شبیهسازی اکستروژن پروفیل آلومینیوم با در نظر گرفتن اثر روانکار

سعيد محمدزاده	کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
مهسا خرازی*	دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
داود جلالي وحيد	استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

چکیدہ

فرآیند اکستروژن آلومینیوم روشی متداول برای تولید پروفیلهای آلومینیومی با سطع 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 200 AA میباشد. هدف این مقاله بررسی 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 می یابد. همچنین نتایج بدست آمده نشان میدهد که با کاهش مقدار اصطکاک، نیروی اکستروژن مورد نیاز و دمای حداکثر قطعه کار به طور چشمگیری کاهش می یابد. همچنین شکل پروفیل خروجی با کاهش مقدار اصطکاک بی علاف سرعت در نقاط مختلف پروفیل بهبود یافتو و نقاط مرده جریان کاهش می یاد.

Simulation of aluminum profile extrusion considering the effect of lubricant

S. Mohammadzadeh	Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
M. Kharizi	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.

اشاره کرد.

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^۲ احاطه شده است تنش ایجاد شده در آن به شدت افزایش مییابد و زمانی که تنش ایجاد شده در بیلت به تنش سیلان¹ 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

فرآیند اکستروژن دارای معایبی نیز است که باعث اختلال در , وند

می شود، پروفیل با سطح مقطعهای متنوعی ایجاد می شود. از مهمترین

ويژگىهاى فرآيند اكستروژن فشار بالاى مورد نياز براى اكسترود كردن

یروفیل 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،

استحكام بالاى پروفيل اكسترود شده، ابعاد دقيق، صرفه اقتصادى،

سرعت توليد بالا و توانايي طراحي قالب براي توليد محصولات متنوع

¹ Extrusion

² Billet

³ Container ⁴ Flow stress

⁵ Die

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

[®] نويسنده مكاتبه كننده، آدرس پست الكترونيكي: kharazi@sut.ac.ir تاريخ دريافنه ۹۶/۰۵/۳۰ تاريخ پذيرش: ۱۰/۰۷/۰۱

کشیده شدن ناخالصیهای روی سطوح به سمت مرکز بیلت می شود. همچنین به دلیل اینکه سطح بیلت اغلب دارای اکسیدهایی همچونAl2O3 یا MgAl2O است، این سیلان ممکن است باعث ایجاد رگههای اکسیدی در درون محصول اکسترودی شود [۱].

ایجاد ترک سطحی به خصوص در محصولات اکسترودی 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 اکسترود شده وجود دارد. لایه سطحی محصولات اکسترودی 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 C[°] ۱۰۰۰ مانند گریس، گرافیت، MoS₂، میکا، صابون، بنتونیت، قیر معدنی و پلی آمیدهای دما بالا.

۲-روانکارهایی برای دماهای بالاتر از C^{°°} ۱۰۰۰ 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.

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 تقریبا 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 ۲۰

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 اکسترود 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 اولیهی بیلت مقدار آن حالت صعودی پیدا میکند. در این آزمایش ضرایب اصطکاک از مقدار ۴۵۹۴ به ازای دمای اولیه ۳۰۰ درجه سلسیوس به ۰٫۹۱۷ در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس افزایش درجه سلسیوس به ۰٫۹۱۷ در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس افزایش

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 می شود.

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 ^۲ DAE استفاده کردند. این آزمایش ترکیبی از دو اکستروژن معکوس با طول بیرینگ mm ۲ و mm ۸ بود که در آن بیلت به صورت معکوس و همزمان از طریق دو قالب اکسترود 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.

¹ Rigid plastic

² Double action extrusion

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 مریب اصطکاک بدست آمده با استفاده از روانکارهای مختلف بین نشان دادند که در شرایط استفاده از روانکار در فرآیند [۱۱] نشان دادند که در شرایط استفاده از روانکار در فرآیند اکستروژن آلومینیوم مقدار ضریب اصطکاک بین ۲۰۲۹ تا ۲۰ میباشد.

نتایج ارائه شده توسط محققان نشانگر محدوده مشخصی برای مقدار ضریب اصطکاک در فرآیند اکستروژن است. نتایج نشان می دهد که ضریب اصطکاک حالت خشک (بدون روانکار) که در فرآیندهایی با دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سلسیوس انجام میگیرد، بین۸/۰ تا ۱ است. لذا در مدل سازی فرآیند اکستروژن که اغلب بدون روانکار انجام می-شود میتوان از این محدوده استفاده کرد. همچنین نتایج بدست آمده نشان می دهد که مقدار ضریب اصطکاک در صورت استفاده از روانکار مناسب، به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد. البته باید به این نکته توجه نمود که مقدار ضریب اصطکاک در نواحی مختلف ثابت نمی باشد و در شرایط مختلف امکان تغییر دارد. ولی از آنجایی که اندازه گیری اصطکاک در نواحی مختلف امکان بصورت تجربی و در حین فرآیند امکانپذیر نیست، لذا مقادیر ارائه شده در تحقیقات تجربی برای ضریب

۲- مدل سازی المان محدود

در این تحقیق از نرم افزار المان محدود Deform 3D برای شبیه سازی فرآیند اکستروژن آلومینیوم استفاده شده است. در این شبیه سازی 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 شبیه سازی فرآیند شامل چهار قسمت بیلت، قالب، محفظه و کوبه است. شکل بیرینگ قالب به صورت ناودانی می باشد. 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 می باشد. 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 اعواج شدید مش، از تکنیک تولید خودکار مش^۲ استفاده شده است. با استفاده از تکنیک تولید خودکار مش ، در هر مرحله قطعه کار دوباره

(٣)

المان بندی شده و از بروز خطا در محاسبات جلوگیری می شود. 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 AA 6082 است. است. همچنین جنس بیلت، آلیاژ آلومینیوم AA 6082 انتخاب شده است. در این شبیهسازی از مدل سلارز-تاگیرت⁷ (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.

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

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp \frac{\Delta H}{PT}$$
(Y)

در رابطه(۲)، غ نرخ کرنش موثر ، ΔΗ انرژی فعالسازی برای تغییر شکل و T دما می باشد. در روابط (۱) و (۲) مقادیر پارامترهای مختلف به صورت زیر می باشد:

$$m=\$/\Lambda\Lambda$$
 $\Delta H=rac{j}{mol}$ ۱۹۹۹۶۰ $A=1/18.94$ $\Lambda=1/18.94$ $\frac{1}{s}1.5^{10}$
 $R=\Lambda/\frac{j}{\kappa}\frac{j}{mol}$ ۳۱۴ $\alpha=0.7$ MPa·۱۹
همچنین برای توصیف شرایط اصطکاک بین سطوح از مدل
اصطکاک برشی که با نام ترسکا نیز شناخته می شود استفاده شده که
به صورت معادله (۳) تعریف می شود [۲۲,۱۳]:

$$f = m k$$

¹ Tetrahedral

² Automatic mesh generation

³ Sellars-Tagert

⁴ Zener-Hollman

در معادله (۳)، f ننش اصطکاکی، m ضریب اصطکاک و r 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.

جناول ٦- مستحصات فرايتنا المستروري الوميتيوم			
واحد		مقدار	نام پارامتر
°C	47.		دماي اوليه بيلت
°C	4		دماى اوليه قالب
°C	4		دماى اوليه محفظه
°C	۳۸۰		دماى اوليه كوبه
(mm/s)	۱.		سرعت اكستروژن
			ضريب انتقال گرما
N /(s.mm °C)))	بين قطعه كار و
/(01111111 0)			تجهيزات
Ν	•,• ٢		ضريب انتقال گرما
/(s.mm.℃)			بين قطعات و محيط
	۲۱۰	AA 6082	
N/(s.°C)	۲ <i>۴</i> ٬۳۳	AISI H- 13	رسانایی گرمایی
	۲/9۴	AA 6082	
N/(mm ² .°C)	۴,۶۳	AISI H- 13	ظرفیت گرمایی

جدول ۱- مشخصات فر آیند اکستروژن آلومینیوم

در این مقاله برای سنجش دقت نتایج بدست آمده، مقایسهای بین نتایج شیبهسازی و مقادیر تجربی انجام شده است. اطلاعات تجربی برای این کار از دادههای ارائه شده در کنفراس بین المللی بنچمارک اکستروژن^۱ استخراج شده است. در پژوهش حاضر بدلیل امکان دسترسی به شکل قالب و شرایط انجام فرآیند 2009 ICEB از نتایج تجربی آن برای بررسی و مقایسه استفاده گردیده است[۱۵,۱۴]. نمای کلی2099 ICEB در شکل ۲ نشان داده شده است. در این آزمایش شرایط اولیه فرآیند مطابق جدول ۲ می باشد.

جدول ۲ – مشخصات فرآيند اكستروژن آلومينيوم ICEB

واحد	مقدار	نام پارامتر
°C	۴۳۲	دمای اولیه بیلت
°C	۳۹۳	دماى اوليه قالب
°C	427	دماى اوليه محفظه
°C	362	دمای اولیه کوبه

¹ International Conference on Extrusion Benchmark (ICEB)

برای انجام این فرآیند از یک پرس MN ۱۰ که به نرمافزاری جهت ثبت نیروی اکستروژن و سرعت کوبه تجهیز شده، استفاده گردیده و همچنین برای اندازه گیری سرعت خروجی پروفیل از سرعت سنج لیزری استفاده شده است. مقدار پیشروی نهایی کوبه در طی فرآیند اکستروژن ۳۹۰۳m میباشد. سایر مشخصات فرآیند اکستروژن 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.



۳- نتايج وبحث

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 شبیه سازی مدل ICEB 2009 (شکل ۲) بررسی شده و با نتایج تجربی مقایسه خواهند شد. در بخش دوم، نتایج شبیه سازی 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. درجدول 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.

جدول ۳- تعداد المانها در شبکهبندی های مختلف ICEB

تعداد المانهای نهایی	تعداد المانهاي اوليه	نام مدل
14.481	۸۲۰۰۳	مدل ۱
247.10	1.2418	مدل ۲
247848	151590	مدل ۳

نتايج مربوط به نيروى اكستروژن مدل ICEB 2009 براى سه شبكه

بندی با تعداد المان های مختلف در شکل 3 نشان داده شده است.



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 کاملا یکسان بوده و میتوان نتیجه گرفت که المان-های 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 2009 ICEB که ۲۹ ثانیه است، امکان پذیر نمی باشد. 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 ۱۰۰/۰ 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 می دهد.

شکل ۴ نیروی اکستروژن تجربی و مقدار تخمین زده شده توسط مدل المان محدود را نشان میدهد. در حالت تجربی، مقدار حداکثر نیروی اکستروژن ۸MN ۸ 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 پیش بینی 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 شکل۴ نقطه A نشانگر نقطه آغاز تغییر شکل بوده و تغییر

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 مقسمت 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 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 دوم۱۰٫۲۷ 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 پروفیل های مدل ICEB 2009

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 متغییرهای 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 متغییر های مهم فرآیند اکستروژن مدل شکل ۱ مورد بحث و بررسی قرار گرفتهاند.

در شبیه سازی مدل شکل ۱ از اندازه المان های مشابه شبکهبندی۳ 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

تعداد المانهاي اوليه	نام قطعه
11.10	بيلت
740VV	قالب
14400	محفظه
٨٠٣١	كوبه

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 ۲۰٬۰۱ تا روی مدل اعمال شده و نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا سایر پارمترهای 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 شبیه سازی شده است.

اولین پارامتری که در این بخش مورد بررسی قرار می گیرد، نیروی اکستروژن مورد نیاز است. این عامل از اهمیت زیادی برخوردار است زيرا تعيين كننده ظرفيت پرس مورد نياز مي باشد. با توجه به نتايج نشان داده شده در شکل۷، 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 MN ۱٬۱۶۲ است. این مقدار در حالت ضریب اصطکاک ۰٬۱ که با استفاده از روانکاری امکان پذیر است به 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 اكستروژن با استفاده از روانكار با شرايط يكسان كافي است. همچنين مقایسه مقادیر حداکثر نیروی اکستروژن برای حالت اصطکاک چسبنده (m=۱) و حالت اصطکاک ناچیز m=۰٬۰۱ نشان میدهد که MN ۶۰ از نیروی استفاده شده یعنی ۵۱٬۶ درصد از نیروی مورد نیاز صرف غلبه بر اصطكاك موجود بين سطوح مي شود.



شکل ۷- نیروی اکستروژن برای ضرایب اصطکاک مختلف

پارامتر بعدی که تأثیر 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 مصطکاکی مختلف در شکل ۸ قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۸ میتوان مشاهده کرد که مقدار افزایش دما در حالت چسبنده نسبت به 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 می شود.



۸- حداکثر دمای قطعه کار برای ضرایب اصطکاک مختلف

مقدار دمای حداکثر با شرایط ضریب اصطکاک ۱ در زمان ۱ ثانیه ۲۹۹۴ و با ضریب اصطکاک ۱٫۱ مقدار آن C[°] ۴۵۵ است. مقدار این اختلاف ۴۲ درجه است که نشانگر تبدیل انرژی تلف شده بوسیله اصطکاک به حرارت میباشد. البته در حالت اصطکاک صفر نیز افزاش 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. می توان 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 قسمت های مختلف مدل، باعث یکنواختتر شدن خصوصیات مکانیکی محصولات تولید شده می شود.

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 می باشد.

متغیر دیگری که در فرآیند اکستروژن از اهمیت بالایی برخوردار است سرعت خروجی پروفیل است. این عامل، تعیین کننده شکل خروجی پروفیل و مقدار انحنا 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 ۹− توزیع دما روی سطح مقطع پروفیلها برای شرایط الف)m=۱، شکل ۹− توزیع دما روی سطح مقطع پروفیلها برای شرایط الف

بهترین حالت، مقدار ثابت و یکنواخت در نقاط مختلف سطح مقطع می باشد. اما در بیشتر موارد مقادیر سرعت در نقاط مختلف پروفیل متفاوت بوده و باعث ایجاد انحنا و یا تغییر شکلهای نامطلوب در پروفیل می شود. در عمل این اختلاف سرعت را بوسیله تغییر دادن طول بیرینگ و کم کردن آن در نقاط با سرعت پایین اصلاح می کنند. اما این روش دارای محدودیتهایی می باشد 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 می شود، 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 می شود. 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.



شکل ۱۰- شکل پروفیل خروجی برای شرایط الف)m=۱، ب)۵(m=۱ و ج)(=m=۰٫۱

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 یکنواخت تر شده است. بنابراین استفاده از روانکار مناسب جهت کاهش اصطکاک بین سطوح مخصوصاً کاهش اصطکاک در ناحیه بیرینگ قالب می تواند باعث تولید پروفیلهایی با شکلهای مطلوب تر 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.



لیکل ۱۱− توزیع سرعت روی سطح مقطع پروفیل به ازای الف)m=۱(ا - توزیع سرعت روی سطح مقطع پروفیل به ازای الف)m=۱(ا ب)Δ(ب m=۰/۱ و ج)

به دلیل وجود اصطکاک بین لایه ها، لغزش لایه های فلز روی هم باعث تولید گرما و افزایش دمای قطعه کار می شود که این افزایش دما می تواند باعث ایجاد مشکلاتی در طی تولید شود. با توجه به نحوه جریان مواد (آلومینیوم) در داخل محفظه و قالب می توان دریافت که مقدار سرعت جریان نزدیک به سطح در شرایط اصطکاک زیاد نسبت به شرایط اصطکاک کمتر کاهش پیدا می کند. این عامل باعث گسترش شرایط اصطکاک کمتر کاهش پیدا می کند. این عامل باعث گسترش افزایش اختلاف سرعت بین مرکز بیلت و قسمتهای بیرونی آن شده و سرعت در مرکز بیلت بیشتر از کناره های آن می شود. این اختلاف سرعت باعث بوجود آمدن جریان شعاعی از خارج بیلت به سمت مرکز آن شده و در نتیجه خطر نفوذ ناخالصی های موجود روی سطح بیلت به داخل محصول افزایش می یابد. از طرفی دیگر بیشتر بودن سرعت جریان در مرکز بیلت خطر ایجاد حفره در مرکز بیلت و انتقال آن به محصولات را افزایش می دهد که این امر باعث افزایش نرخ ضایعات



شکل ۱۲− ناحیه فلز مرده به ازای الف)m=۰٫۵ (ب) m=۰٫۵ و ج)۱(ج=m

۴- نتیجه گیری

بررسی تاثیر روانکار در فرآیند اکستروژن با استفاده از ضرایب اصطکاک مختلف نشان میدهد که مقدار نیروی اکستروژن با کم تر شدن مقدار اصطکاک کاهش چشمگیری دارد. به طوریکه مقایسه نیروی اکستروژن بدست آمده برای مدل با ضریب اصطکاک ۱ و مدل با ضریب اصطکاک ۱/۰ نشان میدهد که بیش از ۵۰ درصد از نیروی اکستروژن مورد نیاز صرف غلبه بر اصطکاک بین سطوح می شود. بنابراین می توان گفت که با کاهش مقدار اصطکاک بین سطوح کم فرآیند اکستروژن آلومینیوم، می توان از پرسهایی با ظرفیت کمتر استفاده کرد و این باعث کاهش هزینههای طراحی و تولید می شود.

موضوع مهم بعدی دمای بیشینه قطعه کار در طی فرآیند است. نتایج بدست آمده نشان میدهد که با کاهش مقدار اصطکاک بین

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، معمولا سرعت خروجی پایین تر 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 می،اشد.

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 تقریبا تا انتهای بیلت ادامه دارد و باعث ایجاد منطقه قیفی شکل جریان در مرکز بیلت می-شود. این در حالی است که در شرایط وجود روانکار این ناحیه بسیار کوچکتر است و مواد با مقاومت کمتری برای جریان یافتن مواجه می-شوند. 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-Jooybari 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., Duszczyk J. and Katgerman L., Modeling of double action extrusion—A novel extrusion process for friction characterization at the

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 Metliod 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., Duszczyk 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.