پروفیل خروجی می‌شود. در تحقیق دیگری شیکورا و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۷ درباره تاثیر اصطکاک روی شکل جریان ماده مطالعاتی انجام دادند. بررسی اشکال بدست آمده نشان داد که که جریان فلز در ناحیه مرکزی تندتر از نواحی کناری و دیواره بیلت می‌باشد که در واقع به خاطر وجود اصطکاک و چسبندگی ناشی از وجود آن است.

آزمایش دیگری توسط وانگ و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۰ انجام شد. آنها در مطالعه خود از آزمایش DAE^۲ استفاده کردند. این آزمایش ترکیبی از دو اکستروژن معکوس با طول بیرینگ ۲ mm و ۸ mm بود که در آن بیلت به صورت معکوس و همزمان از طریق دو قالب اکستروژن شد. نتایج نشان داد که طول پروفیل خارج شده از بیرینگ با طول کمتر بسیار بیشتر از طول پروفیل خارج شده از بیرینگ با طول بیشتر است. علت این موضوع مقاومت اصطکاکی بیشتر در قالب با طول بیشتر است. همچنین آنها نشان دادند که نتایج مدل‌سازی فرآیند اکستروژن با ضریب اصطکاک ۱ بیشترین مطابقت را با نتایج تجربی دارد.

کشیده شدن ناخالصی‌های روی سطوح به سمت مرکز بیلت می‌شود. همچنین به دلیل اینکه سطح بیلت اغلب دارای اکسیدهای همچون Al_2O_3 یا $MgAl_2O_4$ است، این سیلان ممکن است باعث ایجاد رگه‌های اکسیدی در درون محصول اکستروژن شود [۱].

ایجاد ترک سطحی به خصوص در محصولات اکستروژنی تولید شده از آلیاژهای سخت موضوع مهمی در مبحث عیوب اکستروژن است. هنگامی که اکستروژن در سرعت و دمای بالاتر انجام می‌شود شکل دندانه‌دار در قسمت‌هایی از پروفیل خروجی بوجود می‌آید. این وضعیت از چسبندگی لحظه‌ای پروفیل به سطح قالب به دلیل افزایش موضعی دما در پروفیل ایجاد می‌شود.

به دلیل تغییر شکل ناهمگن در فرآیند اکستروژن، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در ساختار و خواص ابتدا و انتهای یک پروفیل اکستروژن شده وجود دارد. لایه سطحی محصولات اکستروژنی تغییر شکل برشی شدیدتری را نسبت به مناطق مرکزی تحمل می‌کند. اصطکاک در سطح قالب و افزایش موضعی تغییر شکل، هر دو در افزایش دمای سطح محصول نسبت به مرکز آن نقش دارند. این افزایش دما در سطح محصولات باعث تشکیل دانه‌های درشت‌تری در سطح پروفیل به دلیل تبلور مجدد خواهد شد [۲].

یکی دیگر از عیوب ایجاد شده در فرآیند اکستروژن، انحنای ایجاد شده در محصول خروجی و شکل نامناسب آن است. دلیل این امر اختلاف سرعت در نقاط مختلف سطح مقطع محصول می‌باشد. این اختلاف سرعت می‌تواند به دلیل تفاوت ضخامت قسمت‌های مختلف پروفیل و مقاومت ناشی از اصطکاک باشد. در عمل برای رفع این عیب از تغییر طول بیرینگ در نقاط مختلف قالب استفاده می‌شود که به صورت سعی و خطا انجام می‌گیرد.

یکی از پارامترهایی که در فرآیند اکستروژن توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است اصطکاک می‌باشد. اصطکاک در این فرآیند پدیده‌ای پیچیده بوده و هنوز هم به طور کامل درک نشده است. بنابراین تعیین مقدار صحیح این پارامتر و بررسی تاثیرات آن در فرآیند اکستروژن آلومینیوم ضروری و قابل مطالعه است. امروزه یکی از بهترین روش‌ها برای کنترل مقدار اصطکاک بین سطوح، استفاده از روانکار مناسب است. روانکاری در اکستروژن گرم و سرد و در برخی موارد در اکستروژن فوق گرم قابل استفاده است. روانکارهای مورد استفاده در این زمینه را می‌توان به دو گروه تقسیم بندی کرد [۳]:

۱- روانکارهایی برای دمای کمتر از $1000^\circ C$ مانند گریس، گرافیت، MoS_2 ، میکا، صابون، بنتونیت، قیر معدنی و پلی آمیدهای دما بالا.

۲- روانکارهایی برای دماهای بالاتر از $1000^\circ C$ مانند شیشه، بیسالت و پودرهای کریستالی.

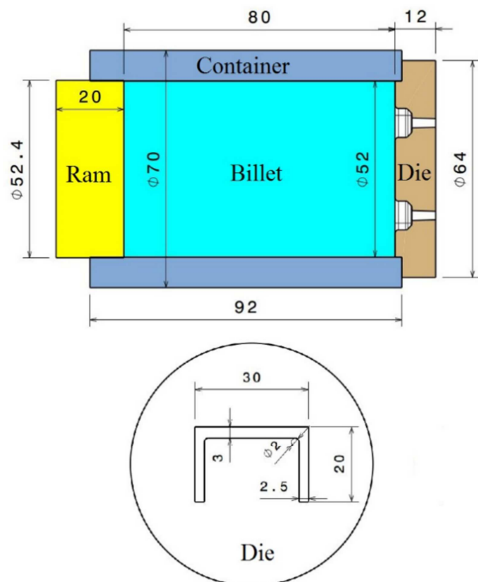
این روانکارها بایستی خواصی مانند پیوسته بودن و محافظت در برابر اکسید شدن را دارا باشند. به خاطر فشار بالای موجود بین سطوح، سرعت کم سطوح نسبت به هم و دماهای بالا در طی فرآیند، استفاده از روانکارهای جامد می‌تواند گزینه خوبی در این زمینه باشد.

تعیین ضریب اصطکاک در فرآیند اکستروژن و همچنین ایجاد مدل اصطکاکی مناسب در سالهای اخیر به خاطر گسترش چشمگیر روش‌های اجزای محدود به طور وسیعی مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه به بررسی نتایج تعدادی از این مطالعات خواهیم پرداخت.

¹ Rigid plastic

² Double action extrusion

المان بندی شده و از بروز خطا در محاسبات جلوگیری می‌شود. به علت صلب بودن تجهیزات اکستروژن، عملیات مش مجدد تنها روی قطعه کار اجرا خواهد شد.



شکل ۱- هندسه قسمت‌های مدل و شکل بیرینگ قالب

ماده استفاده شده برای تجهیزات اکستروژن، فولاد AISI H-13 است. همچنین جنس بیلت، آلیاژ آلومینیوم AA 6082 انتخاب شده است. در این شبیه‌سازی از مدل سلارز-تاگرت^۳ (رابطه (۱)) برای توصیف جریان آلیاژ آلومینیوم استفاده شده است. این رابطه تنش جریان موثر را با نرخ کرنش و دما مرتبط می‌سازد و شکل کلی این رابطه به صورت سینوس هذلولوی است.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\alpha} \operatorname{Arctanh} \left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{m}} = \frac{1}{\alpha} \operatorname{Ln} \left(\left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{m}} + \sqrt{\left(\left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{m}} + 1 \right)} \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، m و A ثابت‌های وابسته به دما بوده و Z پارمتر زینر-هولمن^۴ می‌باشد و به شکل رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \frac{\Delta H}{RT} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش موثر، ΔH انرژی فعال‌سازی برای تغییر شکل و T دما می‌باشد. در روابط (۱) و (۲) مقادیر پارامترهای مختلف به صورت زیر می‌باشد:

$$m = 6.88 \quad \Delta H = \frac{1}{\text{mol}} 199960 \quad A = 1,160,999 \times \frac{1}{s} 10^{15}$$

$$R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \quad \alpha = 0,1 \text{ MPa} \cdot 19$$

همچنین برای توصیف شرایط اصطکاک بین سطوح از مدل اصطکاک برشی که با نام ترسکا نیز شناخته می‌شود استفاده شده که به صورت معادله (۳) تعریف می‌شود [۱۲، ۱۳]:

$$f = m k \quad (3)$$

در سال ۱۹۹۸ ناکامورا و همکارانش [۹] از روانکارهای مختلفی برای انجام فرآیند اکستروژن استفاده کردند و نشان دادند که در صورت استفاده از روانکار در فرآیند اکستروژن آلومینیوم، اصطکاک بین سطوح به شدت کاهش پیدا می‌کند. در سال ۲۰۱۲ ولو و همکارانش [۱۰] تاثیر روانکارهای مختلف روی مقدار ضریب اصطکاک در فرآیند اکستروژن آلومینیوم ۶۰۶۳ را بررسی کردند. نتایج نشان دهنده کاهش قابل ملاحظه اصطکاک بین سطوح با استفاده از روانکار بود. مقدار ضریب اصطکاک بدست آمده با استفاده از روانکارهای مختلف بین ۰,۰۶ تا ۰,۲۳ بود. همچنین در سال ۲۰۱۳ حافظی و همکارانش [۱۱] نشان دادند که در شرایط استفاده از روانکار در فرآیند اکستروژن آلومینیوم مقدار ضریب اصطکاک بین ۰,۰۹ تا ۰,۴ می‌باشد.

نتایج ارائه شده توسط محققان نشانگر محدوده مشخصی برای مقدار ضریب اصطکاک در فرآیند اکستروژن است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک حالت خشک (بدون روانکار) که در فرآیندهایی با دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سلسیوس انجام می‌گیرد، بین ۰,۸ تا ۱ است. لذا در مدل سازی فرآیند اکستروژن که اغلب بدون روانکار انجام می‌شود می‌توان از این محدوده استفاده کرد. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مقدار ضریب اصطکاک در صورت استفاده از روانکار مناسب، به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. البته باید به این نکته توجه نمود که مقدار ضریب اصطکاک در نواحی مختلف ثابت نمی‌باشد و در شرایط مختلف امکان تغییر دارد. ولی از آنجایی که اندازه‌گیری اصطکاک در نواحی مختلف امکان بصورت تجربی و در حین فرآیند امکان‌پذیر نیست، لذا مقادیر ارائه شده در تحقیقات تجربی برای ضریب اصطکاک در فرآیند اکستروژن آلومینیوم یک مقدار میانگین می‌باشد.

۲- مدل سازی المان محدود

در این تحقیق از نرم افزار المان محدود Deform 3D برای شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن آلومینیوم استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از روش لاگرانژی برای انجام تحلیل استفاده شده است. در اینجا بدلیل ناچیز بودن تغییر شکل الاستیک نسبت به تغییر شکل پلاستیک، قطعه کار از نوع پلاستیک صلب فرض شده است. در واقع در این مدل، تنها تغییر شکل پلاستیک وجود داشته و مقدار تغییر شکل الاستیک آن صفر است. همچنین قطعات مربوط به تجهیزات مانند کوبه، محفظه و قالب از نوع صلب تعریف شده و هیچ گونه تغییر شکلی ندارد.

مدل مورد استفاده برای شبیه‌سازی فرآیند شامل چهار قسمت بیلت، قالب، محفظه و کوبه است. شکل بیرینگ قالب به صورت ناودانی می‌باشد. در شکل ۱ اندازه هر یک از قسمت‌ها و همچنین شکل بیرینگ قالب نشان داده شده است. لازم به توضیح است که کلیه ابعاد در این شکل به میلی‌متر می‌باشد. در این تحقیق برای المان بندی مدل، از المان چهار وجهی^۱ در تمامی قسمت‌ها استفاده شده است. به دلیل استفاده از روش لاگرانژی برای مدل‌سازی، جهت جلوگیری از اعوجاج شدید مش، از تکنیک تولید خودکار مش^۲ استفاده شده است. با استفاده از تکنیک تولید خودکار مش، در هر مرحله قطعه کار دوباره

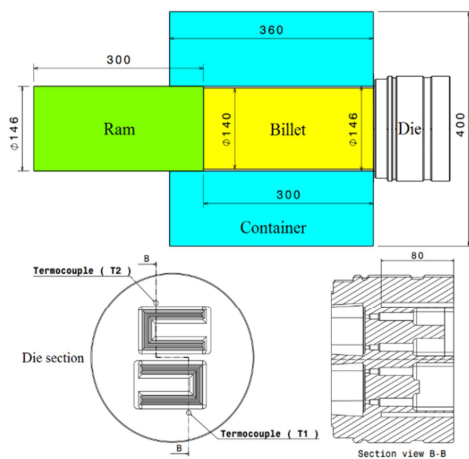
³ Sellars-Tagert

⁴ Zener-Hollman

¹ Tetrahedral

² Automatic mesh generation

برای انجام این فرآیند از یک پرس ۱۰ MN که به نرم‌افزاری جهت ثبت نیروی اکستروژن و سرعت کوبه تجهیز شده، استفاده گردیده و همچنین برای اندازه‌گیری سرعت خروجی پروفیل از سرعت سنج لیزری استفاده شده است. مقدار پیشروی نهایی کوبه در طی فرآیند اکستروژن ۲۹۰ mm می‌باشد. سایر مشخصات فرآیند اکستروژن ICEB 2009 مانند نوع ماده بیلت و تجهیزات، سرعت اکستروژن، ضرایب انتقال گرما، مدل اصطکاکی، اندازه المان‌ها و سایر مشخصات مطابق با مدل اصلی مورد مطالعه در این مقاله می‌باشد که در جدول ۱ ارائه شده‌اند.



شکل ۲- هندسه قسمت‌های مدل ICEB و شکل بیرینگ قالب

۳- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج حاصل از مدل‌های مختلف ارائه شده در قسمت قبلی مورد بررسی قرار خواهد گرفت که شامل دو بخش اصلی است. در قسمت نخست، نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مدل ICEB 2009 (شکل ۲) بررسی شده و با نتایج تجربی مقایسه خواهند شد. در بخش دوم، نتایج شبیه‌سازی مدل شکل ۱ جهت بررسی اثر روانکار و ضریب اصطکاک مورد بررسی قرار خواهند گرفت. برای بررسی استقلال از شبکه در مدل ICEB 2009، از سه شبکه بندی با اندازه‌های مختلف استفاده شده است. در جدول ۳ تعداد المانهای مدل در ابتدا و بعد از زمان ۴/۶ ثانیه و انجام مش مجدد نشان داده شده است. در طول فرآیند تغییر شکل، ناحیه‌ای که به داخل قالب نفوذ می‌کند و دچار تغییر شکل می‌شود دوباره با المان‌های ریزتر المان‌بندی می‌شود که این باعث افزایش تعداد المان‌ها در طی فرآیند می‌شود.

نام مدل	تعداد المان‌های اولیه	تعداد المان‌های نهایی
مدل ۱	۸۲۰۰۳	۱۷۰۷۸۱
مدل ۲	۱۰۲۹۱۸	۲۴۸۰۷۵
مدل ۳	۱۲۱۲۹۵	۳۴۸۶۴۶

در معادله (۳)، f تنش اصطکاکی، m ضریب اصطکاک و k تنش جریان برشی است. این مدل به طور وسیعی در مدل سازی فرآیند اکستروژن استفاده می‌شود. در شبیه سازی فرآیند اکستروژن یکی از مهمترین قسمت‌ها، تعریف شرایط مرزی مناسب می‌باشد. در این مدل در دو ناحیه شرایط مرزی اصطکاکی وجود دارد، بین بیلت و قالب و بین بیلت و محفظه. همچنین برای شرایط مرزی مربوط به انتقال حرارت از اطلاعات داده شده در جدول ۱ استفاده شده. در این مدل‌سازی مقدار دمای محیط ۲۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. سایر مشخصات و مقدار آنها در مدل سازی فرآیند اکستروژن در جدول ۱ قابل ملاحظه است.

جدول ۱- مشخصات فرآیند اکستروژن آلومینیوم

نام پارامتر	مقدار	واحد
دمای اولیه بیلت	۴۲۰	°C
دمای اولیه قالب	۴۰۰	°C
دمای اولیه محفظه	۴۰۰	°C
دمای اولیه کوبه	۳۸۰	°C
سرعت اکستروژن	۱۰	(mm/s)
ضریب انتقال گرما		
بین قطعه کار و تجهیزات	۱۱	N / (s. mm. °C)
ضریب انتقال گرما بین قطعات و محیط	۰/۰۲	N / (s. mm. °C)
رسانایی گرمایی	۲۱۰ ۲۴,۳۳	AA 6082 AISI H-13
ظرفیت گرمایی	۲,۹۴ ۴,۶۳	AA 6082 AISI H-13

در این مقاله برای سنجش دقت نتایج بدست آمده، مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی و مقادیر تجربی انجام شده است. اطلاعات تجربی برای این کار از داده‌های ارائه شده در کنفرانس بین المللی بنچمارک اکستروژن^۱ استخراج شده است. در پژوهش حاضر بدلیل امکان دسترسی به شکل قالب و شرایط انجام فرآیند ICEB 2009، از نتایج تجربی آن برای بررسی و مقایسه استفاده گردیده است [۱۵، ۱۴]. نمای کلی ICEB 2009 در شکل ۲ نشان داده شده است. در این آزمایش شرایط اولیه فرآیند مطابق جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات فرآیند اکستروژن آلومینیوم ICEB

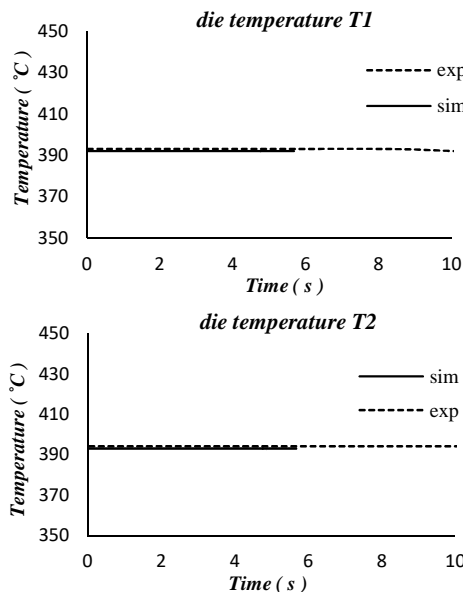
نام پارامتر	مقدار	واحد
دمای اولیه بیلت	۴۳۲	°C
دمای اولیه قالب	۳۹۳	°C
دمای اولیه محفظه	۴۲۷	°C
دمای اولیه کوبه	۳۶۵	°C

نتایج مربوط به نیروی اکستروژن مدل ICEB 2009 برای سه شبکه

¹ International Conference on Extrusion Benchmark (ICEB)

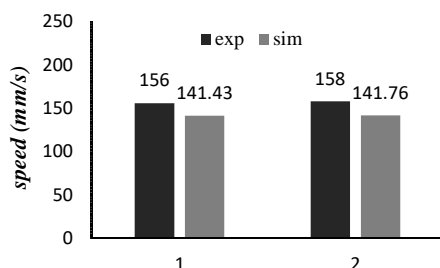
شکل بیلت برای پر کردن محفظه و قسمتی از پاکت تا نقطه B ادامه دارد. در نقطه B محفظه پر شده و به دلیل نیاز به تغییر شکل بیشتر در قسمت پاکت، نیروی اکستروژن تا نقطه C افزایش پیدا می‌کند. از نقطه C تا D، قسمت پاکت از مواد پر شده و به دلیل کاهش طول بیلت نیروی اکستروژن کاهش یافته است. با پر شدن پاکت‌ها و بدلیل نیاز به تغییر شکل بیشتر در قسمت بیرینگ، نیروی اکستروژن تا نقطه E افزایش پیدا کرده و بعد از این نقطه با خارج شدن پروفیل‌ها نیروی اکستروژن به دلیل کاهش طول بیلت و در نتیجه کاهش نیروی اصطکاک بین بیلت و محفظه، کاهش پیدا می‌کند.

دمای اندازه گیری شده توسط ترموکوپل‌ها در شکل ۵ آورده شده است. مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی نشانگر اختلاف ناچیز بین آنها می‌باشد. این اختلاف کمتر از ۰.۵ درصد است. همچنین نمودارها نشانگر تغییرات اندک دمای قالب در ابتدای فرآیند است.



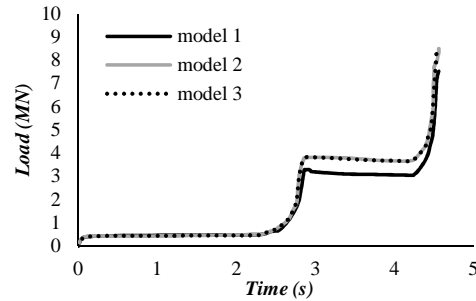
شکل ۵- دماهای تجربی و شبیه سازی مدل ICEB 2009

میانگین سرعت خروجی پروفیل‌ها در طی فرآیند در شکل ۶ نشان داده شده است. اختلاف سرعت خروجی بین نتایج تجربی و شبیه سازی برای پروفیل اول ۹.۳۳ درصد و برای پروفیل دوم ۱۰.۲۷ درصد است. این اختلافات می‌تواند ناشی از خطاهای اندازه‌گیری آزمایشگاهی و همچنین خطاهای موجود در مدل المان محدود باشد.



شکل ۶- سرعت تجربی و شبیه سازی پروفیل‌های مدل ICEB 2009

بندی با تعداد المان های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است.

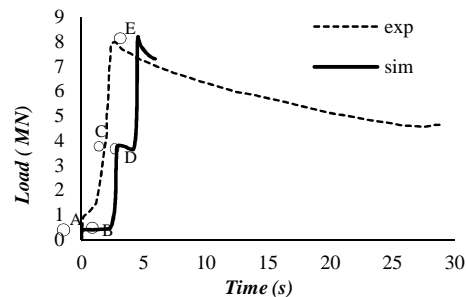


شکل ۳- نیروی اکستروژن برای شبکه‌بندی‌های مختلف

نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که مدل ۱ که دارای المان‌های کمتری است دارای اختلافاتی با دو مدل دیگر می‌باشد. اما در مدل های ۲ و ۳ نتایج کاملاً یکسان بوده و می‌توان نتیجه گرفت که المان‌های بیشتر از این تعداد در نتایج بدست آمده تاثیر گذار نخواهد بود. بنابراین جهت کاهش زمان محاسبات بهترین حالت استفاده از اندازه المان‌های مشابه مدل ۲ می‌باشد.

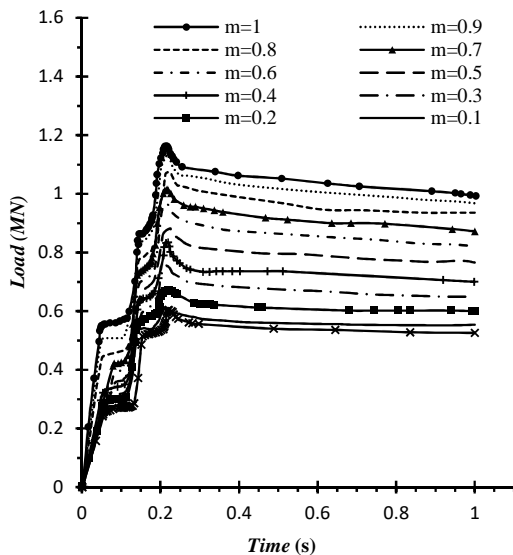
به دلیل زمان بر بودن حل مسائل شکل دهی بویژه توسط روش لاگرانژی و محدودیت زمانی موجود، حل کل زمان فرآیند ICEB 2009 که ۲۹ ثانیه است، امکان پذیر نمی‌باشد. بنابراین در این شبیه سازی ۵.۶۷ ثانیه از فرآیند مورد نظر تحلیل شده است. البته لازم به توضیح است که زمان حل مسئله برای شبیه سازی ۵.۶۷ ثانیه از فرآیند مورد نظر، مدت ۲۰۴ ساعت به طول انجامیده است. تعداد مراحل حل برابر با ۴۱۳۰ بوده و گام زمانی هر مرحله ۰.۰۰۱۵ ثانیه تعریف شده است. هرچند در برخی مراحل، موتور شبیه ساز با توجه به حداکثر سرعت و اندازه کوچکترین المان موجود، مقدار گام زمانی هر مرحله را به طور خودکار تغییر می‌دهد.

شکل ۴ نیروی اکستروژن تجربی و مقدار تخمین زده شده توسط مدل المان محدود را نشان می‌دهد. در حالت تجربی، مقدار حداکثر نیروی اکستروژن ۸ MN بوده و مقدار نیروی اکستروژن حداکثر پیش بینی شده توسط مدل ۸.۱۹ MN می‌باشد. مقدار اختلاف بین نیروهای بدست آمده ۲/۳۷ درصد است. بنابراین با توجه به اهمیت پیش‌بینی نیروی حداکثر مورد نیاز جهت طراحی پرس اکستروژن، مقادیر بدست آمده مطابقت خوبی با هم دارند.



شکل ۴- نیروی اکستروژن تجربی و شبیه سازی مدل ICEB 2009

در شکل ۴ نقطه A نشانگر نقطه آغاز تغییر شکل بوده و تغییر



شکل ۷- نیروی اکستروژن برای ضرایب اصطکاک مختلف

پارامتر بعدی که تاثیر زیادی در فرآیند اکستروژن دارد مقدار حداکثر دمای موجود در قطعه کار است. این عامل تاثیر زیادی روی کیفیت ظاهری و همچنین ساختار میکروسکوپی محصولات تولید شده دارد. مقدار دمای حداکثر در طی فرآیند اکستروژن در شرایط اصطکاکی مختلف در شکل ۸ قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد که مقدار افزایش دما در حالت چسبیده نسبت به حالتی که اثر روانکار در نظر گرفته شده است بسیار بیشتر است. این افزایش دما در طول فرآیند باعث تاثیرات منفی در کیفیت و استحکام محصول خواهد شد. اگر افزایش دما بیش از اندازه اتفاق بیافتد و به نقطه ذوب ماده برسد باعث تغییر شکل محصول در قسمت خروجی قالب شده و نرخ ضایعات بوجود آمده بالاتر می‌رود.

همچنین اگر افزایش دما به دمای تبلور مجدد آلومینیوم برسد باعث تولید محصولی با اندازه دانه‌های متفاوت در نقاط مختلف آن خواهد شد. به دلیل غیر یکنواخت بودن توزیع دما در سطح مقطع محصول در طی تولید، غیر یکنواختی در اندازه دانه‌ها باعث تفاوت خصوصیات مکانیکی پروفیل در نقاط مختلف می‌شود.

با توجه به پیچیدگی فرآیند اکستروژن آلومینیوم می‌توان مشاهده کرد که نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود مطابقت خوبی با مقادیر تجربی دارند [۱۴، ۱۵]. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که روش استفاده شده برای مدل‌سازی فرآیند، اطلاعات صحیحی در رابطه با متغیرهای مختلف فرآیند اکستروژن آلومینیوم ارائه می‌کند. بنابراین می‌توان تاثیر تغییرات پارامترهای مورد نظر بر روی فرآیند را از این طریق بررسی کرد. در قسمت بعدی نتایج مربوط به تاثیرات روانکار که به صورت تغییرات ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده است، بر روی متغیرهای مهم فرآیند اکستروژن مدل شکل ۱ مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

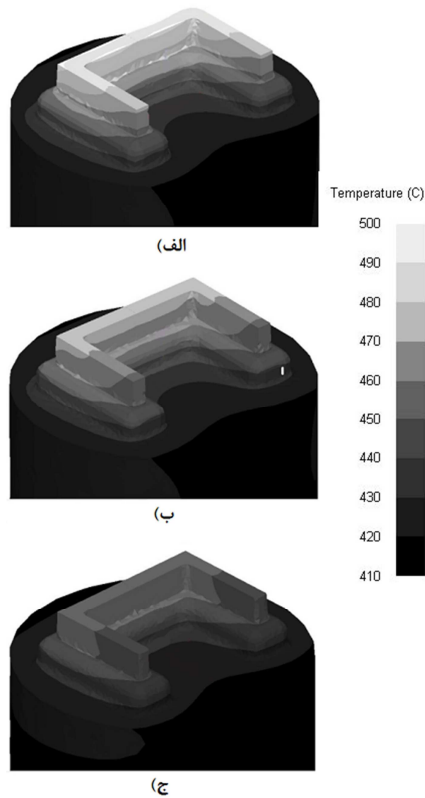
در شبیه‌سازی مدل شکل ۱ از اندازه المان‌های مشابه شبکه‌بندی ۳ در جدول ۲ استفاده شده است. استفاده از این اندازه شبکه‌بندی باعث ایجاد تعداد المان‌های مختلف در قطعات مدل شکل ۱ مطابق جدول ۴ شده است.

جدول ۴- تعداد المان‌های هر یک از قطعات مدل شکل ۱

نام قطعه	تعداد المان‌های اولیه
بیلت	۱۱۰۱۵
قالب	۲۴۵۷۷
محفظه	۱۴۴۵۵
کوبه	۸۰۳۱

همانطور که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، در این پژوهش اثر روانکار به صورت تغییرات ضریب اصطکاک بررسی شده است. طیف وسیعی از ضرایب اصطکاک از ۰/۱ تا ۱ روی مدل اعمال شده و نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا سایر پارامترهای اولیه مدل مانند دما و سرعت کوبه در تمامی مدل‌ها یکسان بوده و تنها پارامتر متغیر ضریب اصطکاک می‌باشد. لازم به ذکر است که به دلیل مدت زمان طولانی حل روش لاگرانژی با استفاده از مش خودکار، در این تحقیق مدت زمان ۱ ثانیه از فرآیند اکستروژن شبیه‌سازی شده است.

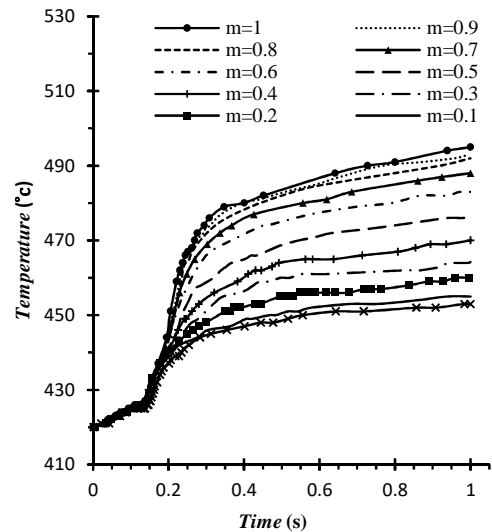
اولین پارامتری که در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد، نیروی اکستروژن مورد نیاز است. این عامل از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا تعیین کننده ظرفیت پرس مورد نیاز می‌باشد. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۷، کاهش مقدار اصطکاک که در نتیجه استفاده از روانکار می‌باشد، باعث تغییرات قابل توجهی در مقدار نیروی مورد نیاز اکستروژن آلومینیوم خواهد شد. مقدار نیروی حداکثر در حالت بدون روانکار که با ضریب اصطکاک ۱ نشان داده شده است ۱/۱۶۲ MN است. این مقدار در حالت ضریب اصطکاک ۰/۱ که با استفاده از روانکاری امکان پذیر است به ۰/۶۱۲ MN کاهش یافته است. در واقع اختلاف بین این دو مقدار ۴۷ درصد می‌باشد. که نشان می‌دهد تقریباً نصف مقدار نیروی مورد نیاز اکستروژن در حالت بدون روانکار، برای اکستروژن با استفاده از روانکار با شرایط یکسان کافی است. همچنین مقایسه مقادیر حداکثر نیروی اکستروژن برای حالت اصطکاک چسبیده (m=1) و حالت اصطکاک ناچیز m=0/1 نشان می‌دهد که 0/6 MN از نیروی استفاده شده یعنی 51/6 درصد از نیروی مورد نیاز صرف غلبه بر اصطکاک موجود بین سطوح می‌شود.



شکل ۹- توزیع دما روی سطح مقطع پروفیل‌ها برای شرایط الف) $m=1$ ، ب) $m=0.5$ و ج) $m=0.1$

بهترین حالت، مقدار ثابت و یکنواخت در نقاط مختلف سطح مقطع می‌باشد. اما در بیشتر موارد مقادیر سرعت در نقاط مختلف پروفیل متفاوت بوده و باعث ایجاد انحنای و یا تغییر شکل‌های نامطلوب در پروفیل می‌شود. در عمل این اختلاف سرعت را بوسیله تغییر دادن طول بیرینگ و کم کردن آن در نقاط با سرعت پایین اصلاح می‌کنند. اما این روش دارای محدودیت‌هایی می‌باشد و در برخی مواقع به تنهایی کارساز نیست. در ادامه تاثیر روانکاری و کاهش ضریب اصطکاک در شکل پروفیل خروجی بررسی شده است. تغییر شکل پروفیل خروجی با تغییر ضریب اصطکاک در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مقدار انحنای محصول خروجی با کاهش مقدار اصطکاک کمتر شده است. دلیل این امر کاهش مقاومت اصطکاکی در برابر جریان مواد در قسمت بال‌های پروفیل است. در حالت بدون روانکار در نقاطی از پروفیل، بویژه در قسمت‌هایی با ضخامت کمتر، به خاطر مقاومت بالا در برابر جریان مواد، مقدار سرعت خروجی نسبت به سایر نقاط کمتر است که این اختلاف سرعت باعث انحنای پروفیل خروجی می‌شود. اما با کاهش مقدار ضریب اصطکاک، مقاومت اصطکاکی در برابر جریان کاهش یافته و در نتیجه مقدار اختلاف سرعت در نقاط مختلف کمتر شده است.



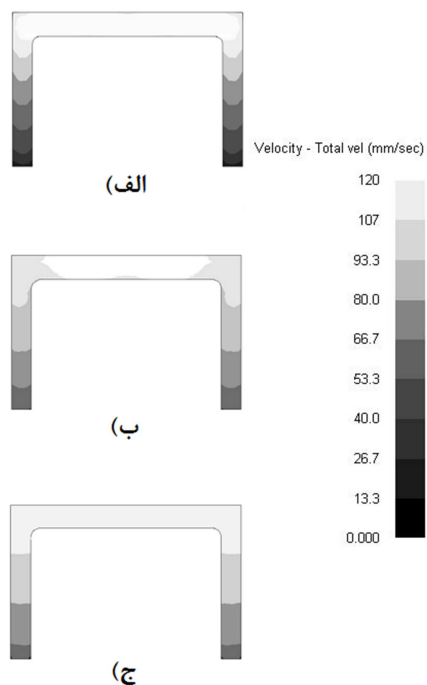
۸- حداکثر دمای قطعه کار برای ضرایب اصطکاک مختلف

مقدار دمای حداکثر با شرایط ضریب اصطکاک ۱ در زمان ۱ ثانیه 497°C و با ضریب اصطکاک ۰٫۱ مقدار آن 455°C است. مقدار این اختلاف ۴۲ درجه است که نشانگر تبدیل انرژی تلف شده بوسیله اصطکاک به حرارت می‌باشد. البته در حالت اصطکاک صفر نیز افزایش دما وجود دارد که به دلیل تبدیل کار انجام شده برای تغییر شکل به گرما می‌باشد.

در شکل ۹ توزیع دما در زمان ۱ ثانیه بر روی قطعه کار به ازای ضرایب اصطکاک مختلف نشان داده شده است. همچنین شکل برش خورده سطح مقطع پروفیل نیز در شکل ۹ قابل مشاهده است. می‌توان مشاهده کرد که با کاهش مقدار ضریب اصطکاک علاوه بر کاهش دما در قسمت‌های مختلف، توزیع دما روی قطعه کار یکنواخت‌تر شده است. همچنین توزیع یکنواخت‌تر دما در قسمت‌های مختلف مدل، باعث یکنواخت‌تر شدن خصوصیات مکانیکی محصولات تولید شده می‌شود.

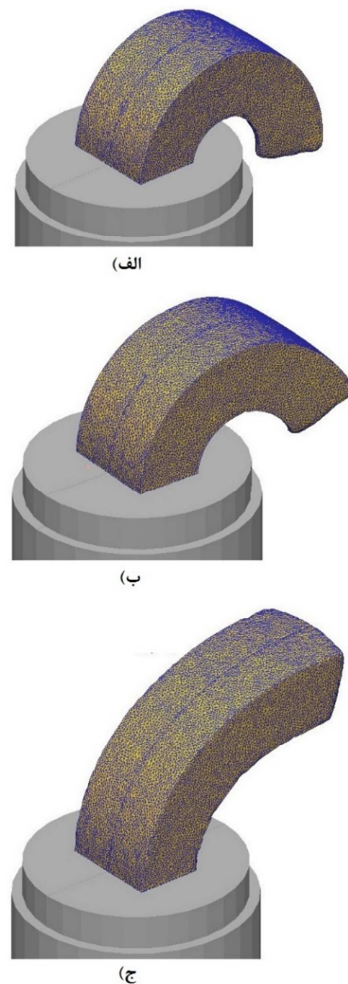
در شکل ۹ در قسمت‌های بال پروفیل، به علت سرعت خروجی کمتر مقدار گرمای تولید شده ناشی از اصطکاک بین سطوح کمتر بوده و همچنین نرخ تغییر شکل پلاستیک در این نواحی به علت سرعت خروجی پایین نسبت به نواحی با سرعت خروجی بالاتر کمتر است. بنابراین نرخ گرمای تولید شده ناشی از تغییر شکل پلاستیک هم کمتر بوده و دمای این قسمت نسبت به سایر نقاط کمتر می‌باشد.

متغیر دیگری که در فرآیند اکستروژن از اهمیت بالایی برخوردار است سرعت خروجی پروفیل است. این عامل، تعیین کننده شکل خروجی پروفیل و مقدار انحنای و تغییر شکل‌های ناخواسته محصول خروجی می‌باشد. مقدار اصطکاک موجود در بیرینگ قالب، شکل بیرینگ (از نظر ضخامت سطح مقطع آن در نقاط مختلف) و همچنین طول بیرینگ نقش تعیین کننده‌ای در سرعت پروفیل خروجی دارد.



شکل ۱۱- توزیع سرعت روی سطح مقطع پروفیل به ازای الف) $m=1$ ، ب) $m=0.5$ و ج) $m=0.1$

به دلیل وجود اصطکاک بین لایه‌ها، لغزش لایه‌های فلز روی هم باعث تولید گرما و افزایش دمای قطعه کار می‌شود که این افزایش دما می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی در طی تولید شود. با توجه به نحوه جریان مواد (آلومینیوم) در داخل محفظه و قالب می‌توان دریافت که مقدار سرعت جریان نزدیک به سطح در شرایط اصطکاک زیاد نسبت به شرایط اصطکاک کمتر کاهش پیدا می‌کند. این عامل باعث گسترش ناحیه فلز مرده می‌شود. همچنین چسبندگی بین بیلت و محفظه باعث افزایش اختلاف سرعت بین مرکز بیلت و قسمت‌های بیرونی آن شده و سرعت در مرکز بیلت بیشتر از کناره‌های آن می‌شود. این اختلاف سرعت باعث بوجود آمدن جریان شعاعی از خارج بیلت به سمت مرکز آن شده و در نتیجه خطر نفوذ ناخالصی‌های موجود روی سطح بیلت به داخل محصول افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر بیشتر بودن سرعت جریان در مرکز بیلت خطر ایجاد حفره در مرکز بیلت و انتقال آن به محصولات را افزایش می‌دهد که این امر باعث افزایش نرخ ضایعات می‌شود.



شکل ۱۰- شکل پروفیل خروجی برای شرایط الف) $m=1$ ، ب) $m=0.5$ و ج) $m=0.1$

علاوه بر این، توزیع سرعت روی سطح مقطع پروفیل (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که با کاهش مقدار ضریب اصطکاک، توزیع سرعت در نقاط مختلف پروفیل یکنواخت‌تر شده است. بنابراین استفاده از روانکار مناسب جهت کاهش اصطکاک بین سطوح مخصوصاً کاهش اصطکاک در ناحیه بیرینگ قالب می‌تواند باعث تولید پروفیل‌هایی با شکل‌های مطلوب‌تر و دارای اعوجاج کمتر شود. همچنین این کار باعث خواهد شد که اصلاحات یا تغییرات کمتری در طول بیرینگ در قسمت‌های مختلف جهت بهینه سازی بیرینگ قالب مورد نیاز باشد.

نقاط مرده جریان و نحوه توزیع سرعت در صفحه میانی مدل در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به نحوه توزیع سرعت در داخل بیلت، می‌توان مشاهده کرد که ناحیه فلز مرده در حالت اصطکاک کم تنها در گوشه بین محفظه و قالب و به مقدار خیلی کم وجود دارد که با رنگ سیاه مشخص شده است. اما در شرایطی که مقدار ضریب اصطکاک بین سطوح زیاد است این ناحیه به قسمت‌های دیگر مدل نیز گسترش یافته است. بین ناحیه فلز مرده و جریان فلز مرزی تشکیل می‌شود که لغزش لایه‌ها روی هم را به دنبال دارد.

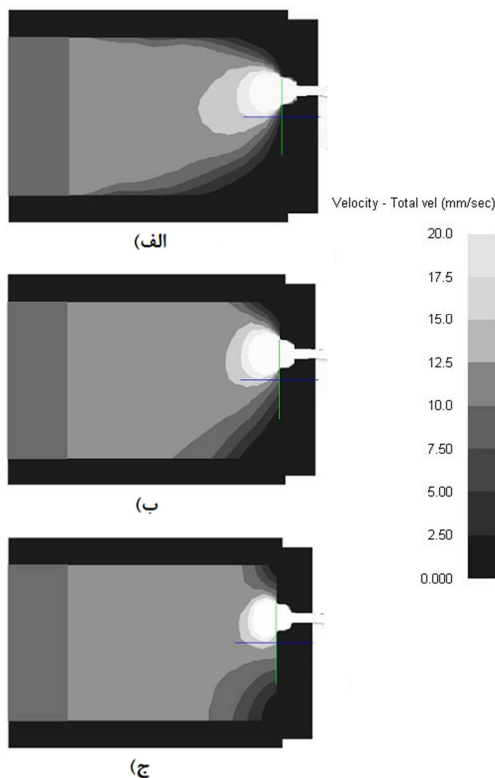
سطوح، دمای بیشینه قطعه کار کاهش پیدا می‌کند. این امر احتمال رسیدن دمای قطعه کار به دمای ذوب ماده را کاهش داده و در نتیجه از توقف عملیات و افزایش نرخ ضایعات بدلیل شکل پروفیل نامناسب جلوگیری خواهد شد. لازم به ذکر است با کاهش دمای حداکثر موجود در قطعه کار، می‌توان از سرعت‌های بالاتر برای انجام فرآیند اکستروژن استفاده کرد. همچنین نتایج نشان داد که با وجود روانکار توزیع دمای یکنواخت‌تری در قسمت های مختلف پروفیل بوجود می‌آید که باعث توزیع خواص مکانیکی یکنواخت‌تری می‌شود. همچنین کاهش دمای قطعه کار باعث کاهش دمای قالب و تجهیزات نیز شده و عمر مفید آنها را افزایش می‌دهد.

روانکاری تاثیر زیادی روی شکل پروفیل خروجی از قالب دارد. در نقاطی از قالب با ضخامت کمتر، معمولاً سرعت خروجی پایین‌تر است و این پدیده موجب انحنای پروفیل می‌شود. با کاهش مقدار اصطکاک، مقاومت اصطکاکی در برابر جریان مواد در این نواحی کاهش یافته و پروفیلی با انحنای کمتر تولید می‌شود. همچنین نحوه توزیع سرعت در سطح مقطع پروفیل نیز این امر را اثبات می‌کند. در نتیجه با استفاده از روانکار، بعد از تولید پروفیل احتیاج به عملیات کمتری برای صاف کردن پروفیل می‌باشد.

در مدل‌هایی با ضریب اصطکاک بالا ناحیه فلز مرده بسیار بزرگ‌تر از شرایط دیگر اصطکاکی است. در ضریب اصطکاک زیاد، ناحیه فلز مرده از گوشه بین قالب و محفظه شروع شده و تقریباً تا انتهای بیلت ادامه دارد و باعث ایجاد منطقه قیفی شکل جریان در مرکز بیلت می‌شود. این در حالی است که در شرایط وجود روانکار این ناحیه بسیار کوچکتر است و مواد با مقاومت کمتری برای جریان یافتن مواجه می‌شوند. این امر احتمال ایجاد معایبی مانند نفوذ ناخالصی‌ها به داخل محصول، ایجاد سوراخ در قسمت انتهایی بیلت و محصولات و بالا رفتن بیش از اندازه دما در قطعه کار را کاهش می‌دهد.

۵- مراجع

- [1] Saha P. K., Aluminum extrusion technology. Asm International, 2000.
- [2] Nilsen K. E., Numerical modelling of the aluminum extrusion process and comparison with results obtained from industrially extruded complex sections. Bournemouth University, 2014.
- [3] Dieter G. E., Kuhn H. A. and Semiatin S. L., Handbook of workability and process design. ASM international, 2003.
- [4] Bakhshi-Joooybari M., A theoretical and experimental study of friction in metal forming by the use of the forward extrusion process. Journal of materials processing technology, Vol. 125, pp. 369-374, 2002.
- [5] Flitta I. and Sheppard T., Nature of friction in extrusion process and its effect on material flow. Materials science and Technology, Vol. 19, No. 7, pp. 837-846, 2003.
- [6] Kim S. H., Chung S. W. and Padmanaban S., Investigation of lubrication effect on the backward extrusion of thin-walled rectangular aluminum case with large aspect ratio. Journal of materials processing technology, Vol. 180, No. 1, pp. 185-192, 2006.
- [7] Schikorra M., Donati L., Tomesani L. and Kleiner M., The role of friction in the extrusion of AA6060 aluminum alloy, process analysis and monitoring. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191, No. 1, pp. 288-292, 2007.
- [8] Wang L., He Y., Zhang Y. Cai J., Zhou J., Duszczek J. and Katgerman L., Modeling of double action extrusion—A novel extrusion process for friction characterization at the



شکل ۱۲- ناحیه فلز مرده به ازای الف) $m=1$ ، ب) $m=0.5$ و ج) $m=0.1$

۴- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که استفاده از روش اجزای محدود برای شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن یک روش کاربردی بوده و دقت نتایج عددی در مقایسه با نتایج تجربی با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های فرآیند، قابل قبول می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف بیشینه نیروی اکستروژن محاسبه شده با استفاده از روش اجزای محدود با نتایج تجربی ۲۲۷ درصد می‌باشد. همچنین اختلاف نتایج دما در شبیه‌سازی و داده‌های تجربی کمتر از ۰.۵ درصد بوده و اختلاف سرعت خروجی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی پروفیل‌ها حدود ۱۰ درصد می‌باشد. این اختلافات می‌تواند ناشی از خطاهای اندازه‌گیری آزمایشگاهی و همچنین خطاهای موجود در مدل المان محدود باشد.

بررسی تاثیر روانکار در فرآیند اکستروژن با استفاده از ضرایب اصطکاک مختلف نشان می‌دهد که مقدار نیروی اکستروژن با کم‌تر شدن مقدار اصطکاک کاهش چشمگیری دارد. به طوریکه مقایسه نیروی اکستروژن بدست آمده برای مدل با ضریب اصطکاک ۱ و مدل با ضریب اصطکاک ۰.۱ نشان می‌دهد که بیش از ۵۰ درصد از نیروی اکستروژن مورد نیاز صرف غلبه بر اصطکاک بین سطوح می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که با کاهش مقدار اصطکاک بین سطوح در فرآیند اکستروژن آلومینیوم، می‌توان از پرس‌هایی با ظرفیت کمتر استفاده کرد و این باعث کاهش هزینه‌های طراحی و تولید می‌شود. موضوع مهم بعدی دمای بیشینه قطعه کار در طی فرآیند است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با کاهش مقدار اصطکاک بین

- billet–die bearing interface. *Tribology international*, Vol. 43, No. 11, pp. 2084-2091, 2010.
- [9] Nakamura T., Bay N. and Zhang Z. L., FEM Simulation of a Friction Testing Method Based on Combined Forward Conical Can-Backward Straight Can Extrusion. *Journal of tribology*, Vol. 120, No. 4, pp. 716-723, 1998.
- [10] Velu R. and Cecil M., Quantifying Interfacial Friction in Cold Forming using Forward Rod Backward Cup Extrusion Test. *Journal of The Institution of Engineers (India), Series C*, Vol. 93, No. 2, pp. 157-161, 2012.
- [11] Hafis S., Ridzuan M., Farahana R., Ayob A. and Syahrullail S., Paraffinic mineral oil lubrication for cold forward extrusion: Effect of lubricant quantity and friction. *Tribology International*, Vol. 60, pp. 111-115, 2013.
- [12] Wang L., Zhou J., Duszczuk J. and Katgerman L., Friction in aluminium extrusion—Part 1: A review of friction testing techniques for aluminium extrusion. *Tribology International*, Vol. 56, pp. 89-98, 2012.
- [13] Wang L. and Yang H., Friction in aluminium extrusion—part 2: A review of friction models for aluminium extrusion. *Tribology International*, Vol. 56, pp. 99-106, 2012.
- [14] Donati L., Khalifa N.B., Tomesan L. and Tekkaya A.E., Comparison of different FEM code approaches in the simulation of the die deflection during aluminium extrusion. *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, No. 1, pp. 375-378, 2010.
- [15] Reggiani B., Donati L. and Tomesani L., Evaluation of different FE simulation codes in the stress analysis of extrusion dies. *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, No. 1, pp. 395-398, 2010.