

بررسی تاثیر کاهش سطح مقطع و زاویه پیچش در توزیع کرنش، آسیب و نیروی فرآیندی در قالب اکستروژن گردابی

رنجبری گوهر^۱، دنیوی علی^{۲*}، شهباز مهرداد^۳

(تاریخ دریافت: 1399/10/21، ش ص: 106-95، تاریخ پذیرش: 1400/02/15)

چکیده

اکستروژن گردابی یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید است که اعمال همزمان کاهش سطح مقطع و پیچش حول محور طولی قطعه کار، در داخل قالب همگرای ثابت منجر به تجمع مقادیر بالایی از کرنش در نمونه می‌شود. با توجه به قابلیت های فراوان این فرآیند از قبیل ایجاد کرنش بالا در یک پاس، سادگی و عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و یکنواختی نسبی توزیع کرنش، در این کار تحقیقی اثر همزمان کاهش سطح مقطع، زاویه پیچش و منحنی شیار بر روی کرنش موثر میانگین، فاکتور آسیب بیشینه و نیروی حالت پایدار فرآیندی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهند مقدار کرنش موثر میانگین با افزایش مقادیر کاهش سطح مقطع و زاویه پیچش افزایش یافته و برهم کنش معناداری میان فاکتورهای مذکور وجود دارد. بیشترین مقدار فاکتور آسیب در سطح قطعه کار مشاهده می‌شود که با توجه به مقادیر تنش میانگین مثبت در این نقاط می‌توان گفت ترکهای به وجود آمده احتمالی، در اثر تنش کششی انتشار خواهند یافت. کاهش سطح مقطع و زاویه پیچش از فاکتورهای تاثیر گذار بر نیروی حالت پایدار فرآیندی بوده و منحنی شیار تاثیر چندانی بر آن ندارد. بیشترین مقدار فاکتور آسیب در قالبی با دندانهای منحنی با کاهش سطح مقطع 30٪ و زاویه پیچش 30 درجه مشاهده می‌شود.

کلیدواژگان: اکستروژن گردابی، کرنش موثر میانگین، زاویه پیچش، منحنی شیار، آسیب

¹ دکتری تخصصی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

² دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

³ استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

نویسنده مسوول: m.shahbaz@urmia.ac.ir

1- مقدمه

و اکستروژن مستقیم مارپیچ با تقارن محوری تبدیل می-شود.

اکستروژن گردابی یکی از روشهای جدید تغییر شکل پلاستیک شدید است که برای اعمال کرنش پیچشی هم زمان با اکستروژن، توسط شهپاز و همکاران [6] طراحی و سپس ویژگیهای تغییر شکل پلاستیک در این فرآیند توسط تحلیل اجزا محدود بررسی شده است. در تحلیل ایشان نیروی فرآیندی، کرنش و الگوی سیلان ماده در زوایای مختلف پیچش مطالعه شده است. نتایج کار این تحقیق نشان می دهد که پس از این فرآیند می توان به مقادیر بالای کرنش با توزیع یکنواخت دست یافت. شهپاز و همکاران [7] در تحقیق دیگری به مطالعه تجربی و تحلیل اجزا محدود رفتار تغییر شکل ماده در فرآیند اکستروژن گردابی آلیاژ آلومنیوم AA1050 و مقایسه آن با اکستروژن معمولی پرداخته اند. نتایج به دست آمده از آزمون های تجربی، تحلیل اجزاء محدود و پلاستیسیته رویتی وجود یک حالت تغییر شکل اضافی (پیچشی) را در اکستروژن گردابی نشان می دهد که با حرکت به سمت نقاط مرکزی در مقطع عرضی کاهش می یابد. این امر به عواملی از قبیل پارامترهای هندسی قالب، مانند تعداد و شکل دندانه ها، زاویه پیچش، پارامترهای فرآیندی همانند فاکتور اصطکاک وابسته است. نمونه های حاصل از اکستروژن گردابی به علت اختلاف شدید سرعت مواد در سطح و مرکز، در جهت اکستروژن تغییر شکل شدیدی پیدا می کنند. بررسی بخش های انتهایی محصولات اکستروژن گردابی و معمولی نشان می دهد، جریان گردابی منجر به افزایش اختلاف سرعت مواد در سطح و مرکز می شود. مقدار بیشتر کرنش در اکستروژن گردابی مربوط به تغییر شکل پیچشی ماده می باشد که منجر به افزایش نیروی فرآیندی می شود. علاوه بر این، افزایش سطح تماس در اکستروژن گردابی نسبت به اکستروژن معمولی منجر به افزایش بیشتر نیرو می شود. در مقایسه با اکستروژن معمولی، محصولات حاصل از اکستروژن گردابی دارای اندازه دانه کوچکتر و شدت تغییر شکل بیشتری هستند [7]. در تحقیق دیگری شهپاز و همکاران [8] به طراحی قالب و بررسی سیلان ماده در فرآیند اکستروژن گردابی پرداخته اند. در این تحقیق ابتدا بر اساس خطوط لغزش مبتنی بر روش بزیر به مدلسازی ریاضی سیلان ماده پرداخته شده و سپس

مواد با ساختار فوق ریزدانه یا به عبارت دیگر با اندازه دانه کوچکتر از $1 \mu\text{m}$ نسبت به مواد درشت دانه، خواص مکانیکی بسیار بهتری نشان می دهند. با توجه به نیاز روزافزون صنایع امروزی به مواد با تافنس و استحکام بالا، لزوم استفاده از روشهای تغییر شکل پلاستیک جدید برای برآوردن تقاضای مذکور، ضروری به نظر می رسد. تا به حال انواع مختلفی از روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید بر پایه پیچش از جمله: پیچش تحت فشار بالا¹ [1]، اکستروژن چرخشی² [2]، اکستروژن همراه با پیچش سیکلی³ [3]، اکستروژن مستقیم مارپیچ با تقارن محوری⁴ [4] و اکستروژن پیچشی⁵ [5] معرفی و بررسی شده است. با توجه به مزایا و محدودیت های هر کدام از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید از لحاظ کاربردی بودن در مقیاس صنعتی، هزینه ساخت قالب، نو بودن، فرآیند اکستروژن گردابی⁶ به عنوان فرآیند مورد مطالعه در این کار تحقیقی انتخاب شده است. از طرف دیگر با توجه به کاربردهای وسیع آلیاژهای آلومینیوم در صنایع مختلف، آلیاژ آلومینیوم AA1050 به عنوان ماده هدف برای آزمایش در فرآیند اکستروژن گردابی انتخاب شده است. مطابق شکل 1 قالب اکستروژن گردابی از سه ناحیه تشکیل شده است: 1- ناحیه انتقال اول 2- ناحیه پیچش 3- ناحیه انتقال دوم. در ناحیه انتقال اول سطح مقطع قطعه کار از حالت گرد به تدریج به شکل دندانه دار تبدیل می شود. در ناحیه دوم، کاهش سطح مقطع همزمان با پیچش قطعه کار حول محور طولی اش، انجام می شود. در ناحیه سوم سطح مقطع دندانه دار دوباره به شکل گرد تبدیل می شود [6]. مقدار پیچش دندانه ها با زاویه پیچش⁷ (ϕ) و مقدار کاهش سطح مقطع⁸ با (RA) نشان داده می شود. بنابراین می توان گفت یک قالب اکستروژن گردابی با زاویه پیچش صفر درجه و کاهش سطح مقطع صفر به ترتیب به قالب اکستروژن معمولی⁹

¹ High pressure torsion (HPT)

² Torsion extrusion

³ Extrusion with cyclic torsion

⁴ Axi-symmetric forward spiral extrusion (AFSE)

⁵ Twist extrusion

⁶ Vortex extrusion

⁷ Twist angle

⁸ Reduction in area

⁹ Conventional extrusion

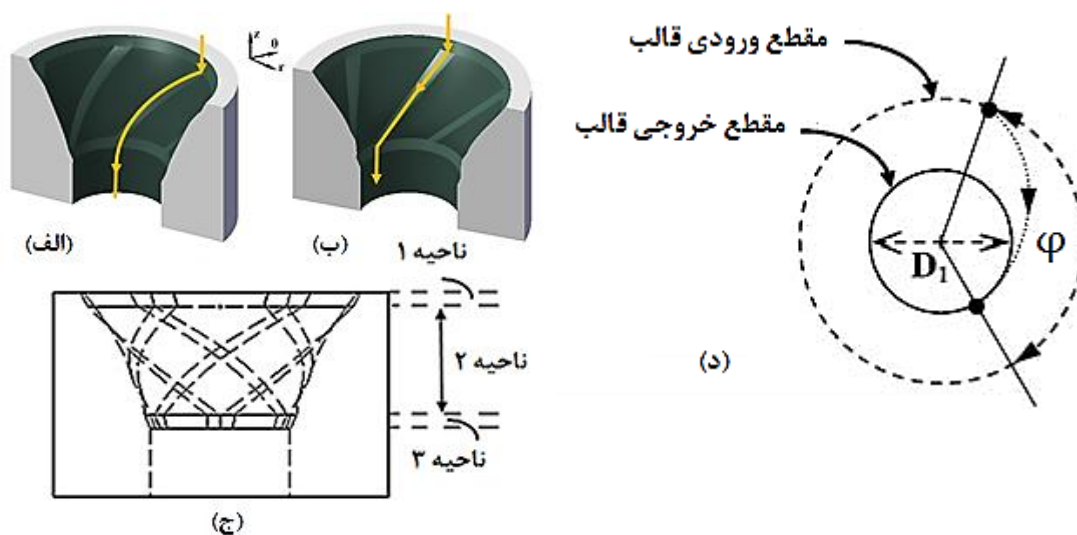
AA1050 می‌باشند. علاوه بر پارامترهای مذکور برهمکنش دو فاکتور زاویه پیچش و کاهش سطح مقطع در حالت اصطکاکی پارامتر تاثیرگذار دیگری بر پیچش موثر می‌باشد [11]. مطالعه پارامترهای هندسی و فاکتور اصطکاک در اکستروژن گردابی با مقطع مربعی نشان می‌دهد هندسه قالب در اعمال کرنش پیچشی بر نمونه نقش اساسی دارد درحالیکه فاکتور اصطکاک تاثیر معنا داری بر پیچش اضافی نمونه ندارد ولی شدت اختلاف سرعت بین لایه های سطحی و مرکزی نمونه را افزایش می‌دهد [12]. در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، به علت اعمال مقادیر بالای کرنش احتمال وقوع آسیب افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه کاهش سطح مقطع و زاویه پیچش، دو پارامتر اساسی در فرایند اکستروژن گردابی می‌باشند بنابراین بررسی تاثیر آنها بر متغیرهای توزیع کرنش موثر، نیروی فرآیندی و فاکتور آسیب با درک صحیح و عمیق پارامترهای فرآیندی و هندسی، ضروری و قابل کنترل است. از آنجائیکه در تحقیقات قبلی به این موضوع پرداخته نشده است، بنابراین در این کار تحقیقی برای بررسی اثر متغیرهای ورودی از قبیل زاویه پیچش، کاهش سطح مقطع و منحنی شیار، بر روی پارامترهای خروجی فرآیند اکستروژن گردابی از جمله: توزیع کرنش موثر، فاکتور آسیب بیشینه و نیروی حالت پایدار فرآیندی، طراحی آزمایشهایی به صورت فاکتور کامل مطابق جدول 1 انجام شده است. مطابق جدول مذکور، پارامترهای ورودی، زاویه پیچش (30° ، 60° ، 90°)، کاهش سطح مقطع ($0/3$ ، $0/75$) و منحنی شیار (خطی، منحنی) با فاکتور اصطکاک $m=0/1$ در نظر گرفته شده است. پس از طراحی آزمایش مذکور، ابتدا برای هر آزمایش، مختصات دندانه های قالب مربوطه با استفاده از معادله بزیر¹ استخراج و در نرم افزار کتیا² طراحی شده است. برای شبیه سازی فرآیند از نرم افزار دیفرم استفاده شده و مقادیر متغیرهای پاسخ پس از اجرای شبیه سازی، استخراج و در جدول 1 وارد شده است. برای ارزیابی نتایج حاصل از شبیه سازی با استفاده از قالب موجود آزمایش تجربی انجام و نمودار نیرو-جابجایی حاصل از شبیه سازی و آزمایش تجربی، مقایسه شده است.

مقطع، طول ناحیه پیچش در هر دو حالت اصطکاکی ($m=0/1$ و $m=0$) پارامترهای تاثیر گذار بر پیچش موثر

طراحی قالب را بر اساس مدل پیشنهادی انجام داده‌اند و در نهایت بر اساس میدان سرعت قابل قبول و تئوری کران بالا، نیروی فرآیندی را پیش بینی نموده‌اند. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که مدل ریاضی پیشنهادی قابلیت پیش بینی سیلان ماده، توزیع کرنش و نیروی فرآیندی را دارا می‌باشد. علاوه بر این کاهش طول ناحیه پیچش و افزایش فاکتور ثابت اصطکاک منجر به افزایش پیچش مواد و نیروی فرآیندی می‌شود. همانگونه که قبلاً اشاره شد، اکستروژن گردابی بعنوان یک روش تغییرشکل پلاستیک شدید دسته بندی می‌شود که برپایه اثر همزمان کرنشهای پلاستیک شدید و مقادیر بالای فشار هیدروستاتیک استوار است. اعمال چنین مقادیر بالای فشار لازمه تعیین روشی برای تحقیق و پیش بینی نیروی فرآیند تحت شرایط مطرح در این روش است. برای این منظور، شهباز و همکاران [9] با بهره گیری از تئوری کران بالایی برپایه میدان سرعت قابل قبول بدست آمده از فرمولاسیون بزیر، فشار نسبی فرآیند اکستروژن گردابی را بررسی و پیش‌بینی نموده‌اند. تاثیر کاهش سطح مقطع، طول نسبی، زاویه پیچش و فاکتور ثابت اصطکاک بر عبارتهای اتلاف انرژی مطرح در تئوری کران بالایی بررسی شده و نشان داده شده است که با افزایش زاویه پیچش، کاهش سطح مقطع و فاکتور ثابت اصطکاک، فشار نسبی افزایش می‌یابد. بگونه ای که نرخ این افزایش تحت تاثیر زاویه پیچش است. همچنین نشان داده شده است که تاثیر طول نسبی بر فشار نسبی فرآیند در شرایط مختلف اصطکاکی متفاوت است [9]. یک مطالعه ترکیبی بر اساس شبیه سازی اجزا محدود و روش سطح پاسخ بر روی اکستروژن گردابی آلیاژ Al-Mg-Si نشان می‌دهد افزایش زاویه پیچش، غیریکنواختی کرنش موثر را افزایش می‌دهد همچنین زاویه پیچش، کاهش سطح مقطع و برهمکنش این دو پارامتر به عنوان پارامترهای تاثیرگذار در غیریکنواختی توزیع کرنش مطرح می‌باشد. علاوه بر پارامترهای مذکور، برهمکنش زاویه پیچش و کاهش سطح مقطع با خودشان نیز فاکتورهای موثر بر نیروی فرآیندی اکستروژن گردابی می‌باشند [10]. تحقیق دیگری نشان می‌دهد فاکتورهای زاویه پیچش، کاهش سطح مقطع، طول ناحیه پیچش در هر دو حالت اصطکاکی ($m=0/1$ و $m=0$) پارامترهای تاثیر گذار بر پیچش موثر در فرآیند اکستروژن گردابی آلیاژ

کاهش سطح مقطع و منحنی شیار، بر روی پارامترهای خروجی فرآیند اکستروژن گردابی از جمله: توزیع کرنش موثر، فاکتور آسیب بیشینه و نیروی حالت پایدار فرآیندی، طراحی آزمایشهایی به صورت فاکتور کامل مطابق جدول 1 انجام شده است. مطابق جدول مذکور، پارامترهای ورودی، زاویه پیچش (30° ، 60° ، 90°)، کاهش سطح مقطع (0/3، 0/75) و منحنی شیار (خطی، منحنی) با فاکتور اصطکاک $m=0/1$ در نظر گرفته شده است. پس از طراحی آزمایش مذکور، ابتدا برای هر آزمایش، مختصات دندانه های قالب مربوطه با استفاده از معادله بیزیر¹ استخراج و در نرم افزار کتیا² طراحی شده است. برای شبیه سازی فرآیند از نرم افزار دیفرم استفاده شده و مقادیر متغیرهای پاسخ پس از اجرای شبیه سازی، استخراج و در جدول 1 وارد شده است. برای ارزیابی نتایج حاصل از شبیه سازی با استفاده از قالب موجود آزمایش تجربی انجام و نمودار نیرو-جابجایی حاصل از شبیه سازی و آزمایش تجربی، مقایسه شده است.

در فرآیند اکستروژن گردابی آلیاژ AA1050 می باشند. علاوه بر پارامترهای مذکور برهمکنش دو فاکتور زاویه پیچش و کاهش سطح مقطع در حالت اصطکاکی پارامتر تاثیرگذار دیگری بر پیچش موثر می باشد [11]. مطالعه پارامترهای هندسی و فاکتور اصطکاک در اکستروژن گردابی با مقطع مربعی نشان می دهد هندسه قالب در اعمال کرنش پیچشی بر نمونه نقش اساسی دارد درحالیکه فاکتور اصطکاک تاثیر معناداری بر پیچش اضافی نمونه ندارد ولی شدت اختلاف سرعت بین لایه های سطحی و مرکزی نمونه را افزایش می دهد [12]. در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، به علت اعمال مقادیر بالای کرنش احتمال وقوع آسیب افزایش می یابد. با توجه به اینکه کاهش سطح مقطع و زاویه پیچش، دو پارامتر اساسی در فرآیند اکستروژن گردابی میباشند بنابراین بررسی تاثیر آنها بر متغیرهای توزیع کرنش موثر، نیروی فرآیندی و فاکتور آسیب با درک صحیح و عمیق پارامترهای فرآیندی و هندسی، ضروری و قابل کنترل است. از آنجائیکه در تحقیقات قبلی به این موضوع پرداخته نشده است، بنابراین در این کار تحقیقی برای بررسی اثر متغیرهای ورودی از قبیل زاویه پیچش،



شکل 1- شکل شماتیکی قالب اکستروژن گردابی با دندانه های منحنی (الف) و خطی (ب)، نمای روبه رو (ج) زاویه پیچش (φ) (د).

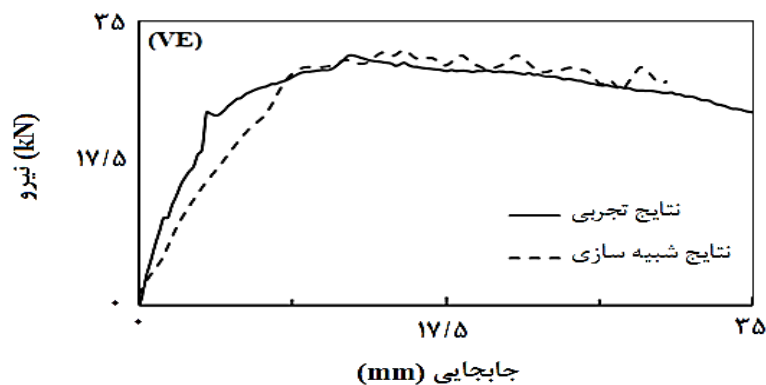
¹ Bezier formulation
² Catia V5R21

2- شبیه سازی اجزا محدود

مرزی انحنای دار می‌شود. انتصاب مش ریزتر را می‌توان برای نقاطی که گرادیان حرارتی و نرخ کرنش بالاتری دارند نیز اعمال نمود. در این فرآیند سنبه به عنوان یک جسم صلب استوانه‌ای شکل به قطر 20mm و ارتفاع 2 mm، نمونه آلومینیومی را با سرعت 0/2 mm/s از داخل قالب پایینی، اکستروژن می‌کند. یک نگهدارنده استوانه‌ای شکل توخالی به ترتیب با قطرهای داخلی و خارجی 20mm، 24mm و ارتفاع 42mm در اطراف سنبه و نمونه آلومینیومی طراحی شده است. تمام شبیه سازی‌ها در دمای محیط و با ضریب اصطکاک $m=0/1$ (معادل $\mu=0/047$) [13]، انجام شده است.

برای ارزیابی نتایج شبیه سازی‌ها با استفاده از قالب موجود، ابتدا استوانه‌هایی به قطر 20mm و ارتفاع 40mm از آلیاژ آلومینیم AA1050 ماشینکاری شد و در دما 600°C به مدت 2 ساعت آنیل و سپس در کوره تا دمای محیط سرد شدند. برای کاهش اصطکاک در سطوح تماس قالب و قطعه کار از نوار تفلون استفاده شده است. قالب اکستروژن گردابی بر اساس منحنی شیاری مبتنی بر معادله بزییر، طراحی و برای اکستروژن نمونه اولیه تا رسیدن به قطر 15 mm با طول ناحیه پیچش 8 mm و زاویه پیچش 60° مورد استفاده قرار گرفت. کلیه فرآیندهای اکستروژن گردابی در دمای محیط انجام شده است. شکل 2 نشان می‌دهد نتایج نمودار تجربی نیرو-جابجایی با دقت بالایی با نمودار شبیه سازی در تطابق است.

همانگونه که اشاره شد، برای شبیه سازی فرآیند اکستروژن گردابی، ابتدا دندان‌های موجود در حفره قالب بر اساس خطوط لغزش مبتنی بر فرمول بزییر برای تمام آزمایش‌های موجود در جدول 1، طراحی و در نرم افزار دیفرم¹ مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه اولیه به صورت استوانه‌ای شکل به قطر 20mm و ارتفاع 40mm و با خاصیت پلاستیک در نظر گرفته شده است. بر اساس معیار همگرایی مش، تعداد 55000 مش هرمی شکل بر روی نمونه اعمال و برای حذف اعوجاج بیشتر مش، از روش مش بندی دوباره خودکار استفاده شده است. علت انتخاب المان هرمی² پوشش بهتر شکل‌های پیچیده می‌باشد. در نمونه‌های پلاستیک یا متخلخل که تغییر شکل وسیعی در آنها اتفاق می‌افتد ممکن است المانها به قدری اعوجاج پیدا کنند که به علت ژاکوبین³ منفی دیگر قابل استفاده نباشند. در این حالت باید مش بندی دوباره انجام شود و از متغیرهای میدانی مثل دما، آسیب، کرنش و سرعت درونیابی انجام می‌شود. مش بندی دوباره به صورت نسبی یا مطلق انجام می‌شود. در این کار تحقیقی از روش نسبی استفاده شده است. روش مش بندی دوباره به دو صورت موضعی و کلی است در روش موضعی تولید مش تقویت شده و اندازه و کیفیت المان قابل کنترل و خطای درونیابی کمتر است. انحنای مرزها برابر 1 انتخاب شده است زیرا مقدار بزرگتر از صفر برای این پارامتر منجر به اعمال دانسیته مش بیشتر، در نواحی



شکل 2- مقایسه نمودار نیرو جابجایی در فرآیند اکستروژن گردابی با نتایج به دست آمده از شبیه سازی و آزمایش تجربی با $\phi=60^{\circ}$ ، $m=0/1$ ، $RA=0/3$ ، $L=8\text{ mm}$ [11].

¹ Deform V11

² Tetrahedral elements

³ Jacobian

3- نتایج و بحث

3-1- کرنش موثر

نتایج جدول 1 نشان می‌دهد بیشترین مقادیر مربوط به کرنش موثر میانگین، در حالت خطی و کاهش سطح مقطع 0/75 مشاهده می‌شود. با مقایسه نتایج حاصل از جدول 1 میتوان مشاهده نمود زاویه پیچش و کاهش سطح مقطع تاثیرگذارترین پارامترها در فرآیند اکستروژن گردابی می‌باشند. منحنی شیار نیز بعد از فاکتورهای مذکور از پارامترهای تاثیرگذار بر کرنش موثر میانگین محسوب می‌شود. در شرایط اصطکاکی، نیروی اصطکاک در جهت مخالف سیلان، ماده را وادار به پیروی از مسیر دنداندار می‌کند. بنابراین کرنش موثر در سطح نمونه افزایش می‌یابد. در عین حال کاهش بیشتر در سطح مقطع، اختلاف سرعت عناصر سطح و مرکز ماده را افزایش می‌دهد که این امر منجر به افزایش کرنش موثر در نمونه می‌شود. به طور کلی با افزایش مقدار کاهش سطح مقطع، نیروی فرآیندی افزایش می‌یابد که این امر نیز منجر به افزایش کرنش موثر میانگین می‌شود. در شرایط اصطکاکی، پیچش ماده بیشتر بوده و در کاهش سطح مقطع های کمتر، اختلاف سرعت بین عناصر سطح و مرکز نمونه، کمتر است. به طور کلی در حالت منحنی به علت طولانی شدن مسیر حرکت ماده می‌بایست کرنش موثر نسبت به حالت خطی بیشتر می‌شد اما به علت عدم پیروی ماده از دندانهای قالب در حالت منحنی، مقدار کرنش پلاستیک میانگین در حالت خطی بیشتر از حالت

منحنی است. برای بررسی تاثیر برهمکنش زاویه پیچش و کاهش سطح مقطع می‌توان شکلهای 3 و 4 را ملاحظه نمود. شکل 3 نشان می‌دهد:

با افزایش مقدار کاهش سطح مقطع در هر دو حالت خطی و منحنی، مقدار کرنش موثر متوسط افزایش می‌یابد.

آهنگ افزایش کرنش موثر با افزایش زاویه پیچش در هر دو حالت خطی و منحنی کاهش می‌یابد.

به علت عدم توازی خطوط می‌توان برهم‌کنش میان زاویه پیچش و کاهش سطح مقطع را نتیجه گفت.

شکل 4 نشان می‌دهد:

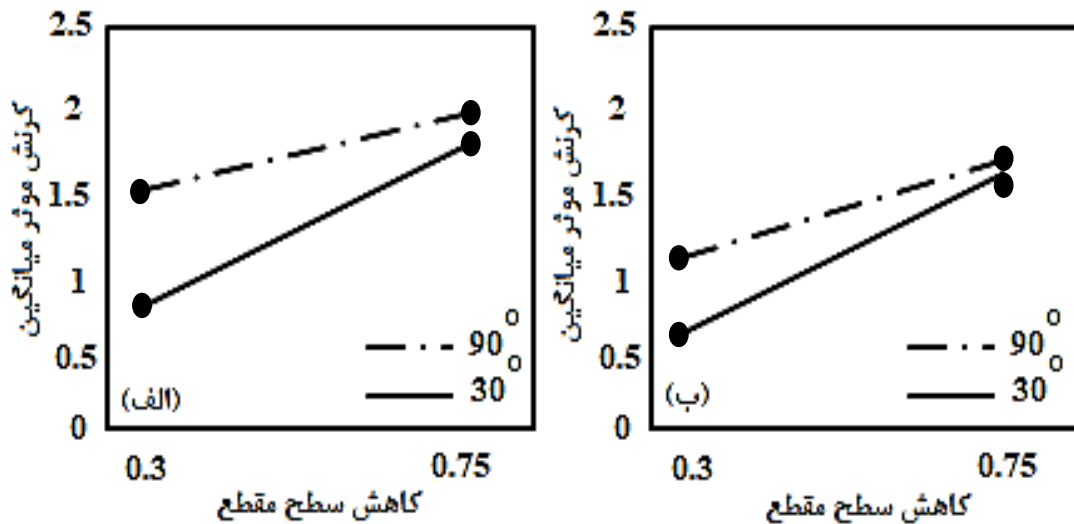
در هر دو حالت خطی و منحنی، شیب افزایش کرنش موثر در کاهش سطح مقطع های کمتر، بیشتر است و با افزایش مقدار کاهش سطح مقطع در حالت خطی با شیب ملایمی افزایش یافته و در حالت منحنی تقریباً ثابت می‌ماند.

در این شکل نیز عدم توازی خطوط حاکی از وجود برهمکنش میان زاویه پیچش و کاهش سطح مقطع می‌باشد.

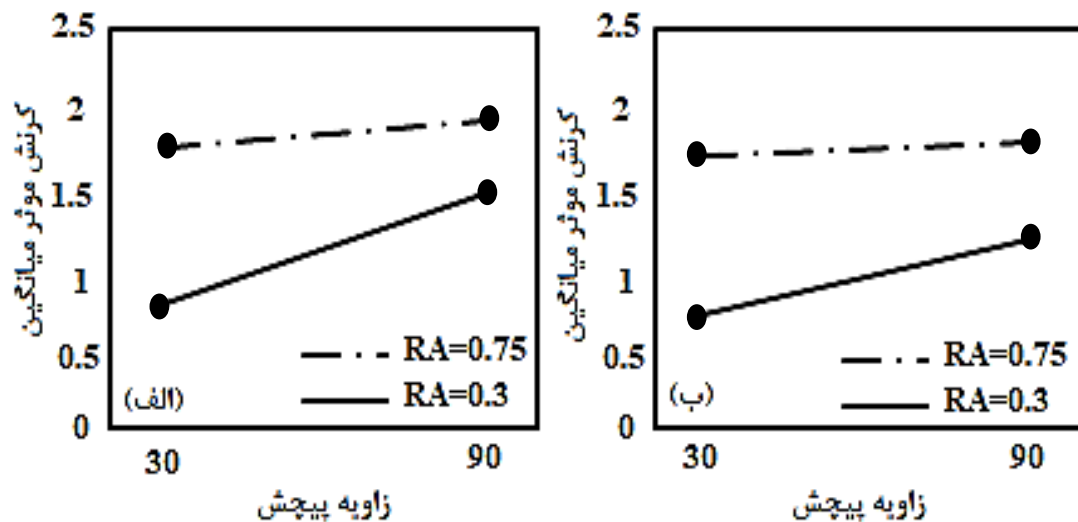
جدول 1- پارامترهای ورودی و متغیرهای پاسخ در فرآیند اکستروژن گردابی AA1050.

اجرا	زاویه پیچش (درجه)	کاهش سطح	انحنا	کرنش موثر	آسیب	نیرو (نیوتن)
1	30	0/3	خطی	0/7641	0/5185	23757
2	30	0/75	خطی	1/7682	0/2644	56400
3	30	0/3	منحنی	0/6716	0/3907	24195
4	30	0/75	منحنی	1/6830	0/0821	54866
5	60	0/3	خطی	0/9044	0/1552	27960
6	60	0/75	خطی	1/9119	0/4183	62289
7	60	0/3	منحنی	0/9063	0/2128	30000
8	60	0/75	منحنی	1/7049	0/4746	58391

9	90	0/3	خطی	1/4859	0/2458	44500
10	90	0/75	خطی	1/9569	0/1113	63082
11	90	0/3	منحنی	1/1483	0/2948	31312
12	90	0/75	منحنی	1/7537	0/1759	63834



شکل 3- تاثیر کاهش سطح مقطع بر میانگین کرنش موثر در زوایای مختلف در دو حالت خطی (الف)، منحنی (ب).



شکل 4- تاثیر زاویه پیچش بر میانگین کرنش موثر در کاهش سطح مقطع های مختلف در دو حالت خطی (الف)، منحنی (ب).

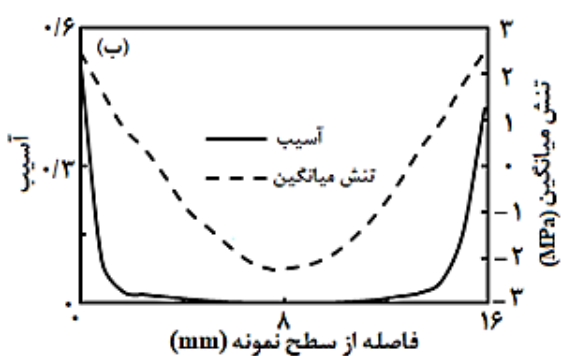
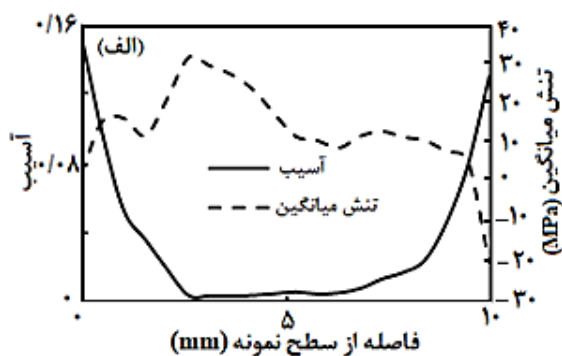
مختلفی برای بیان قابلیت کارکرد قطعه کار حین تغییر شکل پلاستیک معرفی شده است [14]. معیار کرافت-لاتام¹ که بر اساس فرمول 1 [15] بیان می‌شود، به علت

2-3- تجمع آسیب

در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید به علت مقادیر بسیار زیاد تغییر شکل پلاستیک و بارگذاریهای شدید، احتمال رخ دادن شکست بالاست. بنابراین پیش بینی شکست توسط آنالیز المان محدود، چالش اصلی در طراحی اجزای مکانیکی می باشد. تا کنون معیارهای

¹ Craft-Latham

نشان می‌دهد. مطابق شکل در حالت الف (آزمایش 4 مطابق با جدول 1)، بیشترین مقدار فاکتور آسیب در سطح نمونه مشاهده می‌شود. بنابراین ترکها ممکن است از المانهای نزدیک به سطح شروع شوند اما با توجه به مقادیر منفی تنش میانگین (فشاری) در این ناحیه، از انتشار آنها ممانعت به عمل می‌آید. در حالت ب (آزمایش 1 مطابق با جدول 1) نیز بیشترین مقدار فاکتور آسیب در سطح قطعه کار مشاهده می‌شود که در این نقاط تنش میانگین، مثبت می‌باشد. بنابراین ترکهای به‌وجود آمده احتمالی، در اثر تنش کششی انتشار خواهند یافت. شکل 6 تغییرات فاکتور آسیب بیشینه را با تغییرات زاویه پیچش، منحنی شیار و کاهش سطح مقطع نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود روند تغییرات، دوبه‌دو مشابه هستند. با افزایش سطح مقطع به $RA=0/75$ فاکتور آسیب در قالبهایی با زاویه پیچش 60° بیشترین مقدار و با کاهش سطح مقطع به $RA=0/3$ کمترین مقدار است. علاوه بر این می‌توان نتیجه گرفت، تاثیر منحنی شیار بر روی فاکتور آسیب بیشینه در زوایای کوچکتر (30°) مشهودتر است. به طور کلی عامل تعیین کننده روند تغییرات فاکتور آسیب بیشینه، تغییرات کاهش سطح مقطع می‌باشد.



شکل 5- تغییرات فاکتور آسیب و تنش میانگین در طول قطر نمونه، آزمایش 4 (الف)، آزمایش 1 (ب).

خروج نمونه از ناحیه پیچش مربوط می‌شود. اعداد موجود در جدول 1 مقادیر حالت پایدار نیرو را نشان می‌دهند. با توجه به شکل 7 می‌توان دریافت تاثیر کاهش سطح مقطع در مقدار نیروی حالت پایدار فرآیندی بیشتر از زاویه پیچش می‌باشد. تاثیر افزایش زاویه در حالت

سادگی و دقت بالا، به طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است:

$$C = \int_0^{\varepsilon_f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\varepsilon \quad (1)$$

که در این معادله، σ_m تنش بیشینه اصلی، $\bar{\sigma}$ کرنش پلاستیکی موثر و $\bar{\sigma}$ تنش موثر می‌باشد. طبق این معیار، ترک زمانی اتفاق می‌افتد که فاکتور آسیب به مقدار بحرانی برسد [15]. با استفاده از معیار مذکور میتوان به پیش بینی ترکهای به وجود آمده در فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید پرداخت [16].

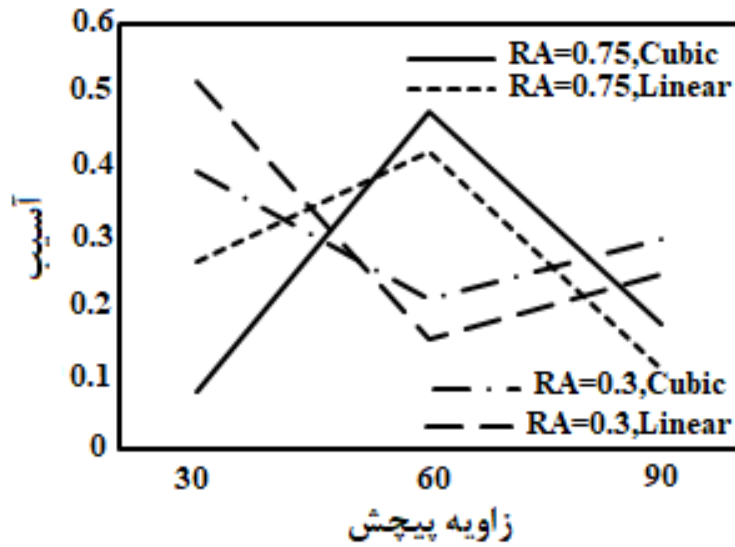
با توجه به جدول 1 می‌توان نتیجه گرفت که کمترین و بیشترین مقدار فاکتور آسیب به ترتیب مربوط به قالبی با مشخصات هندسی $RA=0/75$ ، $\varphi=30^\circ$ به شکل منحنی و $RA=0/3$ ، $\varphi=30^\circ$ به شکل خطی می‌باشد. با توجه به مقادیر کرنش موثر میانگین در این آزمایش‌ها، میتوان نتیجه گرفت تجمع آسیب و شروع ترک به عامل دیگری نیز وابسته است. بررسی نمودار تنش میانگین نشان می‌دهد فاکتور آسیب به توزیع تنش میانگین در قطعه کار بستگی دارد. شکل 5 تغییرات فاکتور آسیب کرافت لاتام و تنش میانگین را در دو آزمایش مذکور (4 و 1) در طول قطر نمونه حاصل از اکستروژن گردابی

3-3- نیروی فرآیندی

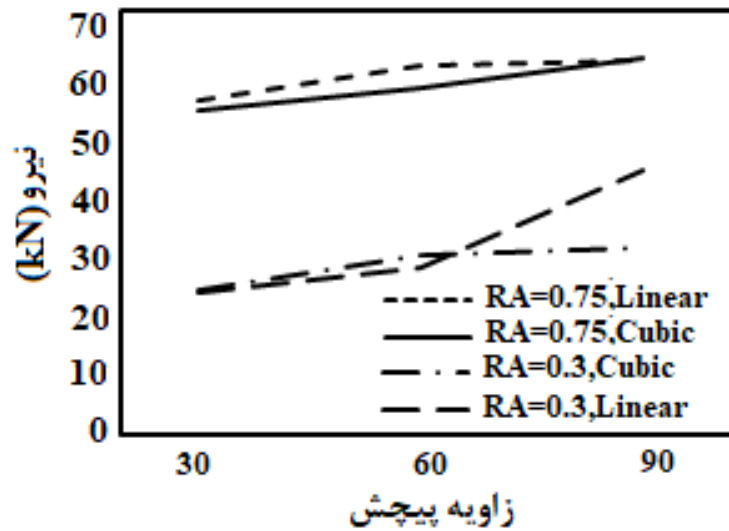
با توجه به شکل 2 نمودار نیرو-جابجایی در فرآیند اکستروژن گردابی از دو قسمت شیب‌دار و حالت پایدار تشکیل شده است. قسمت اول به نیروی فرآیندی هنگام ورود نمونه به ناحیه پیچش قالب و قسمت دوم به لحظه

پایینی میتوان نتیجه گرفت منحنی شیار تاثیر چندانی بر مقادیر نیروی حالت پایدار فرایندی نداشته است.

خطی با کاهش سطح مقطع $RA=0/3$ بیشتر از سایر حالتها می باشد. با توجه به نزدیکی خطوط بالایی و



شکل 6- تغییرات فاکتور آسیب بیشینه با زاویه پیچش، منحنی شیار و کاهش سطح مقطع.



شکل 7- تغییرات نیروی حالت پایدار فرآیندی با زاویه پیچش، منحنی شیار و کاهش سطح مقطع.

4- نتیجه گیری

در این کار تحقیقی تاثیر کاهش سطح مقطع و زاویه پیچش در قالب اکستروژن گردابی با دندان‌های خطی و منحنی بر روی آلیاژ آلومینیم AA1050 بررسی شده است. متغیرهای پاسخ در این مطالعه، کرنش موثر میانگین، آسیب و نیروی پایدار فرآیندی بوده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد:

1- افزایش مقادیر کاهش سطح مقطع و زاویه پیچش منجر به افزایش کرنش موثر میانگین می‌شود ولی آهنگ افزایش کرنش موثر با افزایش زاویه پیچش در هر دو حالت خطی و منحنی کاهش می‌یابد همچنین شیب افزایش کرنش موثر در کاهش سطح مقطع‌های کمتر، بیشتر است.

[7] M. Shahbaz, N. Pardis, J. G. Kim, R. Ebrahimi, H. S. Kim, Experimental and finite element analyses of plastic deformation behavior in vortex extrusion, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 674, pp. 472-479, 2016.

[8] M. Shahbaz, R. Ebrahimi, H. S. Kim, Streamline approach to die design and investigation of material flow during the vortex extrusion process, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 40, No. 5-6, pp. 3550-3560, 2016.

[9] M. Shahbaz, J. G. Kim, R. Ebrahimi, H. S. Kim, Prediction of Extrusion Pressure in Vortex Extrusion Using a Streamline Approach, *Iranian Journal of Materials Forming*, Vol. 4, No. 1, pp. 52-62, 2017.

[10] G. Ranjbari, A. Doniavi, M. Shahbaz, R. Ebrahimi, Effect of Processing Parameters on the Strain Inhomogeneity and Processing Load in Vortex Extrusion of Al-Mg-Si Alloy, *Metals and Materials International*, pp. 1-8, 2020.

[11] G. Ranjbari, A. Doniavi, M. Shahbaz, Numerical Modelling and Simulation of Vortex Extrusion as a Severe Plastic Deformation Technique Using Response Surface Methodology and Finite Element Analysis, *Metals and Materials International*, pp. 1-12, 2020.

[12] H. Ataei, M. Shahbaz, H. S. Kim, N. Pardis, Finite Element Analysis of Severe Plastic Deformation by Rectangular Vortex

2- با توجه به تغییر آهنگ افزایش کرنش موثر میانگین با افزایش زاویه پیچش و مقدار کاهش سطح مقطع، میتوان گفت اثر برهم‌کنش فاکتورهای زاویه پیچش و کاهش سطح مقطع بر کرنش موثر میانگین معنادار است.

3- بیشترین مقدار فاکتور آسیب در قالبی با دندان‌های منحنی و $RA=0/3$ ، $\varphi=30^\circ$ مشاهده می‌شود. بررسی توزیع تنش میانگین در سطح قطعه کار خارج شده از این قالب، وجود تنش‌های میانگین مثبت را در این نقاط نشان می‌دهد که منجر به انتشار ترک‌های به وجود آمده احتمالی خواهد شد.

4- تاثیرگذارترین فاکتورهای ورودی بر نیروی حالت پایدار فرآیندی به ترتیب اهمیت، کاهش سطح مقطع، زاویه پیچش و منحنی شیار می‌باشند.

References:

[1] R. I. Kuznetsov, V. I. Bykov, V. P. Chernyshov, V. P. Pilyugin, N. A. Yefremov, V. V. Posheyev, Plastic deformation of solid bodies under pressure, *Sverdlovsk, IFM UNTS RAN*, Vol. 4, No. 85, 1985.

[2] X. Ma, M. R. Barnett, Y. H. Kim, Forward extrusion through steadily rotating conical dies. Part I: experiments, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, No. 3, pp. 449-464, 2004.

[3] L. X. Kong, P. D. Hodgson, Constitutive modelling of extrusion of lead with cyclic torsion, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 276, No. 1, pp. 32-38, 2000.

[4] S. Khoddam, A. Farhoumand, P. D. Hodgson, Axi-symmetric forward spiral extrusion, a kinematic and experimental study, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 3, pp. 1023-1029, 2011.

[5] Y. Beygelzimer, D. Orlov, A. Korshunov, S. Synkov, V. Varyukhin, I. Vedernikova, I. Korotchenkova, Features of twist extrusion: method, structures & material properties, In *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications, Vol. 114, pp. 69-78, 2006.

[6] M. Shahbaz, N. Pardis, R. Ebrahimi, B. Talebanpour, A novel single pass severe plastic deformation technique: Vortex extrusion, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 530, pp. 469-472, 2011.

Extrusion, Metals and Materials International, pp. 1-7, 2020.

[13] SH. Molaie, M. Shahbaz, R. Ebrahimi, The relationship between constant friction factor and coefficient of friction in metal forming using finite element analysis, Iranian Journal of Materials Forming, Vol. 1, No. 2, pp. 14-22, 2019.

[14] L. X. Kong, P. D. Hodgson, Constitutive modelling of extrusion of lead with cyclic torsion, Materials Science and Engineering: A, Vol. 276, No. 1-2, pp. 32-38, 2000.

[15] M. S. Ghazani, S. Moslemi, The effect of inner corner radius of ECAP die on strain distribution and damage accumulation in deformed sample, Transactions of the Indian Institute of Metals, Vol. 71, No. 4, pp. 971-976, 2018.

[16] م. شبان، " کاربرد ترکیبی از اکستروژن و پرس در کانال های زاویه دار هم مقطع در فرآوری مواد فلزی ریزدانه و نانوساختار " نشریه مواد نوین، جلد 10، شماره 2، ص 17-32، زمستان 1398.

