

ارائه الگوریتمی برای مدل‌سازی فرآیند شیاری محدود در ورق‌های مسی و فولاد کم کربن بر اساس منطق فازی

هادی تقی ملک^۱ و*، محمدرضا مرکی^۲، مجید آذرگمان^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

^۲مربی، هیئت علمی مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

^۳دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید، دانشکده مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

*مسئول مکاتبات: h.tagimalek@gmail.com

چکیده

واژگان کلیدی

آسیب
فولاد کم کربن
مس خالص
شیار محدود
آنالیز المان محدود
منطق فازی

در پژوهش حاضر، مس خالص به وسیله فرآیند فشرده سازی شیاری محدود طی دو پاس در دمای اتاق، ضریب اصطکاک برشی برابر ۰/۱ با پارامترهای ورودی زاویه دندان قالب، سرعت پیشروی قالب بالا و دمای ورق تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفت. شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار DEFORM-3D انجام گرفت. مش بندی از نوع المان مثلثی شکل با پیروی از قانون راس به راس المان بندی انجام شد. پارامترهای مورد بررسی در پژوهش حاضر شامل تاثیر تغییر شکل پلاستیک شدید بر خواص مکانیکی، آسیب در ورق بر حسب کرنش موثر و در نهایت ارائه الگوریتمی برای سه عامل سرعت حرکت سنبه، زاویه دندان قالب و دمای ورق مصرفی می‌باشد. آزمایشاتی به روش ناگوچی با سه عامل سه سطح طراحی شد. صحه‌گذاری نتایج بدست آمده از شبیه سازی برای فولاد کم کربن با مرجع [۱] صحت سنجی شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با افزایش تعداد پاس‌ها اثرات فرآیند بر ورق مسی در رفتار مکانیکی و چقرمگی بر اساس نمودار تنش و کرنش کاهش یافته ولی در فولاد کم کربن برعکس نتایج ورق مسی می‌باشد. میزان آسیب بر حسب نرخ کرنش و بیشترین توزیع کرنش موثر خواهد بود. آسیب در نمونه فولادی ضریب اطمینان بیشتری نسبت به نمونه مسی پیدا کرده و در آزمایش شماره ۷ ورق مسی، کرنش موثر با میزان آسیب به کمترین حد رسیده ولی همچنان ماده تسلیم نشده است. با بررسی نتایج الگوریتم منطق فازی برای مدل‌سازی شیار محدود بیشترین سازگاری و کمترین خطا را با داده‌های تجربی و شبیه‌سازی دارا می‌باشد.

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

۱ مقدمه

به سه دسته اصلی تقسیم بندی می‌شود که از جمله می‌توان به تغییر شکل مواد حجیم، ورق‌ها و لوله‌ها اشاره کرد. از جمله روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید ورق‌ها می‌توان به نورد تجمعی، فشرده سازی شیاری محدود^۱ و موج دار و صاف کردن متوالی اشاره کرد. روش فشرده سازی شیاری محدود روش نوینی از تغییر شکل پلاستیک شدید ورق‌ها است که توسط ژو و همکاران در سال ۲۰۰۱ معرفی شد [۲].

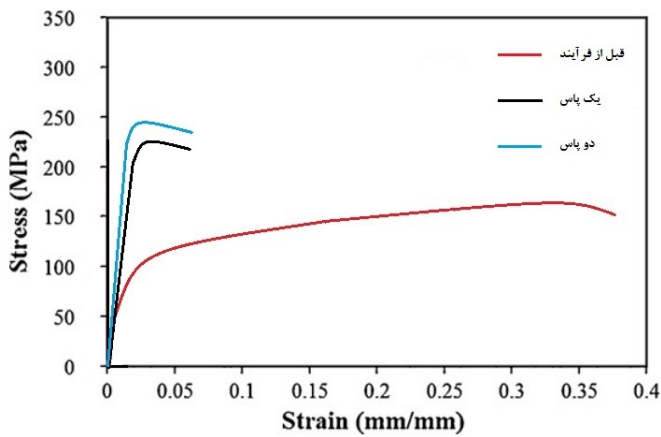
در این فرآیند از خم کردن ورق توسط قالب شیاردار محدود و سپس صاف کردن آن در قالب مسطح محدود به منظور اعمال کرنش و انباشته سازی کرنش استفاده می‌شود. در هنگام پرس نمونه‌ها، فاصله بین فک بالایی و پایینی در هر دو قالب شیاردار و مسطح برابر با ضخامت ورق انتخاب می‌گردد. بنابراین ناحیه های خم شده از نمونه حین تغییر شکل تحت کرنش برشی خالص و نواحی مسطح بدون کرنش قرار می‌گیرند، نمونه ۱۸۰ درجه حول محور عمود بر ورق چرخانده می‌شود و دوباره تحت سیکل خم و مسطح سازی قرار می‌گیرند.

در پژوهش حاضر، به بررسی رفتار تغییر شکل نمونه مس خالص تجاری توسط روش‌های CGP پرداخته شده است. کربن‌شای و همکارانش در سال

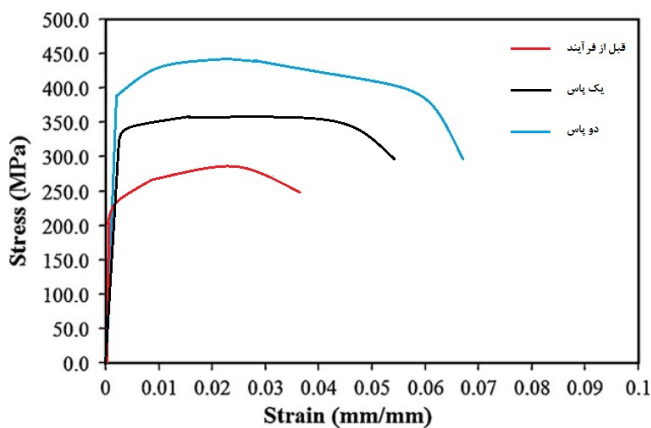
فلز مس با توجه به هدایت الکتریکی و گرمایی بسیار مطلوب، جزء پرکاربردترین فلزات رنگی می‌باشد. با توجه به پیشرفت روزافزون صنایع، نیاز به بهبود خواص فلز مس از جمله دست‌یابی به استحکام بالا همزمان با حفظ هدایت الکتریکی حس می‌شود. بسیاری از محققان کوشیدند تا از طریق آلیاژسازی مکانیکی با عناصری نظیر بریلیم، نقره و تیتانیوم به استحکام‌های بالا در فلز مس دست یابند. یکی از رویکردهای جدید برای استحکام بخشی، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید^۱ می‌باشد.

در این روش با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، طی چندین مرحله اندازه‌ی دانه‌های آن تا مقیاس نانومتری کاهش می‌یابد و این امر باعث بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی ماده می‌شود. از آنجایی که تغییرات ابعادی ماده می‌تواند مانعی در مقابل میزان کرنش اعمالی باشد، لذا اکثر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید به نحوی طراحی شده‌اند که ابعاد نمونه در حین فرآیند ثابت مانده و تغییر نمی‌کند.

روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک با توجه به هندسه محصول فرآیند



شکل ۱: نمودار تنش و کرنش نمونه مسی بعد و قبل از انجام فرآیند



شکل ۲: نمودار تنش و کرنش نمونه فولادی بعد و قبل از انجام فرآیند

۳ طراحی آزمایش

در این تحقیق برای انجام طراحی آزمایش‌ها^۱ و رسیدن به محدوده مطلوب سعی بر آن شده است تا روند طراحی آزمایش تاگوجی گام به گام مورد بررسی و به‌کار گرفته شود. برای انجام آزمایش‌های کامل به منظور دستیابی به کنترل مناسب فرآیند، باید تعدادی زیادی آزمایش را انجام داد. یکی از اهداف اصلی روش طراحی آزمایش‌ها، انتخاب بهترین حالت ممکن آزمایش است که با استفاده از آن بتوان فرآیند را ضمن توجیه پذیر بودن تعداد آزمایش‌ها، به مطلوب‌ترین شکل ممکن بررسی نمود. برای طراحی آزمایش از نرم افزار مینی تب استفاده شده است. در این محدوده متغیرهای ورودی طبق امکانات موجود و محدودیت‌های عملی تعیین شده است. با اجرای روش تاگوجی، طراحی آزمایشات با L9 آزمایش به صورت جدول ۱ و ۲ در آمده است. دمای ورق بر حسب سانتی‌گراد، سرعت پیشروی سنه میلی متر بر دقیقه و زاویه دندان بر حسب درجه برای نرم افزار تعریف شده است.

۴ منطق فازی

منطق فازی^۲ توسط لطفی‌زاده در مقاله‌ای با عنوان "سیستم‌های فازی" به صورت رسمی معرفی شد. لطفی‌زاده بیان کرد که تئوری کلاسیک بیش از

۲۰۰۵ اثرات دمای اتاق و دمای تبرید را بر آلیاژهای آلومینیم کار شده و مس خالص بررسی کردند و خواص مکانیکی بدست آمده برای نمونه‌ها را مورد مقایسه قرار دادند [۳].

پنگ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ نتایج فعالیت‌های خود را در مورد آلیاژهای مس روی ارائه کردند و در تحقیقات خود با تغییر در نحوه اعمال تغییر شکل، دسترسی به کرنش‌های بالاتر را امکان‌پذیر نمودند [۴].

یون و همکارانش توزیع کرنش در حین فرآیند شیار محدود را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند در ناحیه برش کرنش بدست آمده از شبیه‌سازی از مقدار متناظر آن در روابط تحلیلی بیشتر است [۵].

بعد از آن در سال ۲۰۱۰ شیردل و همکارانش مدل المان محدود دو و سه بعدی جهت پیش‌بینی حرکت مواد در داخل قالب و نیروی پرس ارائه کردند و دریافتند که نتایج بدست آمده از مدل سازی سه‌بعدی در مقایسه با مدل دوبعدی تطابق بیشتری با نمونه آزمایشگاهی دارد اما مدل سه‌بعدی آنها تنها شامل پاس اول فرآیند می‌شد و سایر پاس‌ها را پوشش نمی‌داد [۶].

در همین سال خدابخشی و همکارانش فرآیند CGP را بر ورق‌های از فولاد کم کربن بکار بردند که سبب ارتقای خواص مکانیکی این ورق‌ها گردید. در سال ۲۰۱۴ ابراهیمی و همکارانش خواص سایشی ورق‌های CGP شده از جنس برنج را بررسی کردند [۷].

با توجه به موارد بیان شده هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثر فرآیند CGP بر خواص مکانیکی و متالورژیکی ورق‌های مسی با ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد. بدین منظور تنش تسلیم، استحکام نهایی نمونه‌ها مطالعه شد. بدین منظور میزان پر شدن فضای قالب، توزیع کرنش موثر اعمالی به نمونه و نیروی لازم جهت انجام فرآیند پس از اعمال تغییر شکل به ازای دو پاس با استفاده از آنالیز المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفت.

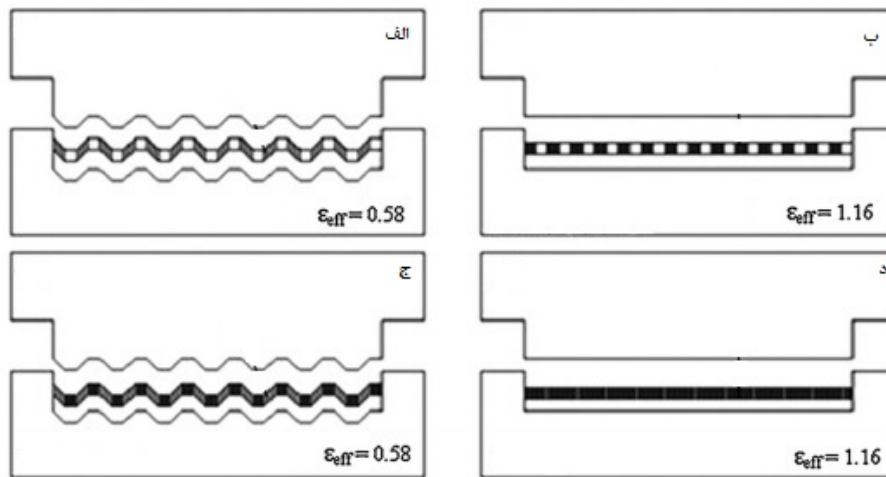
برای بررسی همگنی تغییر شکل اعمالی به نمونه از اندیس ناهمگنی توزیع کرنش موثر بهره گرفته شد. شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار DEFORM-3D انجام گرفت. برای صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی از نتایج گزارش شده در با مرجع شماره [۱] صحت سنجی شد. تلاش شده که با تغییر در عوامل هندسی قالب و به تبع آن کاهش کرنش اعمالی در هر مرحله از CGP، به خواص مکانیکی مطلوب‌تری دست یافت.

۲ مواد و روش تحقیق

برای انجام شبیه‌سازی از نرم افزار DEFORM-3D استفاده شد. قالب بالا و پایین به صورت صلب در نظر گرفته شد. نمونه مکعب مستطیلی با ابعاد $3 \times 52 \times 75 \text{ mm}^3$ با رفتار پلاستیک از جنس مس خالص و فولاد کم کربن انتخاب و تعداد ۲۰/۰۰۰ عدد مش از نوع مثلثی برای مش بندی نمونه به کار گرفته شد. رفتار ماده با استفاده از راهنمای نرم افزار مطابق رابطه تنش سیلان به صورت تابعی از کرنش پلاستیک موثر، نرخ کرنش پلاستیک موثر و دما تعریف گردید.

در فرآیند CGP تنها بخشی از نمونه حین تغییر شکل با سطوح قالب در تماس است. لذا نیروی بیشتری صرف غلبه به اصطکاک شده تا نمونه سیلان کرده و تغییر شکل دهد.

¹DOE ²Fuzzy



شکل ۳: شماتیک فرآیند شیار محدود [۱]

جدول ۱: مقادیر بدست آمده از شبیه سازی به همراه پارامترهای ورودی و خروجی برای ورق مسی

نتایج بدست مدل فازی		پارامترهای خروجی المان محدود		پارامترهای ورودی			ردیف
نتایج مدل کرنش موثر	نتایج مدل آسیب	بیشترین کرنش موثر	بیشترین آسیب وارده	دما	سرعت پیشروی	زاویه دندان	
۱/۴۹۵۸	۰/۵۲۶۳	۱/۵۱۹۷۹	۰/۵۳۶۰۵	۵۰	۰/۱	۴۵	۱
۱/۵۳۲۰	۰/۵۵۳۰	۱/۵۱۲۰۷	۰/۵۵۹۷۹	۱۵۰	۱/۰	۴۵	۲
۱/۵۰۳۵	۰/۵۷۵۹	۱/۵۲۴۳۱	۰/۵۵۹۳۱	۳۰۰	۱۰	۴۵	۳
۵/۰۷۸۹	۰/۵۷۸۱	۵/۰۸۰۴۴	۰/۵۴۸۱۰	۵۰	۰/۱	۵۰	۴
۲/۴۷۰۲	۰/۵۶۳۱	۲/۵۷۸۵۵	۰/۵۷۶۳۱	۱۵۰	۱/۰	۵۰	۵
۲/۸۹۳۶	۱/۳۰۴۳	۲/۷۹۲۳۲	۱/۴۱۹۴۳	۳۰۰	۱۰	۵۰	۶
۴/۷۶۹۹	۴/۶۰۸۳	۴/۶۳۰۴۷	۴/۶۶۸۸۳	۵۰	۰/۱	۶۰	۷
۷/۹۴۸۶	۱/۲۱۱۵	۸/۶۵۹۴۸	۱/۳۵۱۱۵	۱۵۰	۱/۰	۶۰	۸
۵/۶۸۸۸	۱/۴۵۷۱	۵/۸۶۵۸۵	۱/۵۳۲۷۱	۳۰۰	۱۰	۶۰	۹

جدول ۲: مقادیر بدست آمده از شبیه سازی به همراه پارامترهای ورودی و خروجی برای ورق فولادی کم کربن

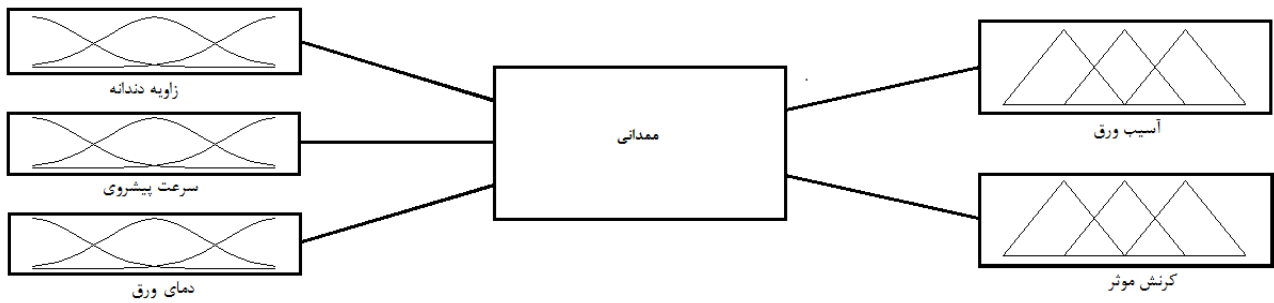
نتایج بدست مدل فازی		پارامترهای ورودی		پارامترهای ورودی			ردیف
نتایج مدل کرنش موثر	نتایج مدل آسیب	بیشترین کرنش موثر	بیشترین آسیب وارده	دما	سرعت پیشروی	زاویه دندان	
۱/۵۰۰۱	۰/۵۱۲۳	۱/۴۶۲۳۵	۰/۵۰۱۰۵	۵۰	۰/۱	۴۵	۱
۱/۵۳۲۶	۰/۵۰۲۱	۱/۵۰۳۲۶	۰/۵۰۰۳۶	۱۵۰	۱/۰	۴۵	۲
۱/۵۲۵۲	۰/۴۸۰۵	۱/۵۲۲۳۶	۰/۴۹۹۳۵	۳۰۰	۱۰	۴۵	۳
۴/۷۳۶۹	۰/۵۴۳۶	۴/۹۸۵۶۲	۰/۵۴۲۵۳	۵۰	۰/۱	۵۰	۴
۲/۰۲۸۹	۰/۵۱۲۲	۲/۰۲۳۵۵	۰/۵۰۳۵۲	۱۵۰	۱/۰	۵۰	۵
۲/۶۹۳۲	۰/۷۵۲۰	۲/۷۰۳۶۹	۰/۷۳۶۵۲	۳۰۰	۱۰	۵۰	۶
۴/۳۸۹۵	۲/۹۹۸۱	۴/۳۶۹۸۵	۳/۲۵۶۹۸	۵۰	۰/۱	۶۰	۷
۷/۸۶۲۳	۱/۳۵۹۸	۷/۹۵۸۶۲	۱/۴۵۲۳۶	۱۵۰	۱/۰	۶۰	۸
۴/۷۸۹۵	۱/۲۳۶۹	۴/۹۶۸۵۳	۱/۲۵۹۸۷	۳۰۰	۱۰	۶۰	۹

عضویت را به خود اختصاص می دهند. به منظور دسته بندی مقادیر توابع ورودی از تابع مثلثی، استفاده شده است.

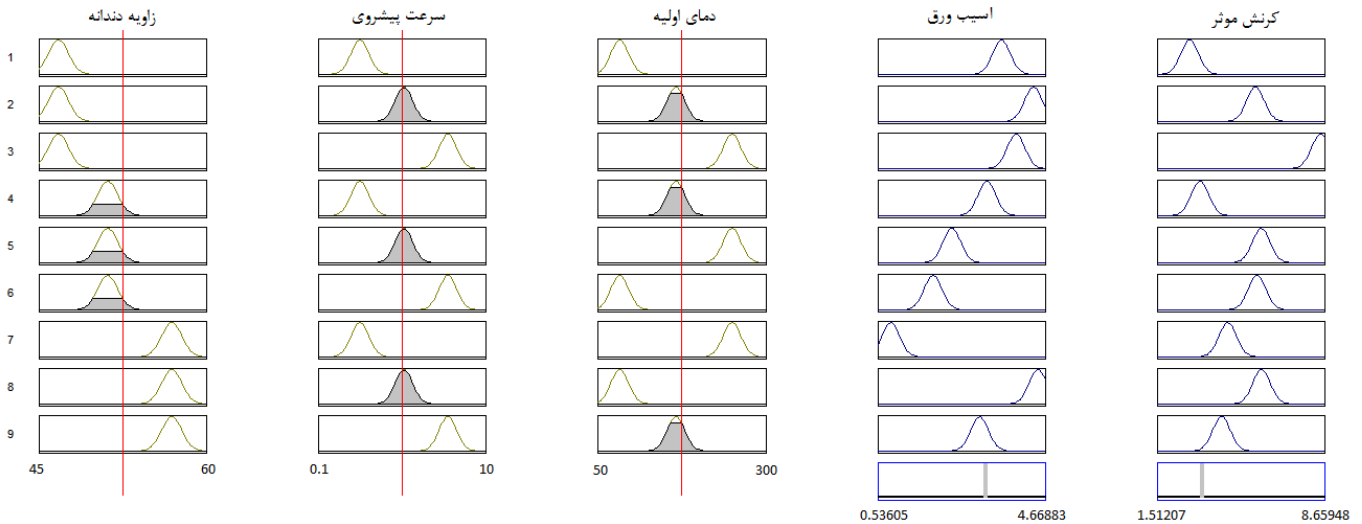
همچنین تابع مورد استفاده در دسته بندی پارامترهای خروجی از تابع سهمی می باشد. توابع به کار رفته در دسته بندی پارامترهای ورودی و خروجی، بهترین عملکرد را در بین توابع موجود در جعبه ابزار منطق فازی نرم افزار متلب داشته اند. نحوه ی دسته بندی پارامترهای ورودی و خروجی، بر اساس نتایج پارامترهای ورودی و خروجی برای مدل فازی تعریف شده است.

تعداد قوانین به کار رفته جهت مدل سازی ایجاد شده ۹ قانون می باشد. جدول ۳ این قوانین را نشان می دهد. در این تحقیق، موتور استنتاج ممدانی به

حد بر روی دقت تاکید داشته و از این جهت با سامانه های پیچیده و دنیای واقعی چندان سازگاری ندارد. منطق کلاسیک، هر چیزی را بر اساس یک سامانه ی دوتایی (درست یا غلط، صفر یا یک) نشان می دهد، اما در منطق فازی، درستی یا نادرستی هر چیزی با درجه ی عضویت نشان داده می شود که مقدار آن بین صفر و یک است. در این پژوهش از نرم افزار متلب جهت مدل سازی فرآیند شیار محدود استفاده شده است و همچنین شکل شماره ۴ مدل فازی طراحی شده در نرم افزار متلب را نشان می دهد. در سیستم فازی طراحی شده، مقادیر ورودی سرعت پیشروی سنبه، دمای ورق و زاویه دندان قالب به مقادیر فازی تبدیل می شوند و با استفاده از توابع فازی، یک درجه ی



شکل ۴: طراحی مدل برای پارامترهای ورودی و خروجی در نرم افزار متلب



شکل ۵: نمایش گرافیکی استنتاج فازی به همراه پارامترهای ورودی و خروجی برای ورق مسی

جدول ۳: مقادیر بدست آمده از شبیه سازی به همراه پارامترهای ورودی و خروجی برای ورق فولادی کم کربن

ردیف	پارامترهای ورودی			زاویه دندانه	سرعت پیشروی	پارامترهای خروجی	
	دمای ورق	آسیب	کرنش موثر			سرعت پیشروی	
۱	T.1	D.1	S.1	A.1	V.1	T.1	D.1
۲	T.2	D.2	S.2	A.2	V.2	T.2	D.2
۳	T.3	D.3	S.3	A.3	V.3	T.3	D.3
۴	T.4	D.4	S.4	A.4	V.4	T.4	D.4
۵	T.5	D.5	S.5	A.5	V.5	T.5	D.5
۶	T.6	D.6	S.6	A.6	V.6	T.6	D.6
۷	T.7	D.7	S.7	A.7	V.7	T.7	D.7
۸	T.8	D.8	S.8	A.8	V.8	T.8	D.8
۹	T.9	D.9	S.9	A.9	V.9	T.9	D.9

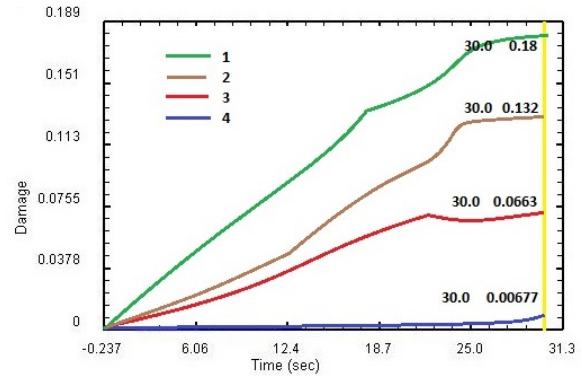
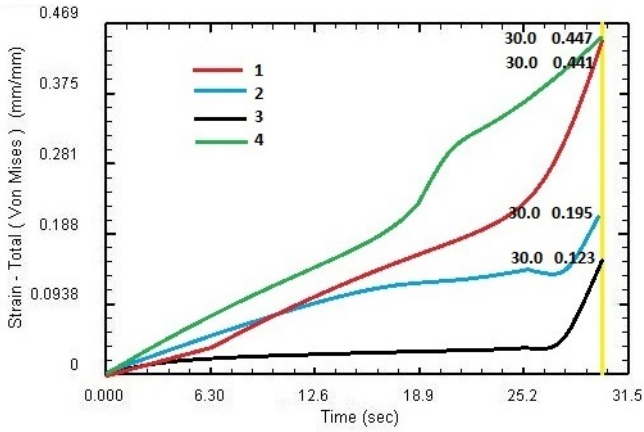
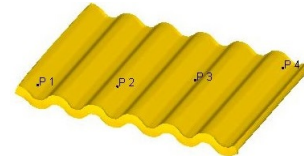
اساس کرنش و نرخ کرنش می باشد هیچ گونه حد پارگی و آسیب در نمونه ورق مسی و فولادی ایجاد نمی شود. میزان آسیب در نمونه به مقدار بسیار کم در قسمت های کنگره شده ورق افزایش یافته است. صحت سنجی داده های بدست آمده از مرجع شماره [۱] صحت سنجی شده است.

در شکل ۶ نشان داده شده که هیچ گونه تسلیمی در نمونه فولادی رخ نداده و میزان ضریب اطمینان بالاتری برخوردار بوده است. در نمونه مسی در آزمایش شماره ۷ با پارامترهای زاویه دندانه ۶۰ درجه، سرعت پیشروی سنبه ۰/۱ میلی متر بر دقیقه و دمای ورق ۵۰ درجه سانتی گراد میزان آسیب و کرنش موثر بسیار نزدیک بوده ولی هم چنان آسیبی در نمونه مسی رخ نداده است.

کار گرفته شده است. مقادیر ورودی های فازی پس از ورود به موتور استنتاج و با اعمال قوانین فازی موجود، به خروجی های فازی تبدیل می شوند. در پایان نیز خروجی های فازی با استفاده از روش غیر فازی سازی محاسبه مرکز جرم، به مقادیر خروجی زبری سطح تبدیل می شوند.

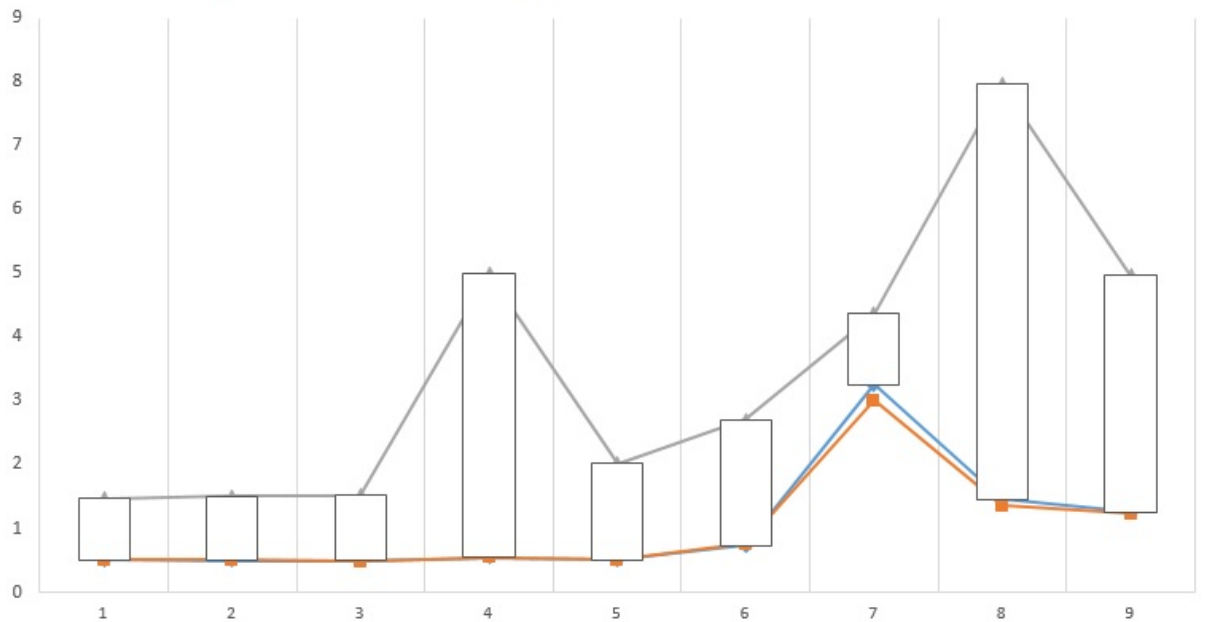
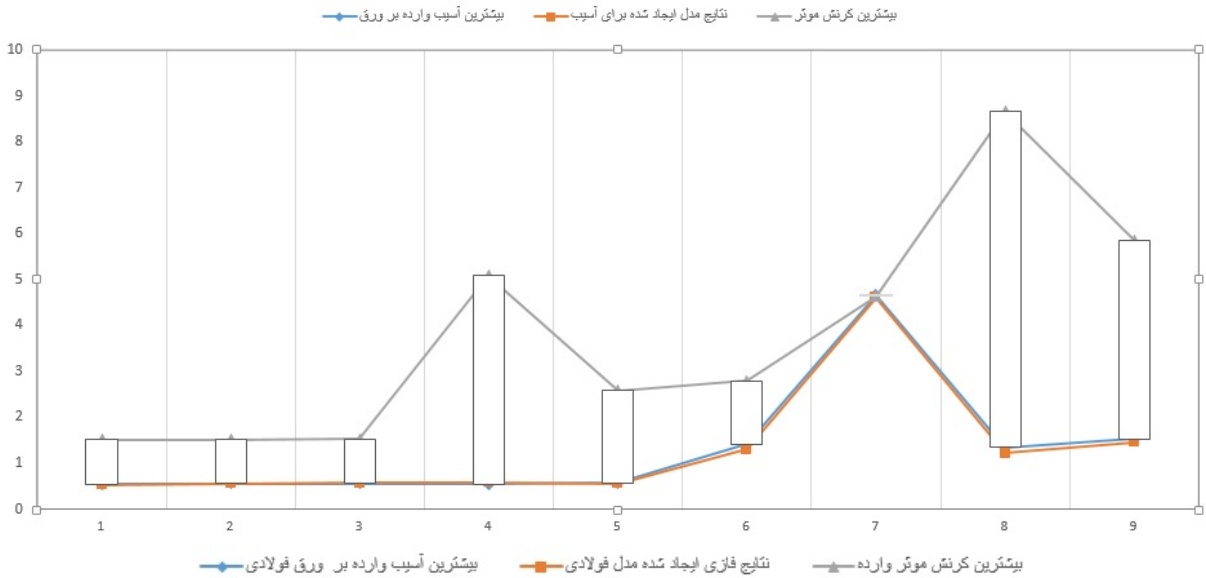
۵ نتایج

آسیب و رشد ترک در ورق های از اهمیت ویژه ای برخوردار است. با بررسی عددی و شبیه سازی فرآیند CGP به توجه به دیاگرام میزان آسیب که بر



شکل ۷: دیاگرام میزان شکل پذیری بر حسب زمان و آسیب بر روی نقاط تعریف شده بر روی ورق

شکل ۶: بررسی میزان تنش تسلیم فون میزز بر حسب زمان بر روی نقاط تعریف شده بر روی ورق



شکل ۸: نمودارهای حد آسیب بر حسب کرنش بر اساس نتایج شبیه سازی، فازی برای دو ورق مسی و فولادی

- ing: A, 527(16-17):4043-4049, 2010.
- [2] Ranaei, M.A., Afsari, A., Ahmadi Brooghani, S.Y., and Moshksar, M.M. Mechanical and electrical properties of commercially pure copper deformed severely by equal channel angular pressing. *Modares Mechanical Engineering*, 14(15):257-266, 2015 (In Persian).
- [3] Krishnaiah, A, Chakkingal, Uday, and Venugopal, P. Production of ultrafine grain sizes in aluminium sheets by severe plastic deformation using the technique of groove pressing. *Scripta Materialia*, 52(12):1229-1233, 2005.
- [4] Peng, Kaiping, Su, Lifeng, Shaw, Leon L, and Qian, K-W. Grain refinement and crack prevention in constrained groove pressing of two-phase cu-zn alloys. *Scripta Materialia*, 56(11):987-990, 2007.
- [5] Yoon, Seung Chae, Krishnaiah, A, Chakkingal, Uday, and Kim, Hyoung Seop. Severe plastic deformation and strain localization in groove pressing. *Computational Materials Science*, 43(4):641-645, 2008.
- [6] Shirdel, A, Khajeh, A, and Moshksar, MM. Experimental and finite element investigation of semi-constrained groove pressing process. *Materials & Design*, 31(2):946-950, 2010.
- [7] Khodabakhshi, F, Haghshenas, M, Eskandari, H, and Koochbor, B. Hardness- strength relationships in fine and ultra-fine grained metals processed through constrained groove pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 636:331-339, 2015.

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها و مقایسه آن در این بخش به بررسی و تفسیر نتایج مدل پیاده‌سازی شده پرداخته می‌شود. به‌منظور پیش‌بینی مدل ایجاد شده در فرآیند شکل‌دهی شیار محدود یک کار اصولی مدل سازی فرآیند به وجود آمده است. در این پژوهش به منظور پیش‌بینی پارامترهای ورودی به عنوان پارامترهای فرآیند آزمایش‌های شبیه‌سازی مورد نیاز انجام گردید. ۹ آزمایش با در نظر گرفتن ۳ سطح برای دمای ورق، ۳ سطح برای زاویه دندانه قالب و ۳ سطح برای سرعت پیشروی سنبه انجام شد.

۶ نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر فرآیند CGP بر خواص مکانیکی و مدل‌سازی ورق‌های مسی و فولادی کم کربن مورد بررسی قرار گرفت. که نتایج آن به صورت خلاصه در زیر بیان شده است.

۱. فرآیند CGP استحکام کششی و استحکام تسلیم را افزایش می‌دهد که بیشترین رشد در پاس اول فرآیند اتفاق می‌افتد و در پاس‌های بعدی افزایش استحکام نهایی با شیب کمتری ادامه می‌یابد.
۲. بر اساس معیار تسلیم فون میز، ناپایداری و گلوئی شدن در نمونه‌های شیار محدود شده زودتر آغاز می‌شود و این موضوع نشان دهنده نرخ کارسختی پایین می‌باشد. همچنین افزایش تغییر شکل ناهمگن در نمونه‌های شیار محدود شده نسبت به نمونه پایه، نشان دهنده افزایش حساسیت ماده به نرخ کرنش است.
۳. میکرو ترک‌ها در طول فرآیند شکل‌دهی در سطح ورق ایجاد می‌شود و در اثر تغییر شکل ورق افزایش یافته و سبب کاهش استحکام تسلیم می‌گردد. برای رفع آن می‌توان از روان‌کارها برای کاهش میکرو ترک‌ها، افت استحکام تسلیم برای پاس‌های شیار محدود استفاده کرد.
۴. با کاهش استحکام تسلیم در پاس اول، انرژی درونی ماده پایین است و سرعت فرآیندهای صعود و لغزش متقاطع که باعث کاهش چگالی نابه‌جایی‌ها می‌شوند کم بوده و بنابراین فعالیت مکانیزم‌هایی که باعث تولید نابه‌جایی‌ها بیشتر است. اما با ادامه تغییر شکل چگالی نابه‌جایی‌ها به حد اشباع می‌رسد.
۵. الگوریتم مدل سازی منطق فازی قابلیت تعمیم بالایی نسبت به فرآیند شیار محدود دارا بوده و سازگاری بسیار نزدیک به نتایج تجربی و شبیه سازی دارا می‌باشد.
۶. با بررسی آزمایشات انجام شده در ورق مسی و فولادی میزان آسیب وارده بر ورق که بر اساس کرنش و نرخ کرنش بوده، آسیب از کرنش موثر اعمالی کم‌تر بوده و فقط در آزمایش شماره ۷ ورق مسی حد آسیب به کرنش موثر بسیار نزدیک شده ولی باز تسلیم ماده رخ نداده است.

مراجع

- [1] Khodabakhshi, F, Kazeminezhad, M, and Kokabi, AH. Constrained groove pressing of low carbon steel: Nano-structure and mechanical properties. *Materials Science and Engineer-*