



# Experimental and Numerical Analysis of the Extrusion Process in the Forming of Metal Composite Metal Billets

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Hosseinzadeh S.<sup>1</sup>,  
Davari A.<sup>1</sup>,  
Hashemian A.H.<sup>1\*</sup>

### How to cite this article

Hosseinzadeh S, Davari A, Hashemian A.H. Experimental and Numerical Analysis of the Extrusion Process in the Forming of Metal Composite metal billets. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(02):119-129.

<sup>1</sup> Department of Aerospace Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Address: Department of Aerospace Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ah.hashemian@gmail.com

### Article History

Received: September 8, 2023

Accepted: June 8, 2024

ePublished: June 21, 2024

## ABSTRACT

Composite materials are of great interest due to their exceptional strength, hardness-to-density ratio, high corrosion resistance, and low weight. One of the suitable methods for making composite pipes is using the extrusion process. Extrusion is a plastic deformation process that due to the compressive state of stress in extrusion, materials with low plasticity can be formed by this method. This article deals with the experimental-numerical investigation of extrusion, from various methods of forming process. Extrusion is done on a composite tube using aluminum and magnesium alloys. Aluminum is used due to its strength compared to high weight, excellent malleability, and magnesium due to the lightest structural metal, the lowest density among structural materials, machining, welding and casting capabilities, as well as high specific strength. The mentioned process was tested at different extrusion ratio, temperature and speed, and the effect of different process parameters on the properties of the extruded product was investigated. Then the process was simulated in the software and the experimental results obtained from the laboratory work and the numerical results obtained from the simulation were compared and validated with each other and the error percentage between the graphs of the experimental and numerical results was examined.

**Keywords** The Forming Process of Metal Matrix Composite, Extrusion, Experimental and Numerical Analysis, Finite Element Method, Metallic Billets

## CITATION LINKS

1- Learning from the traditional smith in... 2- Challenges and issues in continuum modelling of... 3-Modelling and validation of sheet metal... 4- A novel process for manufacturing... 5- Spiral metal tube multi-roller bending springback... 6- A review: Drilling performance and hole quality... 7- Dealloying-driven local corrosion... 8- Microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Sn-Ca... 9- Variation in dynamic deformation behavior... 10- The workability evaluation... 11- Microstructures and mechanical properties of pure... 12- High-ductility magnesium-zinc-cerium extrusion alloys. 13- Controlling Al/Cu composite diffusion... 14- Effect of extrusion ratio on microstructure, textures... 15- Effect of hot extrusion on microstructures... 16- Corrosion behavior of fine-grained Mg-7.5 Li-3Al-1Zn... 17- Activation volume and the role of solute... 18- Strain localization at longitudinal weld seams... 19- Inherited multimodal microstructure evolution of ... 20- Mechanistic study of Mg-Mn-Al extrusion... 21- Investigating the effect of mechanical... 22- Microstructural characteristics and deformation 23- Recrystallization behavior and texture evolution... 24- Dynamic behavior of extruded... 25- Development of Al/Mg bimetal... 26- Effects of applied pressure and residual heat... 27- Metalworking Science and Engineering 28- An investigation on determination of flow... 29- Effects of die land on the cold... 30- Development of Mg-6Al-4Sn-1Zn alloy... 31- Interlaminar shear strength of Carbon/PEEK... 32- Application of T-shape friction test for AZ31 ... 33- On the flat punch hole expansion test of ... 34- Influence of alloy composition and... 35- Design and finite element analysis of cold extrusion die... 36- Analysis on flow stress of magnesium... 37- Dynamic behavior of extruded AZ61 Mg alloy... 38- Hot deformation characteristics of as-cast and... 39- Microstructure and strength of... 40- Controlling Al/Cu composite diffusion layer during hydrostatic... 41- Influence of pressing speed on... 42- Influence of pressing temperature on microstructural... .

## تحلیل عددی و تجربی فرآیند اکستروژن در شکل‌دهی بیلت‌های فلزی مرکب

ساناز حسین زاده<sup>۱</sup>، علیرضا داوری<sup>۱</sup>، امیرحسین هاشمیان<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی هوافضا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

### چکیده

یکی از روش‌های مناسب برای ساخت بیلت‌ها و لوله‌های مرکب استفاده از فرآیند اکستروژن است. در ساخت سفینه‌های فضایی، موشک‌ها و سایر وسایل پیشرفته در صنایع هوافضا، اکستروژن آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم بسیار کاربرد دارند. برای ساخت قاب‌ها و کف هواپیما ترکیبی از صفحات، قطعات اکستروژنی و ورقه‌های شکل داده شده استفاده می‌شود. حدود ۶۰ درصد از ساختار هواپیما و ۸۰ درصد از وزن بدون بار هواپیما از آلیاژهای آلومینیوم است. آلومینیوم استحکام نسبت به وزن بالا، شکل‌پذیری عالی را داراست. منیزیم سبک‌ترین فلز مهندسی است و دارای کم‌ترین چگالی است و موجب صرفه‌جویی در مصرف سوخت می‌شود. این مقاله به صورت عددی و تجربی به اعمال فرآیند اکستروژن بر روی بیلت‌های مرکب Al/Mg می‌پردازد. در این مقاله، فرآیند اکستروژن در نسبت‌های اکستروژن، دما و سرعت‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و اثر پارامترهای مختلف فرآیند بر روی خواص محصول اکستروژن شده بررسی گردیده است. همچنین این فرآیند در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی گردیده و سپس نتایج تجربی حاصل از کار آزمایشگاهی و نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه و اعتبار سنجی گردید و میزان درصد خطا مابین نمودارهای نتایج تجربی و عددی توسط نرم‌افزار اورجین مورد بررسی قرار گرفت که نزدیک بودن نتایج و صحت کار آزمایشگاهی نشان داده شد.

**کلیدواژه‌ها:** فرآیند شکل‌دهی، اکستروژن، تحلیل عددی و تجربی، روش اجزای محدود، بیلت‌های فلزی مرکب

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹

\*نویسنده مسئول: amir\_hashemian@srbiau.ac.ir

### ۱- مقدمه

انواع فرآیندهای شکل‌دهی فلزات به دو گروه تغییر شکل توده‌ای و ورقکاری تقسیم می‌شوند<sup>[۱]</sup>. از مهم‌ترین فرآیندهای تغییر شکل توده‌ای به فرآیندهای نورد، آهن‌گری، مفتول‌کشی، میله‌کشی و اکستروژن می‌توان اشاره نمود<sup>[۲-۴]</sup>. فرآیندهای شکل‌دهی را می‌توان از نظر دمای کاری به سه گروه سرد، گرم، داغ و از نظر حالت تغییر شکل به سه گروه یکنواخت، غیر یکنواخت، مختلط و از نظر هندسه قطعه کار به دو گروه هندسه ورق و حجمی تقسیم نمود<sup>[۵]</sup>.<sup>[۷]</sup> جیانگ و همکارانش اکستروژن را یک فرآیند تغییر شکل پلاستیک فشاری غیر مستقیم معرفی کرده که در نتیجه آن قطعاتی با سطح مقطع صاف و عمودی تولید می‌شوند<sup>[۸]</sup>. کیم و

همکارانش شکل نهایی محصول اکستروژن شده را وابسته به شکل سوراخ موجود بر روی قالب دانسته که با فشار، مواد به داخل آن رانده می‌شود<sup>[۹]</sup>. گوآن و همکارانش، انجام اکستروژن را بسته به نوع آلیاژ و روش مورد نظر به دو شکل سرد و گرم تقسیم و بررسی نموده‌اند<sup>[۱۰]</sup>. سان و همکارانش فرآیند اکستروژن را از جهت تغییر شکل به چهار گروه مستقیم، معکوس، ضربه‌ای و هیدرواستاتیک تقسیم و بررسی کرده‌اند<sup>[۱۱]</sup>. لو و همکارانش اکستروژن معکوس را بررسی کردند<sup>[۱۲]</sup>. اکستروژن ضربه‌ای توسط لی و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت<sup>[۱۳]</sup>. تنگ و همکارانش اکستروژن هیدرواستاتیک را مورد بررسی قرار دادند<sup>[۱۴]</sup>. ریتاکوماری و همکارانش به فرآیند اکستروژن چند سوراخه با قالب‌هایی با بیش از یک روزنه پرداخته‌اند که قطعات اکستروژن شده بدست‌آمده بیش از یک محصول و طول و خواص مکانیکی متفاوتی را نشان می‌دهند<sup>[۱۵]</sup>. بینگ ژائو و همکارانش آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی برای تحلیل اکستروژن آلیاژ آلومینیوم AA6063 تحت سرعت‌های زاویه‌ای متعدد انجام داده‌اند که نتایج نشان داد تغییرات در سرعت اکستروژن مستقیماً بر تغییر شکل مواد و بر حداکثر دمای اکستروژن تأثیر می‌گذارد<sup>[۱۶]</sup>. ژانگ و چن بر روی شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن لوله‌های آلیاژ منیزیم و منحنی تنش-کرنش کار کرده‌اند<sup>[۱۷]</sup>. ژائو و همکارانش فرآیند اکستروژن را به وسیله‌ی روش اجزای محدود و استفاده از روش ALE جهت شبکه بندی مجدد شبیه‌سازی کرده و عیوب فرآیند اکستروژن را در شرایط واقعی نشان دادند<sup>[۱۸]</sup>. نای و همکارانش مطالعه خود را بر روی SiCp/AZ91 در فرآیند اکستروژن انجام دادند که نشان داد افزایش دمای اکستروژن از ۲۵۰ C° به ۳۰۰ C° باعث بهبود تدریجی دانه‌ها و افزایش استحکام تسلیم و استحکام نهایی می‌شود<sup>[۱۹]</sup>. کانگ و وان تأثیر روانکار در گسیختگی هسته را بررسی نموده و روشی جهت پیش‌بینی نرخ کرنش شکست برای طراحی قالب در اکستروژن مستقیم و معکوس و روابطی جهت نیروی اتصال بین فلزی بین هسته و پوسته ارائه نموده‌اند<sup>[۲۰]</sup>. متریال مورد استفاده در این مقاله برای بیلت‌های مرکب آلیاژ آلومینیوم AA6063 و آلیاژ منیزیم AZ80 می‌باشند. آلومینیوم به علت دارا بودن استحکام نسبت به وزن بالا، شکل‌پذیری عالی و منیزیم به علت سبک‌ترین فلز ساختاری، کم‌ترین چگالی مابین مواد سازه‌ای، قابلیت ماشین‌کاری، جوش‌کاری و ریخته‌گری و همچنین استحکام ویژه بالا بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. آلیاژ ۶۰۶۳ آلومینیوم یکی از پرکاربردترین انواع آلیاژهای آلومینیوم است که دارای نرخ اکستروژن‌پذیری بالاتری است که امکان تولید اشکال خیلی پیچیده را ایجاد می‌کند. از نظر ترکیب شیمیایی می‌توان اشاره نمود که آلومینیوم منیزیم یکی از کاربردی‌ترین و پرمصرف‌ترین آمیزان‌های آلومینیوم می‌باشد. این

جدول ۱) خواص مکانیکی آلیاژ ۶۰۶۳<sup>[23]</sup>

نوع عملیات حرارتی	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	درصد ازدیاد طول	سختی (HB)	استحکام برشی (MPa)	استحکام خستگی (MPa)
0	90	48	-	25	69	55
T1	152	90	20	42	97	62
T4	172	90	22	-	-	-
T5	186	145	12	60	117	69
T6	241	214	12	73	152	69
T83	255	241	9	82	152	-
T831	207	186	10	70	124	-
T832	290	26	12	95	186	-

دهنده این آلیاژ، منیزیم و سیلیسیم است و مقاومت بسیار عالی در برابر خوردگی و قابلیت جوش‌پذیری، لحیم‌کاری یا بریزینگ و کارپذیری بسیار خوبی را نیز داراست. هم‌چنین قدرت کششی آن نسبتاً خوب و قابلیت ماشین‌کاری آن در حد متوسط است. آلیاژ ۶۰۶۳ مشابه با نوع ۶۰۶۱، برای تولید پروفیل‌های اکستروژن شده بسیار کاربرد دارد و زمانی استفاده می‌شود که قدرت و استحکام در حد متوسط نیاز باشد ولی مقاومت در برابر خوردگی و کیفیت سطح باید عالی باشد<sup>[23,24]</sup>.

### ۲-۲ ریخته‌گری

ریخته‌گری آلیاژهای منیزیم معمولاً به همه روش‌های سنتی قابل انجام است. انتخاب روش انجام عمل ریخته‌گری به عواملی همچون شکل هندسی مورد نیاز، خواص مورد نظر، تعداد کل ریخته‌گری مورد نیاز و کاربرد و خواص آلیاژ وابستگی دارد<sup>[25]</sup>. در ریخته‌گری انجام شده در مقاله حاضر از بوته و قالبی فولادی بهره گرفته شده است. در این روش منیزیم مذاب، در یک محفظه فولادی با دمای بالا و اتمسفر کنترل شده در داخل دستگاه دایکست نگهداری می‌شود. مذاب منیزیم با استفاده از یک پیستون و یک لوله گردن‌گازی به داخل راهگاه و قالب هدایت می‌شود و عنصرهای آلیاژهای منیزیم AZ80 ریخته شده به روش طیف‌سنجی جذب اتمی که با دقت بالایی می‌تواند غلظت عناصر فلزی موجود در یک نمونه را تعیین نماید، اندازه‌گیری گردیده است.

### ۲-۳ آزمایش فشار

برای رسم منحنی نیرو-جابجایی مواد که در این مقاله از آن بهره گرفته شده است از آزمایش فشار (pressure Test) استفاده گردیده است<sup>[26]</sup>. برای منیزیم AZ80 نمودار نیرو-جابجایی در ۳ سه‌نرخ کرنش و سه دما به ترتیب نرخ کرنش‌های ۰/۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ و دماهای ۲۲۵، ۲۵۰ و ۳۰۰ سانتیگراد بدست آمده است. برای آلومینیم نیز آزمایش‌های انجام شده در سه‌نرخ کرنش و دو دما به ترتیب نرخ کرنش‌های ۰/۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ و دما ۲۵۰ و ۳۰۰ سانتیگراد بدست آمده است.

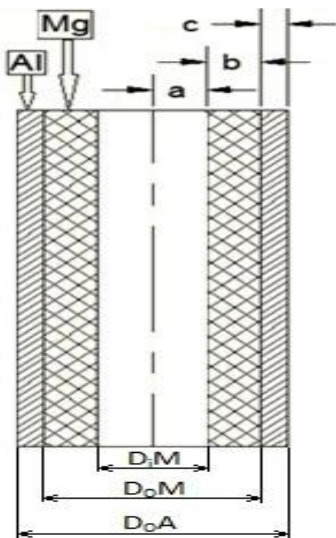
محصول با کمک فلز پایه آلومینیوم، منیزیم و درصد بسیار اندکی از سایر عناصر فلزی و غیر فلزی تشکیل می‌شود. هم‌چنین آلومینیوم به تنهایی بسیار نرم است و افزودن عناصر آلیاژی، خواص مکانیکی آن را بهبود می‌بخشد. آلومینیوم منیزیم بر روی سختی و مقاومت آلیاژهای آلومینیومی تأثیر می‌گذارد<sup>[21,22]</sup>. این مقاله به فرآیند اکستروژن از نوع مستقیم و گرم، آزمایش‌های تجربی، هم‌چنین شبیه‌سازی و بررسی عددی و مقایسه مابین نتایج تجربی و عددی با یکدیگر پرداخته است<sup>[23,24]</sup>. از نوآوری‌های این مقاله می‌توان اشاره نمود که فرآیند اکستروژن معمولاً بر روی آلومینیوم و بیش از دو فلز به صورت ترکیبی اعمال می‌شود در حالی که این مقاله منحصر به اعمال فرآیند اکستروژن بر روی دو فلز آلومینیوم و منیزیم می‌پردازد. با توجه به عدم وجود تحقیقات کافی پیرامون اکستروژن دو فلزی با پایه‌ی آلیاژ منیزیم چه در داخل و چه خارج از کشور و مزایایی که فرآیند اکستروژن آلیاژ منیزیم دارند، این پژوهش صورت گرفته است.

### ۲-۴ آزمایش‌های تجربی

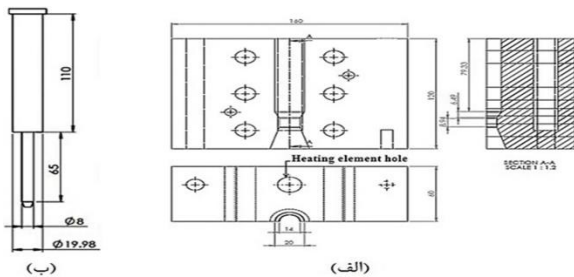
#### ۱-۲ فلزات به کار رفته در تحقیق

الف: از جمله خواص آلیاژهای منیزیم می‌توان به وزن سبک، استحکام به وزن بالا، نسبت سختی به وزن بالا، قابلیت ریخته‌گری خوب، قابلیت ماشین‌کاری خوب و میرایی بالا اشاره نمود. امروزه منیزیم و آلیاژهایش در صنایع هوافضا و خودروسازی به جهت کاهش وزن و صرفه‌جویی در مصرف سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرند. آلیاژهای منیزیم دارای چگالی نسبتاً پایین و استحکام بالایی هستند. از خواص مکانیکی این فلز می‌توان به قابلیت جذب ارتعاشات اشاره نمود. از خصوصیات آلیاژهای منیزیم در مقایسه با آلومینیوم، پایداری ابعادی در برابر تغییرات حرارتی می‌باشد. در منیزیم، رسانایی پایین‌تر و گرمای ویژه بالاتر از آلومینیوم است. آلیاژهای منیزیم حین گرم و سرد شدن سریع در فرآیند ماشین‌کاری، تغییرات ابعادی کمی دارند. استفاده از منیزیم در سازه‌های هوانوردی عمدتاً به این دلیل است که اجزای تولید شده با آن نسبت به سایر فلزات رایج سبک‌تر بوده و ویژگی‌های میرایی و دمپینگ بسیار عالی دارند<sup>[21,22]</sup>.

ب: آلیاژهای آلومینیوم به علت داشتن خواصی مانند استحکام نسبت به وزن بالا، قابلیت جوشکاری، شکل‌پذیری عالی و مقاومت به خوردگی، به‌طور گسترده‌ای در انواع سازه‌ها، صنایع هوایی و... مورد استفاده قرار می‌گیرند. آلیاژ ۶۰۶۳ دارای خواصی مانند: مقاومت خوب در برابر خوردگی، مقاومت بالا در برابر خستگی، عملکرد مناسب در دماهای بالا، خواص جوش‌پذیری، عملکرد خوب در برابر فشار و مقاومت مناسب در برابر اثرات حرارتی می‌باشد. خواص مکانیکی آلیاژ ۶۰۶۳ در جدول ۱ مطرح شده است. آلیاژ ۶۰۶۳ عضوی از سری ۶۰۰۰ می‌باشد. اجزای اصلی تشکیل



شکل ۱) شکل شماتیک نمونه (دو فلزی یا مرکب) اولیه آزمایش با طول ۴۰ میلی متر (طول تمام نمونه ها یکسان انتخاب شد).



شکل ۲) شکل شماتیک: الف) قالب مورد استفاده در آزمایش های اکستروژن، نیم زاویه قالب=۲۵ درجه، طول گلوگاه=۱۰ میلی متر، قطر قالب=۲ میلی متر. ب) سنبه ی مورد استفاده در نسبت اکستروژن ۲/۵، قطر سنبه=۱۹/۹۸ میلی متر.

شده و سپس آماده باز شدن شوند. بعد از آن محصولات اکستروژن شده آماده شده و در دمای اتاق همراه با قالب سرد می شوند [30].

برای بررسی تأثیر فرآیند بر روی خواص محصولات، آزمایش های تکمیلی بر روی آنها انجام گرفت. تغییر در خواص مکانیکی محصولات نسبت به حالت ریخته گری شده نیز توسط آزمایش فشار حلقه انجام شد. آزمایشی نیز برای بررسی استحکام بین فلزی در ناحیه اتصال بین دو لایه ی Al و Mg صورت گرفته که شامل آزمایش سنبه ی برشی یا پانچ برشی جهت بررسی استحکام برشی بین دو لایه می باشد. شکل ۳- الف قالب مورد استفاده، شکل ۳- ب نمایشی از نمونه های دو فلزی اکستروژن شده در شرایط متفاوت آزمایشگاهی و شکل ۳- ج نمایشی از هسته و پوسته آماده شده برای انجام فرآیند اکستروژن را نشان می دهند.

۲-۴- الف آزمایش پانچ برشی یا سنبه برشی

آزمایش پانچ برشی، آزمایشی است به جهت اندازه گیری نیروی برشی لازم برای جدا کردن پوسته از هسته. در این آزمایش با اندازه گیری و بررسی این نیرو میزان استحکام و چسبندگی دو لایه

۲-۳- الف نمودار تنش- کرنش اولیه با استفاده از آزمایش فشار درصد عنصرهای آلیاژی برای آلومینیوم AA6063 به روش کوانتومتری اندازه گیری شده است. در آزمایش فشار یک استوانه متقارن توپر به عنوان نمونه آزمایش در نظر گرفته شده و مابین دو سطح صاف و کاملاً روانکاری شده تحت اعمال فشار محوری قرار می گیرد. یک نمونه استوانه ای با مشخصات قطر ۶mm و ارتفاع ۹mm استفاده گردیده و در طی ۸ مرحله ارتفاع آن به ۳mm رسیده و کاهش یافته است. نهایتاً ۸ نقطه مذکور بدست آمده یک نمودار تنش- کرنش اولیه را با موفقیت به وجود آورده اند [27,28].

۲-۴- آزمایش اکستروژن

برای ساخت قالب از فولاد DIN1.2510 که با نام تجاری آموتیت معروف است، استفاده گردید. این فولاد در مقابل فشار، سایش و گرما مقاوم است. اندازه نیم زاویه قالب ۲۵° و طول گلوگاه ۱۰mm انتخاب شده است. برای ساخت قالب از دستگاه تراش CNC بهره گرفته شد و پس از ساخت تا سختی ۴۸ راکول آبدهی بر روی آن انجام شد. قالب به صورت دو تکه یا دو بخشی ساخته شد. تمامی آزمایش ها در شرایطی یکسان انجام شدند. در قالب مد نظر از مندرل متحرک برای تولید لوله های دو فلزی استفاده شد. مشخصات قطر مندرل ها عبارتند از: ۸، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ میلی متر می باشند. برای ساخت سنبه و مندرل نیز از فولاد DIN1.2510 (آموتیت) استفاده گردید و تا سختی ۴۵ راکول آبدهی انجام شد. مشخصات هندسی قالب و مشخصات هندسی سنبه و مندرل در شکل ۲ نشان داده شده است. هم چنین از یک بیلت مرکب استفاده شده است که در شکل ۱ نشان داده شده است. به روش ریخته گری، منیزیم AZ80 تولید شده همراه با آلومینیوم AA6063 برای رسیدن به ابعاد مد نظر ماشین کاری شدند. عملیات تراشکاری ابتدا بر روی آلومینیوم اعمال شد و قطر بیرونی آن به اندازه ۱۹/۹ میلی متر و ایجاد ۰/۱ میلی متر تلرانس با سوراخ قالب روتراشی شد سپس بعد از اعمال سوراخ های داخلی، منیزیم به گونه ای تراشکاری گردید که آلومینیوم با فشار اندک دست بتواند روی آن قرار بگیرد و سپس سوراخ داخلی منیزیم به همین شیوه برای مندرل ها با قطرهای مختلف تراشیده و اعمال گردید. طول تمام نمونه ها ۴۰ میلی متر و یکسان انتخاب گردید [29].

جهت انجام تحقیق بر روی اکستروژن لوله ای دو فلزی Mg-Al آزمایش های متعددی در دو دمای ۲۵۰ و ۳۰۰ سانتیگراد و سه سرعت ۱، ۲ و ۴ میلی متر بر دقیقه و چهار نسبت اکستروژن ۲/۴، ۳/۱، ۳/۷ و ۴/۹ اعمال گردید. تمامی آزمایش ها به وسیله دستگاه سنتام ۴۰۰KN SANTAM انجام گرفت. با تعیین سرعت و مقدار جابجایی لازم برای دستگاه سنتام، فرآیند اکستروژن شروع می شود. نهایتاً بعد از اتمام فرآیند، سنبه به آرامی از درون قالب خارج شده و المنت ها نیز خاموش می شوند تا قالب ابتدا خنک

به ترتیب برابر است با ۸، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ میلی‌متر و برای نمونه‌های تک فلزی منیزیمی قطر داخلی برای ۳ نسبت اکستروژن ۲/۵، ۳/۱ و ۳/۷ به ترتیب برابر با ۸، ۱۰ و ۱۱ میلی‌متر و قطر خارجی ۱۱/۶، ۱۱/۹ و ۱۲/۸ میلی‌متر می‌باشد. تمامی آزمایش‌ها به وسیله‌ی دستگاه سنتام Santam با مشخصه‌های سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه، در دمای اتاق و با استفاده از روانکار  $MoS_2$  انجام گردید [32-34]. دستگاه سانتام (STM) SANTAM برای تست آسان و دقیق مواد با هزینه کم طراحی شده است.

### ۳- شبیه سازی اجزای محدود

برای شبیه‌سازی فرآیند مذکور در مرحله اول Part، مندرل و قالب مدل‌سازی می‌شوند. برای هسته از آلیاژ منیزیم و برای پوسته از آلیاژ آلومینیم استفاده شده است. به علت ماهیت تقارن محوری فرآیند اکستروژن مستقیم لوله، تمامی مدل‌ها به صورت تقارن محوری تعریف می‌شوند. قسمت‌های مندرل و قالب به صورت صلب و از نوع Analytical Rigid انتخاب می‌شوند. در مرحله دوم Property با توجه به آن که فرآیند اکستروژن در دو دمای ۲۵۰ و ۳۰۰ سانتیگراد انجام می‌شود، برای هر کدام از دماهای مد نظر، خواص پلاستیک ماده در نرخ کرنش‌های مختلف، هم‌چنین خواص الاستیک ماده نیز شامل ضریب الاستیسیته و ضریب پواسان، چگالی ماده و خصوصیات متریال قطعه کار و قالب نیز تعریف می‌شوند. در قسمت Assembly چهار قسمت تعریف شده شامل مندرل، قالب، لایه‌ی آلومینیمی و منیزیمی در کنار هم مونتاژ می‌شوند. در مرحله step تحلیل به صورت Dynamic Explicit تعریف می‌شود. در شبیه سازی فرآیند اکستروژن زمانی که سرعت انجام فرآیند پایین باشد (مانند سرعت انجام شده در این پایان نامه ۱، ۲ و ۴ mm/min)، زمان تحلیل بسیار زیاد خواهد بود، که برای کم کردن تأثیر آن از روش Mass scaling استفاده شده است که معمولاً جهت افزایش راندمان محاسباتی در تحلیل‌های شبه استاتیکی و نیز برخی تحلیل‌های دینامیکی، جهت کنترل نمو زمانی پایا استفاده می‌شود. ابزار دیگر روش شبکه‌بندی مجدد ALE می‌باشد. استفاده از این تکنیک باعث بهبود کیفیت شبکه و افزایش دقت حل می‌گردد. مرحله بعد Interaction است که خصوصیات اصطکاک بین فلز و قالب و نیز در سطح تماس دو لایه وارد می‌شود. در این تحلیل چهار مرحله تعریف می‌گردد. در مرحله اول جهت پایدار شدن تماس‌ها قالب کمی جابجا می‌شود. در مرحله دوم فرآیند اکستروژن انجام خواهد شد. این عمل با اعمال جابجایی به انتهای میله انجام می‌شود. در مرحله سوم المان‌های تماسی از روی سطوح قطعه برداشته شده و قطعه برای سرد شدن آماده می‌شود. در مرحله چهارم قطعه سرد شده و تغییر شکل‌ها در این مرحله به دلیل انقباض در قطعه خواهد بود. ضریب اصطکاک سطح تماس دو لایه بر مبنای مقایسه دو عامل مختلف مشاهده شده شامل: ۱) نمودار نیرو-جابجایی یا تنش-کرنش (۲) میزان



شکل ۳ الف) شکل واقعی قالب مورد استفاده در پژوهش.



شکل ۳ ب) نمای واقعی از نمونه‌های دو فلزی اکستروژن شده در شرایط متفاوت آزمایشگاهی.

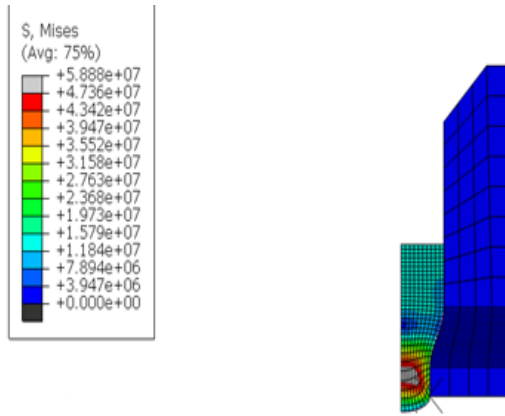


شکل ۳ ج) نمایی از هسته و پوسته آماده شده برای انجام فرآیند اکستروژن.

از دو فلز متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد [31]. تمامی نمونه‌ها از مقطع مشابهی با مشخصه طول ۵ میلی‌متر از نمونه‌های اکستروژن شده توسط ااره دستی جدا شدند.

### ۲-۴-ب آزمایش فشار حلقه

در آزمایش فشار حلقه یک حلقه مسطح مابین دو قالب که دارای سطوح تخت می‌باشند، فشرده می‌شود تا زمانی که تغییر شکل پیدا کند. این آزمایش، اول برای ارزیابی تنش سیلان یک ماده معلوم و دوم برای ارزیابی ضریب اصطکاک می‌باشد [32,33]. نمونه‌های مورد استفاده برای انجام آزمایش فشار حلقه مد نظر، از نمونه‌های اکستروژن شده لوله‌ای دوفلزی و هم‌چنین نمونه‌های اکستروژن شده تک فلزی منیزیمی از آزمایش پانچ برشی تهیه شده‌اند. نمونه‌های لازم آزمایش فشار حلقه با مشخصه ارتفاع ۴ میلی‌متر تهیه شدند. قطر خارجی نمونه‌های دوفلزی ۱۴ میلی‌متر و قطر داخلی آن‌ها برای ۴ نسبت اکستروژن ۲/۵، ۳/۱، ۳/۷ و ۴/۹

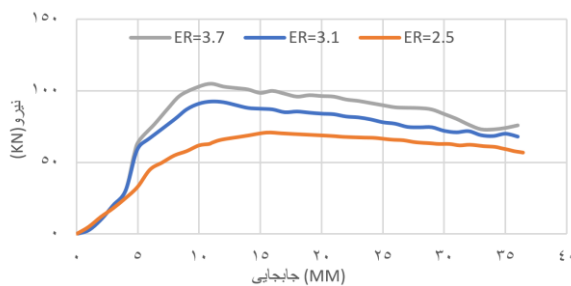


شکل ۳ ب) کانتور تنش در حین فرآیند اکستروژن.

#### ۴- نتایج و بحث

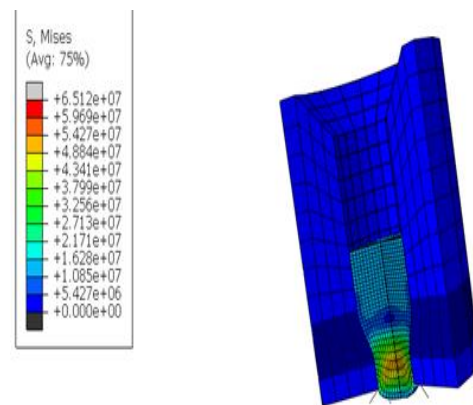
##### ۴-۱- الف اثر نسبت اکستروژن

بر روی نمودار نیرو-جابجایی برای ۳ نسبت اکستروژن: ۲/۵، ۳/۱، ۳/۷ و ۳/۷ در ۳ سرعت: ۱، ۲ و ۴ میلی‌متر بر دقیقه و ۲۵۰°C و ۳۰۰°C انجام شده است. با افزایش نسبت اکستروژن قله نمودار نیرو-جابجایی به سمت چپ انتقال پیدا می‌کند. علت این این پدیده عبور سریع‌تر جریان ماده از ناحیه گلوگاه است. یعنی در زمانی که جابجایی کمتری به سنبه اعمال می‌شود، ماده از ناحیه گلوگاه عبور می‌کند. شکل ۵-الف نشان دهنده نمودار نیرو-جابجایی آزمایش اکستروژن در دمای ۳۰۰°C و سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه در نسبت‌های اکستروژن متفاوت است. شکل ۵-ب نمایی از نمونه‌های دو فلزی اکستروژ شده را نشان می‌دهد. با افزایش نسبت اکستروژن نیروی شکل‌دهی نیز دچار افزایش می‌گردد. بر اساس رفتار تنش-کرنش آلیاژ AZ80 نسبت اکستروژن افزایش یافته و در نتیجه آن کرنش مؤثر اعمال شده به نمونه افزایش و تنش سیلان کاهش پیدا می‌کند. هر چه نسبت اکستروژن افزایش یابد فضای ناحیه مخروطی و گلوگاه به ازاء جابجایی کمتر سنبه پر شده و نمودار تنش-کرنش با سرعت بیشتری به نقطه بیشینه خود می‌رسد.



شکل ۵ الف) نمودار نیرو-جابجایی آزمایش اکستروژن در دمای ۳۰۰°C و سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه در نسبت‌های اکستروژن متفاوت.

پیشروی هسته منیزیمی نسبت به پوسته آلومینیمی که نشان دهنده مقاومت در جابجایی دو فلز نسبت به هم در آزمایش‌ها با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی برابر با ۰/۱ انتخاب گردید [32]. پس از تعریف مقادیر اصطکاک، پنج سطح در تماس، شامل آلومینیم و قالب، آلومینیم و مندرل، منیزیم و قالب، منیزیم و مندرل و سطح تماس آلومینیم و منیزیم با شرایط اصطکاکی لحاظ می‌گردد. در مرحله بعد بارگذاری و شرایط مرزی نیز در قسمت Load تعریف گردیده است. در این مسئله برای اینکه قالب تغییر شکلی نداشته باشد، لازم است که به صورت جسم صلب برای برنامه تعریف شود. با اعمال قیودی از حرکت قالب در جهت محورهای x، y و هم‌چنین دوران حول محور z جلوگیری می‌شود. شرایط مرزی استفاده شده در این فرآیند عبارتند از:  $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$  که برای قالب در نظر گرفته می‌شوند و قید  $V1=V2=VR3=0$  که با انتخاب نوع Velocity/Angular برای مندرل استفاده می‌شود. مرحله بعد مرحله شبکه بندی است که در قسمت Mesh انجام می‌شود. پس از تحلیل، کانتور تنش رسم می‌شود که در شکل ۴-الف نشان داده شده است. در مرحله مش از تکنیک مش بندی free استفاده می‌شود. در فرآیند حاضر المان‌ها CAX4R 4-node برای هسته و پوسته در نظر گرفته شد. جهت برقراری یک ارتباط مناسب مابین المان‌های چهار ضلعی با اندازه‌های متفاوت المان مثلثی CAX3 اعمال شد. ترکیب دو حالت مورد استفاده ۴ وجهی و مثلثی به نام Quad\_Dominated معروف می‌باشد. تعداد المان‌های چهارضلعی ۷۲۵ و ۱۰۷۴ تعداد المان‌های مثلثی ۷۲ و ۳۹ تعداد گره‌ها ۸۲۴ و ۱۱۹۶ به ترتیب برای هسته و پوسته انتخاب شدند [35]. شکل ۴-الف نمایی از شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن و شکل ۴-ب کانتور تنش در حین فرآیند اکستروژن است.



شکل ۳ الف) نمایی از شبیه سازی اکستروژن.

#### ۴-۱-ج اثر سرعت

بر روی منحنی‌های تنش- کرنش برای ۳ نسبت اکستروژن ۲/۵، ۳/۱ و ۳/۷ در ۳ سرعت ۱، ۲ و ۴ میلی‌متر بر دقیقه و ۲۵۰°C و ۳۰۰°C مورد بررسی قرار گرفته است. زمانی که سرعت اکستروژن افزایش پیدا می‌کند نمودارها نیز به سمت نیروهای بالاتر منتقل می‌شوند به عبارتی نیروی بیشتری برای انجام آزمایش اکستروژن مورد نیاز است. در سرعت‌های بالاتر نیرو با شیب ابتدایی بیشتری شروع به افزایش کرده و موجب بالاتر قرار گرفتن نمودارهای تنش-کرنش گردیده است و علت این موضوع تکثیر سریع نابجایی‌ها در سرعت‌های بالا است که موجب می‌شود چگالی نابجایی بیشتری نسبت به سرعت‌های پایین‌تر، ایجاد شود [38] که در شکل ۷ الف و ب نشان داده شده است.

#### ۴-۲ نتایج آزمایش سنبه برشی

الف) به جهت بررسی استحکام سطح تماس دو لایه یک آزمایش تکمیلی انجام گردید که عبارتند از آزمایش سنبه برشی در دمای اتاق، که نشان‌دهنده استحکام برشی مابین دو لایه است. با افزایش نسبت اکستروژن، نیروی مورد نیاز برای جدا نمودن پوسته منیزیمی از هسته آلومینیمی کاهش می‌یابد و پوسته به حدی نازک می‌شود که اتصال دو فلز با یکدیگر با دشواری انجام شده و استحکام سطح تماس دو لایه نیز کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت اکستروژن ضخامت لایه‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه نفوذ ضعیف‌تری در سطح اتصال دو لایه مشاهده می‌شود و هم‌چنین نیروی لازم جهت جداسازی دو لایه کاهش می‌یابد.

ب) با افزایش سرعت اکستروژن نیروی لازم جهت جدا نمودن دو لایه منیزیمی آلومینومی از یکدیگر افزایش می‌یابد و موجب افزایش نیروی شکل‌دهی می‌شود و افزایش فشار، نفوذ بیشتری در سطح اتصال دو لایه را ایجاد کرده است [39].

ج) افزایش دما موجب افزایش استحکام برشی می‌شود. با افزایش نسبت اکستروژن و افزایش فشار نفوذ بیشتری در سطح اتصال دو فلز ایجاد می‌گردد [40].

#### ۴-۳ نتایج آزمایش فشار حلقه

آزمایش فشار حلقه انجام شده شامل دو بخش است:

(۱) آزمایش فشار انجام شده بر روی محصولات مرکب دو فلزی.

(۲) آزمایش فشار انجام شده بر روی لایه‌ی منیزیمی.

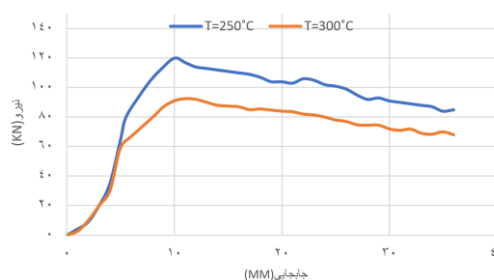
نتیجه آنکه، با ریز شدن دانه‌ها، استحکام محصولات افزایش می‌یابد. برای نمونه‌های دو فلزی نسبت به نمونه‌های قبل از فرآیند با افزایش نسبت اکستروژن از ۲/۵ به ۳/۱ و ۳/۷ در دمای



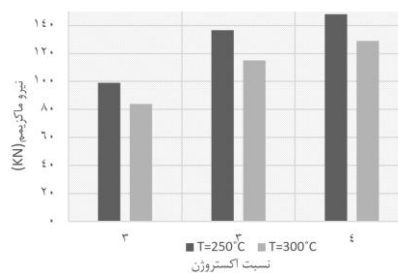
شکل ۵ پ) تصویری واقعی از نمونه‌های دو فلزی اکستروژن شده در شرایط متفاوت آزمایشگاهی.

#### ۴-۱-ب اثر دما

در ۳ نسبت اکستروژن ۲/۵، ۳/۱ و ۳/۷ بررسی گردید. در هر نسبت اکستروژن مقایسه‌ای برای سه سرعت ۱، ۲ و ۴ میلی‌متر بر دقیقه انجام گردید. در هر ۳ نسبت اکستروژن و در تمامی سرعت‌ها، دما از ۳۰۰°C به ۲۵۰°C کاهش یافته و منحنی‌های تنش-کرنش به سوی نیروهای بالاتر منتقل شدند و دیده شد که نیروی کم‌تری جهت انجام آزمایش‌های اکستروژن لوله‌ای منیزیمی-آلومینومی نیاز است. هم‌چنین در تمامی نمودارها مقدار نیرو در دمای ۲۵۰°C با شیب بیشتری افزایش پیدا کرده است و استحکام نمونه کاهش می‌یابد و افت نیروی شکل‌دهی را نیز در پی دارد [36,37]. شکل ۶- الف و ب نشان دهنده این مطلب می‌باشند.



شکل ۶ الف) نمودار نیرو-جابجایی: آزمایش اکستروژن در نسبت اکستروژن ۳/۱ و سرعت ۱mm/min در دماهای متفاوت.

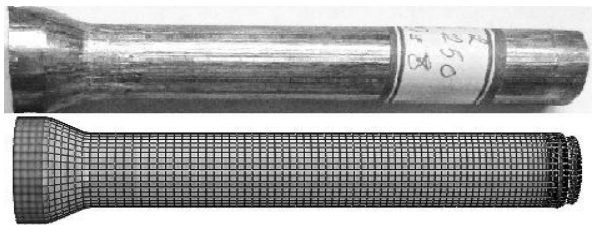


شکل ۶ ب) نمودار اثر دما بر روی حداکثر نیروی شکل‌دهی در نسبت‌های اکستروژن متفاوت و سرعت ۴mm/min

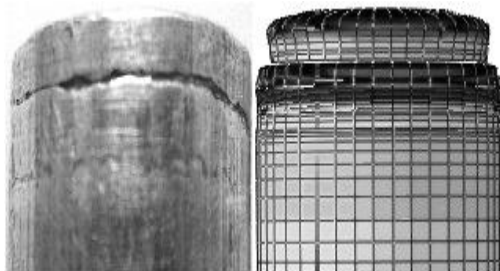
- تشابه محصول اکستروژن شده حاصل از آزمایش و شبیه سازی.
- میزان پیشروی هسته منیزی Al-Mg به نسبت پوسته آلومینیومی.
- نمودارهای تنش- کرنش یا نیرو-جابجایی.

برای بررسی موارد مذکور، برای نسبت اکستروژن ۲/۵، سرعت ۲ میلیمتر بر دقیقه و دمای ۲۵۰°C با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در شکل ۸-الف محصول اکستروژن شده بدست آمده از آزمایش و شبیه سازی در کنار هم مقایسه شده‌اند. در شکل ۸-ب نیز پیشروی هسته منیزی نسبت به پوسته آلومینیومی نشان داده شده است.

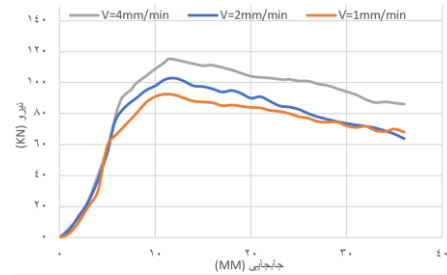
مقایسه نتایج نموداری آزمایشگاهی و شبیه سازی که توسط نرم افزار اورجین مورد بررسی قرار گرفته است در جدول ۲ به همراه شکل ۹ نشان داده شده است. برای آگاهی به میزان اختلاف مابین نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی سه نقطه یکسان برابر  $X1=10$ ،  $X2=20$ ،  $X3=30$  بر روی نمودار Experimental و Simulation در شکل ۹ انتخاب گردید و نتایج به شرح جدول ۲ می‌باشد که با استفاده از فرمول:  $(EXP-SIM)/EXP*100$  درصد خطا% بدست آمده است. همان‌طور که در منحنی و جدول زیرین مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی به یکدیگر بسیار نزدیک می‌باشند که صحت و درستی انجام فرآیند را نشان می‌دهد.



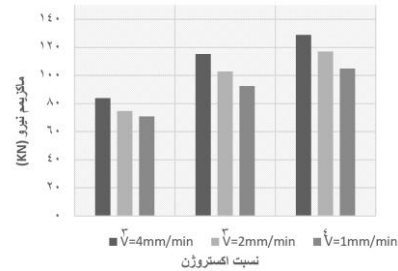
شکل ۸ الف) نمایی از نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده



شکل ۸ ب) نمایی از مقایسه پیشروی هسته منیزی نسبت به پوسته آلومینیومی در نمونه آزمایشگاهی و شبیه سازی



شکل ۷ الف) نمودار نیرو-جابجایی آزمایش اکستروژن در نسبت اکستروژن ۳/۱ و دمای ۳۰۰°C در سرعت‌های متفاوت.



شکل ۷ ب) نمودار اثر سرعت بر روی حداکثر نیروی شکل‌دهی در نسبت‌های اکستروژن متفاوت و دمای ۳۰۰°C.

۲۵۰°C و سرعت ۴ میلی‌متر بر دقیقه، تنش ماکزیمم به ترتیب به اندازه ۵۱، ۶۴ و ۷۷ درصد و هم‌چنین برای نمونه‌های تک فلزی منیزی به مقدار ۲۹، ۳۱ و ۴۳ درصد افزایش یافته است. برای افزایش تنش ماکزیمم، دیده شد که عموماً این افزایش در حالت دو فلزی در مقایسه با حالت تک فلزی منیزی مقدار بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد و استحکام نهایی آلومینیم به نسبت منیزیم بیشتر می‌باشد و از سویی کرنش بیشتری را نسبت به منیزیم تحمل می‌نماید. در نسبت اکستروژن ۳/۷ و در دمای ۳۰۰°C با افزایش سرعت از ۱ به ۲ و ۴ میلی‌متر بر دقیقه میزان افزایش تنش ماکزیمم برای نمونه‌های دو فلزی به نسبت نمونه‌های قبل از فرآیند برابر با مقادیر ۴۵، ۴۹ و ۵۵ درصد و برای نمونه‌های تک فلزی برابر با مقادیر ۲۳، ۳۳ و ۴۰ درصد می‌باشند. با کم شدن دما از ۳۰۰ به ۲۵۰°C و برای مثال در نسبت اکستروژن ۳/۷ و سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه، تنش ماکزیمم حاصل شده از آزمایش فشار حلقه برای نمونه‌های دو فلزی به نسبت نمونه‌های قبل از فرآیند به ترتیب برابر با مقادیر ۵۰ و ۶۴ درصد و برای نمونه‌های تک فلزی منیزی نسبت به حالت ریخته‌گری شده برابر با مقادیر ۳۳ و ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. هم‌چنین افزایش دما موجب کاهش استحکام محصول شده است [41,42].

## ۵- مقایسه نتایج و اعتبارسنجی فرآیند نمونه آزمایشگاهی و شبیه سازی شده

به جهت حصول اطمینان از درستی شبیه سازی انجام گرفته سه نکته مهم مورد توجه قرار گرفت:



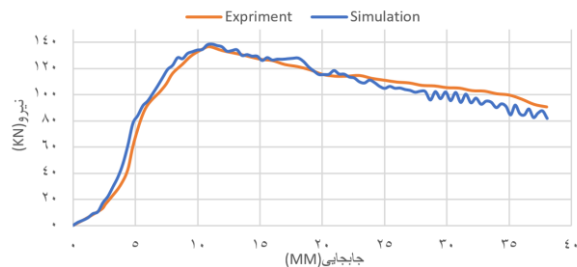
**منابع مالی:** هزینه‌های این پژوهش از بودجه شخصی تأمین شده است.

### منابع

- 1- Bowen DT, Russo IM, Cleaver CJ, Allwood JM, Loukaides EG. From art to part: learning from the traditional smith in developing flexible sheet metal forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022 Jan 1;299:117337.
- 2- Mir A, Luo X, Llavori I, Roy A, Zlatanovic DL, Joshi SN, Goel S. Challenges and issues in continuum modelling of tribology, wear, cutting and other processes involving high-strain rate plastic deformation of metals. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2022 Jun 1;130:105185.
- 3- Bandhavi C, Srinath E, Charan IR, Althaf M, Sai VS. Modelling and validation of sheet metal forming process of brass at elevated temperatures. *Materials Today: Proceedings*. 2022 Jan 1;62:3336-43.
- 4- Chen M, Zhu C, Yu Z, Ma C. A novel process for manufacturing large-diameter thin-walled metal ring: Double-roll pendulum hot rotary forging technology. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022 Apr 1;76:379-96.
- 5- Wang L, Wang Z, Zhang S, Lin Y, Fu M, Sun C. Spiral metal tube multi-roller bending springback prediction model based on dynamic deformation enhancement analysis. *International Journal of Solids and Structures*. 2022 Nov 1;254:111940.
- 6- Aamir M, Giasin K, Tolouei-Rad M, Vafadar A. A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020 Nov 1;9(6):12484-500.
- 7- Kosari A, Tichelaar F, Visser P, Zandbergen H, Terry H, Mol JM. Dealloying-driven local corrosion by intermetallic constituent particles and dispersoids in aerospace aluminium alloys. *Corrosion Science*. 2020 Dec 1;177:108947.
- 8- Jiang Y, Zhang Z, Wang M, Li Y, Cai J, Li Z. Microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Sn-Ca alloy extruded by asymmetric severe shear extrusion with different asymmetric coefficients. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023 Oct 15;960:170884.
- 9- Kim SH, Lee SW, Moon BG, Kim HS, Park SH. Variation in dynamic deformation behavior and resultant yield asymmetry of AZ80 alloy with extrusion temperature. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020 Jun 1;46:225-36.
- 10- Quan GZ, Ku TW, Song WJ, Kang BS. The workability evaluation of wrought AZ80 magnesium alloy in hot compression. *Materials & Design*. 2011 Apr 1;32(4):2462-8.
- 11- SUN HF, LI CJ, Yang XI, FANG WB. Microstructures and mechanical properties of pure magnesium bars by high ratio extrusion and its subsequent annealing treatment. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012 Dec 1;22:s445-9.

**جدول ۲)** درصد خطا نمودار شکل ۹ به ازای مقادیر  $X1=10, X2=20, X3=30$

اختلاف به درصد	شبیه‌سازی	نمونه آزمایشگاهی
۲/۱۸	۱۲۴/۶۰۷۷۰۶۳۸۷۲۲۳	۱۲۱/۹۳۱۵۴۴۳۰۸۲۵۶
۵/۳۴	۱۱۸/۶۳۴۱۳۰۳۱۸۱	۱۱۲/۶۱۲۷۶۵۶۴۰۴۲۴
۳/۸۶	۹۹/۹۴۸۷۸۴۳۷۳۸۸۳۶	۱۰۳/۹۶۳۰۲۷۴۹۲۳۳۴
<b>میانگین تغییرات =</b>		
<b>۳/۷۹</b>		



**شکل ۹)** نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی در نسبت اکستروژن ۳/۱، سرعت ۴mm/min و دمای ۲۵۰°C.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با افزایش دما نیروی کمتری به جهت انجام آزمایش‌های اکستروژن لوله‌ای آلومینیومی-منیزی می‌مورد نیاز است. با کم شدن دما اثر کرنش بیشتر می‌گردد. با افزایش نسبت اکستروژن نیروی بیشتری جهت انجام آزمایش اکستروژن مورد نیاز است. با افزایش سرعت بر میزان تنش سیلان نیز افزوده می‌شود [36-38].

آزمایش استحکام سطح تماس دو لایه نشان داد که با افزایش نسبت اکستروژن، نیروی مورد نیاز برای جدا نمودن پوسته‌ی منیزی از هسته‌ی آلومینیومی کاهش و با افزایش سرعت اکستروژن نیروی مد نظر افزایش می‌یابد. افزایش سرعت موجب افزایش نیروی شکل‌دهی و افزایش دما موجب افزایش استحکام برشی می‌شود [39,40].

آزمایش فشار حلقه نشان داد افزایش نسبت و سرعت اکستروژن موجب افزایش تنش ماکزیمم و کاهش دما باعث افزایش استحکام نهایی محصولات گردید [41,42].

شبیه‌سازی عددی اکستروژن با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و اورجین انجام گردید و نزدیکی بسیار نتایج مابین نمودارهای حاصل از کار تجربی و شبیه‌سازی به یکدیگر صحت و درستی انجام فرآیند شبیه‌سازی را نشان داد.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** این مقاله هیچگونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی ندارد.

- Materials Science and Engineering: A. 2012 Feb 15;535:68-75.
- 25- Li Q, Xu Y, Niu Y, Fan Z, Yu L, Jiang W. Development of Al/Mg bimetal prepared by ultrasonic vibration-assisted compound casting: Effects of interface treatment temperatures. *Materials Science and Engineering: A*. 2024 Jan 1;890:145911.
- 26- Chen J, Zhao Y, Song D, Wang Z, Luo Z, Zhang W. Effects of applied pressure and residual heat quenching on the mechanical and thermal properties of cast Al-Mg-Zn-Mn-Fe alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2024 Feb 1;892:146030.
- 27- Mielnik, E.M. 1991. *Metalworking Science and Engineering*. McGraw-Hill Higher Education.
- 28- Fereshteh-Saniee F, Fatehi-Sichani F. An investigation on determination of flow curves at room temperature and under forming conditions. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006 Jul 3;177(1-3):478-82.
- 29- Ajiboye JS, Adeyemi MB. Effects of die land on the cold extrusion of lead alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006 Feb 1;171(3):428-36.
- 30- Yan T, Pei D, Cheng M, Liang Z, Li X, Wang X. Development of Mg-6Al-4Sn-1Zn alloy sheets with ultra-high strength by combining extrusion and high-speed rolling. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024 Mar 1;29:1487-97.
- 31- Pourahmadi E, Shadmehri F, Ganesan R. Interlaminar shear strength of Carbon/PEEK thermoplastic composite laminate: Effects of in-situ consolidation by automated fiber placement and autoclave re-consolidation. *Composites Part B: Engineering*. 2024 Jan 15;269:111104.
- 32- Fereshteh-Saniee F, Badnava H, Pezeshki-Najafabadi SM. Application of T-shape friction test for AZ31 and AZ80 magnesium alloys at elevated temperatures. *Materials & Design*. 2011 Jun 1;32(6):3221-30.
- 33- Abedini A, Narayanan A, Butcher C. On the flat punch hole expansion test of sheet metals: Mechanics of deformation and evaluation of anisotropic plasticity models. *Mechanics of Materials*. 2024 Apr 1;191:104931.
- 34- Hodźić E, Domitner J, Thum A, Sabet AS, Müllner N, Fragner W, Sommitsch C. Influence of alloy composition and lubrication on the formability of Al-Mg-Si alloy blanks. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023 Jan 6;85:109-21.
- 35- Bharathan B, Iqbal UM. Design and finite element analysis of cold extrusion die to form the hollow shaft. *Materials Today: Proceedings*. 2022 Jan 1;68:1817-24.
- 36- YANG YQ, LI BC, ZHANG ZM. Analysis on flow stress of magnesium alloys during high temperature deformation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2008 Dec 1;18:s180-4.
- 37- Wu HY, Yang JC, Liao JH, Zhu FJ. Dynamic behavior of extruded AZ61 Mg alloy during hot compression. *Materials Science and Engineering: A*. 2012 Feb 15;535:68-75.
- 38- Wu HY, Yang JC, Zhu FJ, Liu HC. Hot deformation characteristics of as-cast and homogenized AZ61 Mg
- 12- Luo AA, Mishra RK, Sachdev AK. High-ductility magnesium-zinc-cerium extrusion alloys. *Scripta Materialia*. 2011 Mar 1;64(5):410-3.
- 13- Lee TH, Lee YJ, Park KT, Nersisyan HH, Jeong HG, Lee JH. Controlling Al/Cu composite diffusion layer during hydrostatic extrusion by using colloidal Ag. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013 Mar 1;213(3):487-94.
- 14- Tong LB, Zheng MY, Cheng LR, Kamado S, Zhang HJ. Effect of extrusion ratio on microstructure, texture and mechanical properties of indirectly extruded Mg-Zn-Ca alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2013 May 1;569:48-53.
- 15- Nie KB, Wang XJ, Xu L, Wu K, Hu XS, Zheng MY. Effect of hot extrusion on microstructures and mechanical properties of SiC nanoparticles reinforced magnesium matrix composite. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012 Jan 25;512(1):355-60.
- 16- Dobkowska A, Adamczyk-Cieślak B, Koralnik M, Chromiński W, Kubasek J, Ciftci J, Kuc D, Mizera J. Corrosion behavior of fine-grained Mg-7.5 Li-3Al-1Zn fabricated by extrusion with a forward-backward rotating die (KoBo). *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022 Mar 1;10(3):811-20.
- 17- Soula A, Couzinié JP, Heni H, Bourgon J, Champion Y, Njah N. Activation volume and the role of solute atoms in Al-Mg-Si alloy processed by equal channel angular extrusion. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022 Apr 5;899:163334.
- 18- Wang Y, Zang A, Wells M, Poole W, Li M, Parson N. Strain localization at longitudinal weld seams during plastic deformation of Al-Mg-Si-Mn-Cr extrusions: The role of microstructure. *Materials Science and Engineering: A*. 2022 Aug 1;849:143454.
- 19- Nishimoto S, Yamasaki M, Kawamura Y. Inherited multimodal microstructure evolution of high-fracture-toughness Mg-Zn-Y-Al alloys during extrusion for the consolidation of rapidly solidified ribbons. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022 Sep 1;10(9):2433-45.
- 20- Shao L, Zhang C, Li C, Tang A, Liu J, Yu Z, Pan F. Mechanistic study of Mg-Mn-Al extrusion alloy with superior ductility and high strength. *Materials Characterization*. 2022 Jan 1;183:111651.
- 21- Kumar NS, Sozhamannan GG. Investigating the effect of mechanical properties of magnesium alloy (AZ91D) reinforced with graphene metal matrix composite by stir casting method. *Materials Today: Proceedings*. 2022 Jan 1;64:95-100.
- 22- Chen Z, Lu R, Zheng S, Tang J, Jiang F, Deng L, Huang L, Teng J. Microstructural characteristics and deformation behaviors of an Al-Mg-Si alloy with improved strength and conductivity processed by continuous casting and expansion extrusion. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023 Jan 1;22:445-60.
- 23- Du HQ, Li F, Gao L, Li C, Chen ZY. Recrystallization behavior and texture evolution on extrusion connection process of Mg/Al alloys thickness-oriented bonding sheet. *Materials Today Communications*. 2022 Dec 1;33:104350.
- 24- Wu HY, Yang JC, Liao JH, Zhu FJ. Dynamic behavior of extruded AZ61 Mg alloy during hot compression.

alloys under compression. *Materials Science and Engineering: A*. 2012 Jul 30;550:273-8.

39- He P, Feng JC, Zhang BG, Qian YY. Microstructure and strength of diffusion-bonded joints of TiAl base alloy to steel. *Materials Characterization*. 2002 Jul 1;48(5):401-6.

40- Lee TH, Lee YJ, Park KT, Nersisyan HH, Jeong HG, Lee JH. Controlling Al/Cu composite diffusion layer during hydrostatic extrusion by using colloidal Ag. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013 Mar 1;213(3):487-94.

41- Berbon PB, Furukawa M, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. Influence of pressing speed on microstructural development in equal-channel angular pressing. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1999 Aug;30:1989-97.

42- Yamashita A, Yamaguchi D, Horita Z, Langdon TG. Influence of pressing temperature on microstructural development in equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*. 2000 Jul 15;287(1):100-6.