



# یک الگوریتم برای پیش‌بینی اثر هندسه قالب بر رفتار استحکامی ورق تحت فرآیند پرس کاری شیاری

حامد سعیدی گوگرجین<sup>1\*</sup>، بهزاد تیموری<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- کارشناسی ارشد، مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\* تهران، نارمک، صندوق پستی، 16846-13114، hsaedi@iust.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 بهمن 1394

پذیرش: 15 فروردین 1395

ارائه در سایت: 05 خرداد 1395

کلید واژگان:

پرس کاری شیاری

اثر قالب

ورق آلومینیوم

خواص مکانیکی

## چکیده

در این پژوهش به مطالعه تجربی و عددی فرایند پرس کاری شیاری ورق‌های Al 5052 پرداخته می‌شود. فرایند پرس کاری شیاری با ریزساختار سازی اندازه دانه‌ها از ابعاد میکرون به نانو منجر به تولید ورق‌های با استحکام بالاتر می‌شود. هدف از این پژوهش ارائه الگوریتم برای پیش‌بینی تغییر رفتار مکانیکی (استحکام و سختی) ورق‌ها تحت این فرایند است. این الگوریتم امکان ارزیابی رفتار ورق با تغییرات در هندسه قالب و همچنین تغییرات تعریف پاس‌های پرس کاری را فراهم می‌آورد. این الگوریتم بر پایه مدل‌های ریاضی از تغییرات رفتار ورق‌ها با تغییر اندازه دانه‌بندی آن‌ها و همچنین مدل‌های تئوری حاکم بر رفتاری استحکامی و سختی آن‌ها ارائه شده است. بدین منظور نخست نمونه ورق‌های Al 5052 تحت دو پاس پرس کاری شیاری قرار می‌گیرند. استحکام و سختی نمونه‌های آنیل‌شده و نمونه‌های تحت یک و دو پاس پرس کاری مطابق استاندارد استخراج می‌شود. نتایج پیش‌بینی‌شده توسط الگوریتم پیشنهادی در تطابق مناسبی با نتایج تجربی این پژوهش قرار دارد. سپس نتایج پیش‌بینی این الگوریتم با داده‌های تجربی موجود در مراجع برای پرس کاری آلومینیوم‌های خالص با قالب‌های مختلف انجام می‌شود، که حاکی از تطابق مناسب آن‌ها دارد. به کارگیری این الگوریتم امکان صرفه‌جویی زمانی و مالی در پیش‌بینی اثر هندسه شیاری قالب بر رفتار ورق نهایی و انتخاب قالب بهینه را میسر می‌سازد. در ادامه به ارزیابی اثر زاویه شیاری قالب بر استحکام تسلیم و سختی ورق‌های Al 5052 پرس کاری‌شده پرداخته می‌شود. در نهایت محدودیت‌ها و امکان توسعه این الگوریتم مورد بحث قرار می‌گیرد.

## An algorithm for prediction of die geometry effects on strength behavior of sheets fabricated by groove pressing process

Hamed Saeidi Googarchin<sup>1\*</sup>, Behzad Teimouri<sup>2</sup>

School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 16846-13114 Tehran, Iran, hsaedi@iust.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 02 February 2016

Accepted 03 April 2016

Available Online 25 May 2016

## Keywords:

Groove pressing

Die effect

Aluminum sheet

## ABSTRACT

In this paper, the constrained groove pressing (CGP) process of Al 5052 sheets are experimentally and numerically studied. The CGP process produces the micro-grained-size sheets to enriched strength nano-grained-size ones. The goal of this investigation is the development of an algorithm for the mechanical behavior (Strength and Hardness) prediction of the sheets fabricated by the process. The algorithm enables one to evaluate the die geometry and pressing pass definition effects on mechanical behavior of the fabricated sheet. The proposed algorithm is based on the available relation in literature between the macroscopic behavior and the grain size in metal sheets and between the hardness and the strength properties of metal sheets. The Al 5052 samples are fabricated by two passes of the CGP process. The yield strength and the Vickers hardness of the annealed, the one and two pass CGPed samples are experimentally obtained. The predicted results by the developed algorithm are in good agreement with the experimental data. The comparison of the predicted results by the algorithm with available experimental data for the mechanical behavior of the CGPed pure aluminum sheets with different dies reveals the good accuracy of the proposed algorithm. The algorithm enables one to economically save from the time-consuming experimental evaluation of groove geometry effects on the fabricated sheets and optimum die selection. The effects of the die groove angle on the yield strength and the hardness of the CGPed Al 5052 sheets are estimated using the developed algorithm.

## 1- مقدمه

می‌شود. در سال‌های اخیر، فرایند پرس کاری شیاری از میان این روش‌ها مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در سال 2002 شین و همکارانش [1] برای نخستین بار این فرایند را در تولید ورق‌های نانوکریستالی از جنس

روش‌های تغییر پلاستیک شدید برپایه ریزساختار سازی دانه‌بندی‌های مواد از ابعاد میکرون به ابعاد نانومتری منجر به تولید ورق‌های با استحکام بسیار بالاتر

Please cite this article using:

H. Saeidi Googarchin, B. Teimouri, An algorithm for prediction of die geometry effects on strength behavior of sheets fabricated by groove pressing process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 261-270, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

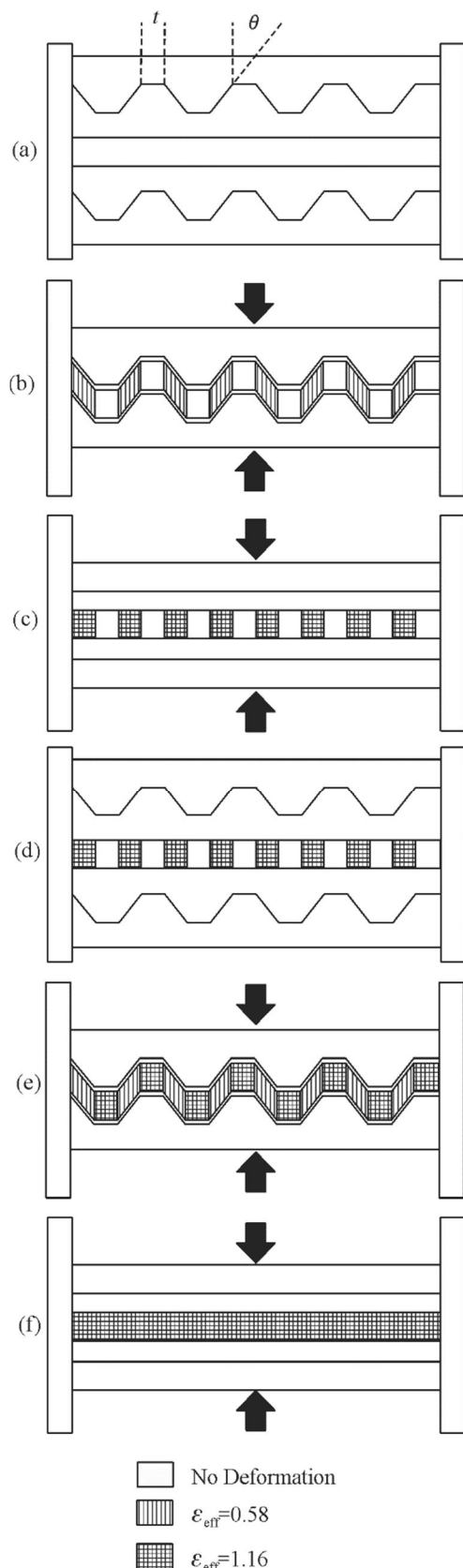


Fig. 1 The geometry of the grooved and flattened die sections

شکل 1 هندسه مقطع قالب شیاردار و قالب صاف

آلومینیوم خالص استفاده کردند. برای انجام این فرایند نیاز به دو مجموعه قالب شیاردار و قالب صاف است. مطابق شکل 1-a، ابعاد هندسی شیارهای قالب براساس عرض شیار،  $t$ ، و زاویه شیار،  $\theta$ ، تعریف می‌شود. همان‌طور که قابل مشاهده است، مقطع قالب شیاردار نامتقارن است. روند انجام فرایند شامل چهار مرحله است:

- مرحله اول: شیاردار کردن ورق صاف تحت پرس با قالب شیاردار (شکل 1-b).
- مرحله دوم: صاف کردن ورق شیاردار تحت پرس با قالب صاف (شکل 1-c).
- مرحله سوم: گردش 180 درجه‌ای ورق (شکل 1-d) و دوباره شیاردار کردن ورق صاف تحت پرس با قالب شیاردار (شکل 1-e).
- مرحله چهارم: صاف کردن ورق شیاردار تحت پرس با قالب صاف (شکل 1-f).

در این فرایند، چهار مرحله پرس کاری متوالی فوق، یک پاس پرس کاری نامیده می‌شود. انجام هر پاس پرس کاری می‌تواند همراه با ریزتر کردن دانه‌بندی‌های ورق می‌تواند منجر به افزایش استحکام و سختی ورق شود، ولی با افزایش تعداد پاس‌ها اثرات فرایند بر بهبود رفتار مکانیکی ورق کاهش می‌یابد، همچنین ایجاد ترک‌های سطحی و کاهش شکل‌پذیری نمونه از عوامل محدودکننده تعداد پاس‌های قابل انجام برای یک ورق است. نتایج پژوهش شین و همکارانش نشان داد که پرس کاری شیاری ورق‌های آلومینیومی مانند سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید سبب بهبود قابل توجه استحکام و سختی نمونه‌ها می‌شود [1]. پس از آن، به کارگیری این روش برای ارتقا خواص انواع آلیاژها مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفت که در این‌جا به جهت اختصار از پرداختن به آن صرف‌نظر می‌شود. مطالعه درخصوص اثر هندسه قالب بر بهبود رفتار نمونه‌ها بسیار محدود و گاهی در تناقض با یکدیگر بوده است. در سال 2012، برهانی و جوانرودی [2] با پیشنهاد فرایند اصلاح‌شده «پرس کاری شیاری محدود همراه با تشک لاستیکی<sup>1</sup>» به بررسی تجربی اثر عرض و زاویه شیار بر رفتار ورق نانوکریستال‌شده پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در مقایسه با زاویه شیار مرسوم 45 درجه‌ای، زاویه شیار 50 درجه منجر به ریزتر شدن ساختار دانه‌بندی‌های ورق می‌شود. این موضوع اگرچه سبب بهبود خواص مکانیکی ورق شد، ولی کاهش یکنواختی کرنش<sup>2</sup> در نمونه‌های نهایی را به همراه داشته است [2]. از دیدگاه طراحی مهندسی، یکنواختی کرنش در ورق نهایی از نظر دستیابی به قابلیت اطمینان بالا و کاهش نامعینی‌های احتمالاتی دارای اهمیت است. در سال 2012، سجادی و همکارانش [3] با پیشنهاد فرایند «پرس کاری شیاری محدود پوششی<sup>3</sup>» نشان دادند که افزایش زاویه شیار از 45 درجه به 53 درجه منجر به بهبود خواص مکانیکی چشم‌گیری نمی‌شود، همچنین این تغییر قالب سبب کاهش تعداد پاس‌های قابل انجام روی ورق می‌شود. پنگ و همکارانش [4,5] به تحلیل اثر عرض شیار قالب بر رفتار ورقی از آلیاژ مس و روی تحت فرایند پرس کاری شیاری محدود پرداختند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که افزایش عرض شیار قالب از 5 میلی‌متر به 7 میلی‌متر منجر به افزایش تعداد پاس‌های پرس کاری قابل انجام روی ورق پیش از ایجاد ترک‌های سطحی می‌شود البته این تغییر قالب همراه با کاهش نرخ ریزساختار سازی و کاهش نرخ سخت‌تر شدن سطح بوده است

<sup>1</sup> Rubber Pad-Constrain Groove Pressing

<sup>2</sup> Strain Homogeneity

<sup>3</sup> Casing Constrain Groove Pressing

[4]. در سال 2015، وانگ و همکارانش [6] به بررسی اثر هندسه قالب بر رفتار ورقی از نیکل خالص تحت فرایند پرس کاری شیاری پرداختند. ایشان

مطابق شکل 1، میزان کرنش برشی در هر مرحله پرس کاری با رابطه (3) برابر است.

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \left(\frac{4}{3}\right)^{0.5} \times \frac{t \times \tan(\theta)}{2 \times t} \quad (3)$$

در بیشتر مطالعات انجام‌شده تاکنون، ارتفاع مقطع شیار برابر ضخامت ورق نمونه در نظر گرفته می‌شود [8-10]. یعنی به عبارت ساده‌تر زاویه شیار برابر 45 درجه در نظر گرفته می‌شود. در این صورت میزان کرنش برشی در هر پرس کاری برابر با رابطه (4) است.

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \left\{\frac{4}{3} \times \frac{t}{2 \times t}\right\}^{0.5} = 0.58 \quad (4)$$

از آن‌جا که مطابق تعریف هر پاس شامل چهار مرحله پرس کاری است و در هر مرحله شیاردار کردن یا صاف کردن تقریباً نیمی از ورق تحت برش خالص قرار دارد؛ بنابراین میزان کرنش مؤثر در پایان هر پاس برای 1.16 محاسبه می‌شود.

## 2-2- رابطه کرنش مؤثر با سختی نمونه

مقاومت سطحی نمونه در مقابل نفوذ جسم مقابل با کرنش مؤثر در آن رابطه مستقیم غیرخطی دارد [11]. تغییرات سختی نمونه با کرنش مؤثر نمونه به‌صورت رابطه (5) تعریف می‌شود.

$$HV = K \times \varepsilon_{\text{eff}}^n \quad (5)$$

در آن  $K$  و  $n$  به ترتیب ضریب سختی و توان سخت‌شوندگی نامیده می‌شود. این ثوابت مادی به ترتیب عرض از مبدا و شیب خط برازش شده بر نمودار لگاریتمی - لگاریتمی سختی برحسب کرنش باشد. این نمودار از تست فشار سطحی نمونه استخراج می‌شود.

## 2-3- رابطه سختی با استحکام نمونه

خواص مکانیکی فلزات پلی کریستال لاین<sup>1</sup> وابستگی شدیدی بر ساختار درونی و دانه‌بندی‌ها دارد. براساس مطالعات تجربی روابطی بین اندازه دانه‌ها و استحکام نمونه‌ها نیز ارائه شده است [12]. ولی رابطه پرکاربرد مهندسی برای تخمین تنش تسلیم، $\sigma_y$  و تنش نهایی، $\sigma_{\text{uts}}$  برحسب سختی ویکرز، $HV$ ، ورق‌ها به‌صورت روابط (6، 7) است.

$$\sigma_y = 3 \times HV \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{uts}} = 3.45 \times HV \quad (7)$$

مطالعات اخیر [13] نشان داده است که این روابط برای ورق‌های فلزی نانوساختار، که از روش‌های تغییر پلاستیک شدید تولید می‌شوند، قابل استفاده نیست. در سال 2015، خدابخشی و همکاران یک رابطه جامع برای محاسبه استحکام برحسب سختی برای فلزات با دانه‌بندی‌های میکرومتری و نانومتری به صورت روابط (8، 9) ارائه کردند [13].

$$\sigma_y = 3 \times HV \times (0.1)^{n^*} \quad (8)$$

$$\sigma_y = 2.9 \times HV \times \frac{1}{1 - n^*} \times \left(\frac{1 - n^*}{12.5 \times n^*}\right)^{n^*} \quad (9)$$

در رابطه (9)  $n^*$  براساس برازش تابع بر داده‌های تجربی تعیین می‌شود.

## 3- مطالعه تجربی فرآیند پرس کاری شیاری محدود ورق Al 5052

در پژوهش حاضر، جهت ارزیابی تغییرات رفتار مکانیکی نمونه در اثر فرایند پرس کاری شیاری از ورق Al 5052 استفاده شد. در صنعت خودروسازی دنیا، این آلیاژ از پرکاربردترین مواد در تولید پنل‌های داخلی بدنه خودرو است [14].

هم‌زمان اثر تغییرات زاویه و عرض شیار بر رفتار مکانیکی ورق پس از فرایند را مطالعه کردند. جهت تعیین زاویه و عرض بهینه قالب برای پرس کاری شیاری یک نمونه ورق به ضخامت 2 میلی‌متر، از مدل‌سازی عددی فرایند استفاده کردند.

بررسی منابع در دسترس نشان می‌دهد که هنوز مطالعه جامعی در خصوص بررسی اثر هندسه قالب بر رفتار ورق‌ها صورت نگرفته است. نخست در بررسی اثر هندسه قالب، نتایج صرفاً محدود به دو زاویه شیار و یا دو عرض شیار است. بدیهی است که با چنین تعداد محدود از داده نمی‌توان جمع‌بندی کلی ارائه کرد. دوم، ابعاد نمونه می‌تواند نقش مؤثری در رفتار نهایی آن داشته باشد، که کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. از جمله علل پرهیز از بررسی گسترده پارامترهای متفاوتی چون اثرات هندسی قالب و نمونه بر رفتار نهایی ورق‌ها ضرورت صرف هزینه‌های زمانی و مالی زیاد برای مطالعه تجربی آن‌ها اشاره کرد. از آن‌جا که در این فرایند هدف تحقیق بر تغییرات رفتار مکانیکی نمونه‌هاست؛ بنابراین مطالعه تجربی تک‌تک ورق‌های نانوکریستال شده امری گریزناپذیر به نظر می‌رسد [6].

در این پژوهش، با هدف برطرف کردن این محدودیت و امکان توسعه مطالعات در زمینه اثر هندسه قالب بر رفتار نمونه‌ها، سعی شده است که یک الگوریتم ساده برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی ورق‌های پرس کاری‌شده ارائه شود. در این الگوریتم صرفاً احتیاج به انجام مطالعه تجربی فرایند فقط با به کارگیری یک قالب با هندسه معین است. در گام‌های بعدی براساس مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی عددی امکان بررسی اثر هندسه‌های مختلف قالب بر رفتار مکانیکی ورق نهایی میسر شده است.

صحه‌گذاری روش پیشنهادی، با مقایسه نتایج پیش‌بینی‌شده به کمک این الگوریتم، نتایج مطالعات تجربی نویسندگان این مقاله و نتایج تجربی موجود در مراجع انجام می‌شود.

## 2- تئوری

در این بخش برخی از تئوری‌های حاکم بر رفتار مکانیکی فلزات ارائه می‌شود. این تئوری‌ها برای انواع ورق‌های دارای ساختار دانه‌بندی میکرومتری تا نانومتری قابل استفاده است. هدف از گردآوری این مدل‌های ریاضی به کارگیری آن‌ها در الگوریتم پیشنهادی خواهد بود.

## 2-1- کرنش مؤثر ورق در هر پاس

در تغییر شکل چند محوره یک المان، کرنش مؤثر، $\varepsilon_{\text{eff}}$ ، برحسب سایر مؤلفه‌های کرنش به‌صورت رابطه (1) تعریف می‌شود [7].

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \left\{ \frac{2}{9} \times [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2] + \frac{4}{3} \times [\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2] \right\}^{0.5} \quad (1)$$

که در آن  $\varepsilon_x$ ،  $\varepsilon_y$  و  $\varepsilon_z$  به ترتیب کرنش‌های نرمال در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$ ، همچنین  $\varepsilon_{xy}$ ،  $\varepsilon_{yz}$  و  $\varepsilon_{zx}$  به ترتیب کرنش‌های برشی در صفحات  $xy$ ،  $yz$  و  $zx$  است. مطابق شکل 1 در فرایند پرس کاری شیاری محدود، نمونه در راستای  $y$  مقید است؛ بنابراین شرایط کرنش صفحه‌ای برقرار بوده و مطابق مراجع [8-10] تمام مؤلفه‌های کرنش به جز مؤلفه کرنش برشی در صفحه  $xy$  صفر فرض می‌شود؛ بنابراین در این شرایط رابطه (1) به‌صورت رابطه (2) برای فرایند پرس کاری شیاری محدود اصلاح می‌شود.

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \left(\frac{4}{3}\right)^{0.5} \times \varepsilon_{xy} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Polycrystalline

2- شبیه‌سازی فرایند: در این مرحله، فرایند پرس کاری شیاری ورق‌ها براساس هندسه دلخواه قالب و نمونه و همچنین به کمک خواص مکانیکی استخراج شده در مرحله نخست شبیه‌سازی می‌شود. هدف از این شبیه‌سازی استخراج توزیع کرنش مؤثر در ورق‌ها در انتهای هر پاس پرس کاری است.

جدول 1 فرضیات شبیه‌سازی فرایند پرس کاری شیاری

پارامتر	مقدار
جنس ورق‌ها	آلومینیوم
نوع المان	30, 45, 50
مرتب‌ه المان	مرتب‌ه اول
تعداد کل المان‌ها	12000
فرض شبیه‌سازی	کرنش صفحه‌ای
سرعت حرکت قالب (mm/s)	5
مدل اصطکاک بین قطعات	کلمب
ضریب اصطکاک بین قطعات	0.1
فرض مدل ماده قالب	صلب
فرض مدل ماده ورق	الاستیک - پلاستیک غیرخطی (بر اساس داده‌های تست کشش)

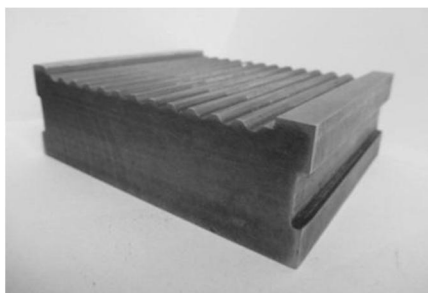


Fig. 2 The grooved die

شکل 2 قالب شیاردار



Fig. 3 The flattened die

شکل 3 قالب صاف

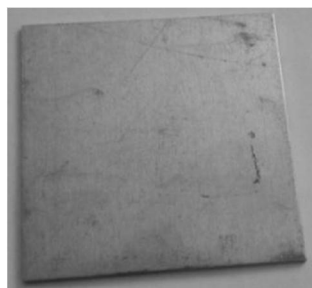


Fig. 4 The Annealed Al 5052 sheet

شکل 4 ورق Al 5052 آنیل‌شده

ابتدا نمونه ورق‌ها به ابعاد  $98 \times 98 \times 2$  میلی‌متر تهیه شد. سپس تحت دمای 350 درجه سانتی‌گراد به مدت 30 دقیقه عملیات آنیل بر نمونه‌ها انجام شده است. قالب شیاردار به زاویه شیار 45 درجه و عرض 2 میلی‌متر و قالب صاف متناسب با ابعاد نمونه‌ها تهیه شد. تصویر قالب شیاردار و قالب صاف به ترتیب در شکل‌های 2 و 3 ارائه شده است.

فرایند پرس کاری شیاری ورق‌ها در دو پاس و در نهایت در هشت مرحله انجام شد. جهت ارزیابی تغییرات استحکام، سختی و یکنواختی رفتار از آزمون‌های استاندارد کشش و سختی استفاده شده است. در شکل‌های 4-6 نمونه ورق‌های آنیل‌شده، تحت پاس نخست و پاس دوم مشاهده می‌شود.

#### 4- شبیه‌سازی فرایند پرس کاری شیاری محدود

شبیه‌سازی فرایند پرس کاری شیاری با استفاده از روش اجزا محدود انجام شده است. هدف از این شبیه‌سازی استخراج توزیع کرنش مؤثر در ورق است. از آنجا که کرنش‌های بزرگی در طول این فرایند حادث می‌شود، از نرم‌افزار تخصصی تغییر شکل‌های بزرگ، DEFORM، جهت شبیه‌سازی استفاده شده است. مدل‌سازی با فرض کرنش صفحه و به کارگیری مدل ماده پلاستیک-آسیب انجام شده است. مراحل اعمال پرس کاری مطابق تعریف فرایند با اعمال جابه‌جایی به قالب‌های روی ورق انجام می‌شود. خلاصه‌ای از فرضیات شبیه‌سازی عددی و نحوه مش‌بندی در جدول 1 ارائه شده است. تمام پارامترهای هندسی در جدول 2 و در قسمت نتایج ارائه می‌شود.

#### 5- پیشنهاد یک الگوریتم برای پیش‌بینی رفتار ورق پس از فرایند

همان‌طور که پیشتر در بخش مقدمه یاد شد، ارزیابی تجربی اثر هندسه قالب بر رفتار مکانیکی ورق پرس کاری شده کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است [6]. دلیل این موضوع وجود نداشتن بستر مناسب برای طراحی آزمایش است؛ بنابراین این موضوع منجر به صرف هزینه و زمان در تکرار ساخت قالب‌های جدید و تکرار فرایند است. منظور از «بستر مناسب برای طراحی آزمایشات» امکان تخمین و پیش‌بینی اثر هندسه قالب بر رفتار مکانیکی ورق پرس کاری شده است، تا در چنین شرایطی طراحی مطالعات آزمایشگاهی به صورت بهینه انجام شود. امکان نداشتن پیش‌بینی تغییرات رفتار مکانیکی ورق (در اثر تغییرات در ریز ساختار) به کمک روش‌های عددی مرسوم مانند اجزا محدود از دلایل این خلل است. البته شبیه‌سازی تغییرات اندازه دانه‌بندی نمونه از میکرون به نانو در محاسبات سطح بالاتری مانند روش‌های دینامیک مولکولی قابل انجام است، که با دشواری‌های فراوانی در مدل‌سازی و پردازش داده‌ها همراه است.

هدف آن است که با به کارگیری هم‌زمان شبیه‌سازی عددی، داده‌های آزمایشگاهی از خواص ورق و تغییرات رفتار مکانیکی نمونه تحت پرس کاری با یک قالب شیاردار معین، امکان پیش‌بینی تغییرات رفتار مکانیکی نمونه در سایر انواع قالب فراهم آید. بدین منظور الگوریتمی به صورت شکل 7 تعریف می‌شود.

براساس شکل 7، مراحل الگوریتم پیشنهادی در شش مرحله به شرح زیر است:

- 1- استخراج رفتار الاستیک-پلاستیک ورق: در این مرحله، ورق‌های نخستین تحت عملیات آنیل قرار می‌گیرند. نمونه‌های تست استاندارد کشش از ورق‌ها تهیه می‌شود. رفتار الاستیک-پلاستیک ورق‌های آنیل‌شده براساس تست استاندارد استخراج می‌شود. هدف از این تست تعیین تغییرات تنش برحسب کرنش‌های بزرگ است.

روند محاسبات پیشنهادی در این الگوریتم، می‌تواند به سادگی و فقط با شبیه‌سازی عددی فرایند پرس کاری با هندسه قالب دلخواه، پیش‌بینی مناسبی از رفتار استحکامی ورق نهایی تخمین بزند. این الگوریتم پیش‌بینی دقیقی از نتایج را ارائه خواهد کرد.

## 6- نتایج و بحث

در این بخش به ارزیابی نتایج پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و مطالعه تجربی فرایند پرس کاری شیاری ورق Al 5052 ارائه می‌شود. جهت اختصار از ارائه نتایج شبیه‌سازی به روش اجزا محدود برای سایر نمونه‌ها پرهیز شده است. سپس برای صحت‌گذاری، نتایج پیش‌بینی‌شده توسط این الگوریتم با نتایج تجربی موجود در مراجع و نتایج تجربی حاصل از پرس کاری شیاری ورق Al 5052 مقایسه می‌شود. در نهایت



Fig. 5 The Al 5052 sheet fabricated by one pass of CGP

شکل 5 ورق Al 5052 تحت پاس اول پرس کاری شیاری

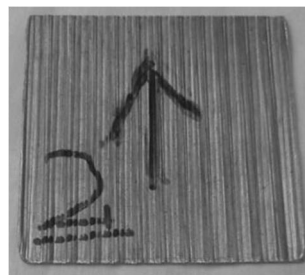


Fig. 6 The Al 5052 sheet fabricated by two passes of CGP

شکل 6 ورق Al 5052 تحت پاس دوم پرس کاری شیاری

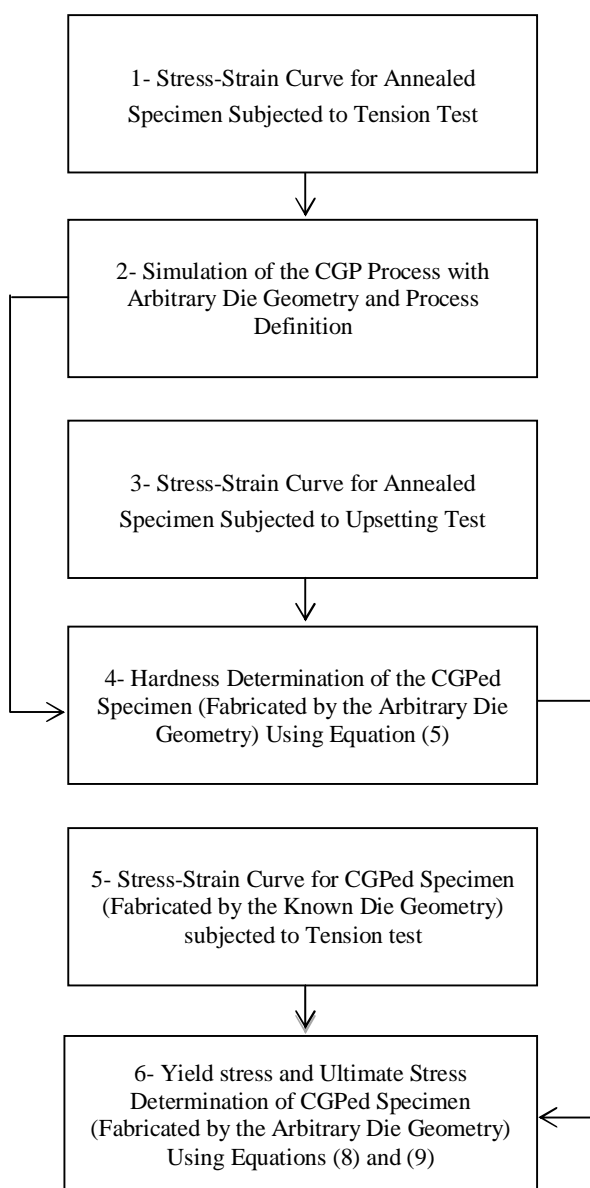


Fig. 7 The algorithm for prediction of die geometry effects on strength behavior of the sheets fabricated by groove pressing process

شکل 7 الگوریتم پیش‌بینی اثر هندسه قالب بر رفتار مکانیکی ورق تحت فرآیند پرس کاری شیاری

3- استخراج رفتار سختی - کرنش ورق: در این مرحله، به کمک انجام تست‌های استاندارد فشار سطحی، تغییرات سختی نمونه برحسب کرنش به صورت تجربی استخراج می‌شود. هدف از این مرحله تعیین ثوابت مادی رابطه (5) است.

4- تعیین سختی ورق پرس‌کاری‌شده: در این مرحله، براساس یافته‌های مراحل 2 و 3 به ترتیب شامل کرنش مؤثر و ثوابت مادی رابطه کرنش - سختی، به کمک رابطه (5) سختی نمونه پرس‌کاری‌شده با یک قالب دلخواه تعیین می‌شود.

5- تعیین تغییر رفتار ورق با ریزساختارسازی دانه‌بندی‌ها: در این مرحله، نمودار تغییرات تنش برحسب کرنش برای یک نمونه از ورق در انتهای هرپاس پرس کاری با یک قالب معین به صورت تجربی استخراج می‌شود. همان‌طور که در شکل 7 نمایش داده شده است، این مرحله مستقل از مراحل پیشین است. هدف از انجام این مرحله تعیین ثابت مادی مورد نیاز در روابط (9,8) است.

6- پیش‌بینی رفتار ورق پس از فرایند پرس کاری با هندسه قالب دلخواه: در این مرحله، پس از تعیین ثوابت مورد نیاز در مرحله 5 و همچنین استخراج سختی ورق پرس کاری با قالب دلخواه در مرحله 4، امکان تعیین استحکام نهایی ورق‌های پرس‌کاری‌شده توسط هر قالب دلخواهی به کمک روابط (9,8) فراهم می‌آید.

بدین ترتیب، بدون نیاز به ساخت انواع قالب‌ها و انجام تست‌های آزمایشگاهی مکرر، امکان ارزیابی و پیش‌بینی پارامترهای هندسی قالب بر رفتار نهایی ورق میسر می‌شود. به کمک شبیه‌سازی عددی فرایند دلخواه در کنار انجام آزمایشات استاندارد کشش و فشار درخصوص تعیین رفتار مکانیکی ورق برای دانه‌بندی‌های مختلف و همچنین استفاده از روابط حاکم بر مشخصه‌های تنش، کرنش و سختی امکان این پیش‌بینی فراهم می‌آید. پژوهشگر باید صرفاً برای یک نمونه قالب معین، عملیات پرس کاری را انجام داده و پس از ریزساختاری‌سازی در انتهای هر مرحله، تست‌های استاندارد یادشده صورت پذیرد. در نهایت با در اختیار داشتن ثوابت مادی مورد نیاز در

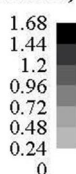
یکنواخت‌تر بودن خواص در نقاط مختلف ورق و مطلوب‌تر بودن نتایج است.

**جدول 2** پارامترهای قالب و نمونه در مطالعه فرایند پرس کاری شیاری

**Table 2** The specimen and die parameters for studies of the CGP process

پارامتر	مقدار	پارامتر
جنس نمونه	آلومینیوم 5052	آلومینیوم خالص
زاویه شیار قالب (Degree)	30, 45, 50	45, 53
عرض شیار قالب (mm)	2	1,3
حداکثر تعداد پاس	2	3
ضخامت نمونه (mm)	2	1,3
ابعاد نمونه (mm× mm)	98× 98	50× 50, 30× 30

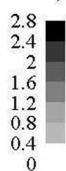
Strain - Effective (mm/mm)



**Fig. 8** Effective strain distribution in Al 5052 sheet subjected to one pass of CGP process

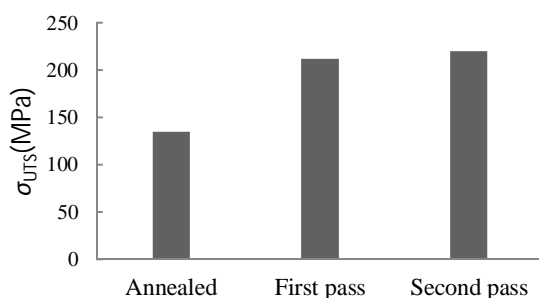
**شکل 8** توزیع کرنش مؤثر در ورق Al 5052 تحت یک پاس پرس کاری شیاری

Strain - Effective (mm/mm)



**Fig. 9** Effective strain distribution in Al 5052 sheet subjected to two passes of CGP process

**شکل 9** توزیع کرنش مؤثر در ورق Al 5052 تحت دو پاس پرس کاری شیاری



**Fig. 10** The ultimate strength of Al 5052 sheets annealed and fabricated by CGP process

**شکل 10** استحکام نهایی ورق‌های Al 5052 تحت فرآیندهای آنیل و پرس کاری شیاری

اثر زاویه شیار قالب بر رفتار مکانیکی ورق پرس کاری شده به کمک این الگوریتم مطالعه می‌شود. در جدول 2 پارامترهای مورد بررسی در ارزیابی نتایج به‌صورت خلاصه ارائه شده است.

## 1-6- نتایج شبیه‌سازی عددی و مطالعه تجربی پرس کاری ورق Al 5052

در شکل‌های 8 و 9 به ترتیب توزیع کرنش مؤثر در ورق به ترتیب در انتهای پاس نخست و پاس دوم ارائه شده است. این مقادیر در تئوری به ترتیب 1.16 و 2.32 پیش‌بینی می‌شود. فرضیات کرنش برشی خالص و نداشتن تغییر شکل برخی از نواحی از جمله علل اختلاف نتایج است. در حقیقت به دلیل کرنش‌های بسیار بزرگ در این تغییر شکل، در محل اعمال نیروی شیار علاوه بر کرنش برشی، کرنش‌های عمودی کششی و فشاری حادث می‌شود، همچنین سایر نواحی نیز کرنش‌های غیر صفر را تحمل می‌کنند؛ بنابراین در ادامه از نتایج کرنش مؤثر حاصل از روش اجزا محدود برای تحلیل استفاده می‌شود.

در شکل 10 تغییرات استحکام نهایی ورق Al 5052 برای نمونه‌های آنیل شده، تحت یک پاس و تحت دو پاس پرس کاری شیاری براساس نتایج تست کشش استاندارد ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، استحکام نهایی برای ورق آنیل شده در حدود 135 MPa است. پس از یک پاس پرس کاری، این تنش به مقدار 212 MPa رسیده است، یعنی استحکام ورق پس از یک پاس پرس کاری شیاری در حدود 60% افزایش یافته است. پس از پرس کاری پاس دوم این مقدار تنها 6% افزایش یافته و به عدد 220 MPa رسیده است. این موضوع اهمیت پرس کاری پاس نخست نسبت به پرس کاری پاس‌های بعدی را نشان می‌دهد.

در شکل 11 درصد تغییر طول نمونه‌های تست کشش در هنگام گسیختگی برای ورق آنیل شده، تحت یک پاس و تحت دو پاس را نمایش می‌دهد. با ریزتر شدن دانه‌بندی‌ها در ورق‌های پرس کاری شده، اگرچه که استحکام افزایش می‌یابد، ولی این موضوع با کاهش شکل‌پذیری نمونه‌ها همراه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییر طول در نمونه آنیل شده، تحت یک پاس و تحت دو پاس به ترتیب، 30%، 12% و 8% است که مبین کاهش تغییر طول ورق‌ها پیش از گسیختگی است. در این کاهش از نمونه تحت یک پاس به نمونه تحت دو پاس بسیار کمتر است.

در شکل 12 تغییرات سختی ویکرز نمونه در راستای عرض ورق برای نمونه‌های آنیل شده، تحت یک پاس و تحت دو پاس برحسب فاصله از لبه،  $D$ ، ارائه شده است. این نمودارها مبین دو نکته حائز اهمیت است. نخست مانند تغییرات تنش نهایی در ورق در طی فرایندها، در این‌جا نیز پس از پاس نخست سختی ویکرز نمونه‌ها در حدود 60 درصد افزایش داشته است، ولی پس از پاس دوم این افزایش بسیار کمتر و در حدود 5 درصد بوده است. نکته دوم مربوط به توزیع سختی در نمونه است. مطابق شکل 12، پس از اعمال پاس دوم پرس کاری، ضمن تغییرات کمینه استحکام و سختی ورق، توزیع کرنش مؤثر و به تبع از آن سختی نمونه یکنواخت‌تر است. این موضوع از جهت طراحی سازه‌ای یا قابلیت اطمینان بالاتر حائز اهمیت است. توزیع یکنواخت و قابل پیش‌بینی خواص مکانیکی در ورق میزان نامعینی‌های احتمالاتی در طراحی را کاهش خواهد داد، به‌طوری‌که در مراجع پارامتری با عنوان «ضریب غیر یکنواختی»<sup>1</sup> به‌صورت رابطه (10) تعریف می‌شود. به هر میزان که مقدار این پارامتر در یک نمونه کوچک‌تر باشد، به معنی

<sup>1</sup> Inhomogeneity Factor (I.F.)

است.

## 6-2- صحنه‌گذاری الگوریتم

در این بخش نتایج حاصل از پیش‌بینی الگوریتم پیشنهادی با نتایج تجربی موجود در مراجع و همچنین مطالعات تجربی این پژوهش ارائه می‌شود. از جمله مزایای این الگوریتم، امکان ارزیابی تغییرات فرایند مانند هندسه شیارهای قالب یا تعریف یک پاس پرس کاری بر خواص مکانیکی ورق نهایی است. این موضوع بدون احتیاج به تکرار آزمایشات تجربی برای هندسه‌های جدید قالب و صرفاً با شبیه‌سازی عددی فرایندهای جدید و به‌کارگیری تئوری‌های بخش 2 در الگوریتم شکل 7 انجام می‌شود.

در سال 2011، مرتب و همکاران [16] به بررسی پرس کاری شیاری محدود در ورق‌های آلومینیوم خالص پرداختند. نتایج مطالعات تجربی ایشان نشان داد که تنش تسلیم و استحکام نهایی نمونه‌های ریزساختار شده نسبت به نمونه‌های نخستین می‌تواند به ترتیب تا 2.3 و 1.5 برابر افزایش یابد. ایشان مطالعات خود را در 4 پاس پرس کاری انجام دادند. مطابق الگوریتم پیشنهادی فرایند پرس کاری پژوهش ایشان در نرم‌افزار DEFORM شبیه‌سازی شد. براساس توزیع کرنش مؤثر حاصل از روش اجزا محدود، داده‌های آزمایشگاهی مربوط به تست کشش و فشار نمونه‌های آنیل شده آلومینیوم خالص و همچنین پارامتر  $n^*$  برای این ماده، مقادیر سختی و تنش تسلیم براساس الگوریتم پیش‌بینی شد. مقایسه سختی و تنش تسلیم نمونه‌ها حاصل از مطالعه تجربی مرجع [16] و نتایج این پژوهش به ترتیب در جداول 3 و 4 ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان خطا کمتر از 7 درصد است. البته از آن‌جا که در پاس چهارم پرس کاری ورق‌ها دچار نرم‌شوندگی پلاستیک شده‌اند، روش پیشنهادی به شکل کنونی امکان پیش‌بینی این تغییر رفتار در پاس آخر را نداشته است که از ارائه آن نیز پرهیز شده است. نکته دیگری که در نتایج جدول 3 و 4 قابل مشاهده است کاهش تغییرات رفتار مکانیکی ورق‌ها با افزایش تعداد پاس پرس کاری است. در واقع در پاس نخست پرس کاری عمده تغییر رفتار مکانیکی ورق‌ها حادث می‌شود و در پاس‌های پسین یکنواخت‌تر شدن رفتار ورق در تمام نقاط نمونه به همراه خواهد بود.

در جدول 5 و 6 به ترتیب تغییرات سختی و تنش تسلیم برای ورق Al 5052 ارائه شده است. این نتایج برای ورق تحت یک و دوپاس پرس کاری و براساس مطالعات تجربی این پژوهش و نتایج پیش‌بینی توسط الگوریتم پیشنهادی مشاهده می‌شود. مطابق نتایج، بیشتر اختلاف در حدود 3 درصد است. این موضوع بیانگر قابلیت پیش‌بینی تغییرات استحکام ورق‌ها با ریزساختار شدن آن‌ها در اثر فرایند پرس کاری شیاری محدود است. البته این الگوریتم محدود به روش پرس کاری شیاری نخواهد بود و امکان ارزیابی آن در سایر فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید نیز میسر است.

تمام نتایج بالا برای قالبی با زاویه شیار مرسوم 45 درجه بوده است، اما برای ارزیابی قابلیت پیش‌بینی تغییر رفتار ورق در اثر تغییرات هندسه قالب، به مقایسه نتایج این الگوریتم با محدود مطالعات تجربی موجود در مراجع در زمینه اثر هندسه قالب پرداخته می‌شود. همان‌طور که در بخش مقدمه یاد شد، در سال 2012 برهانی و جوانرودی [2] به مطالعه تجربی اثر زاویه شیار قالب بر رفتار مکانیکی ورق آلومینیوم خالص پرس کاری شده پرداختند. در آن تحقیق از دو زاویه 45 و 53 درجه برای شیار قالب استفاده شد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که درصد افزایش تنش تسلیم، تنش نهایی و سختی ورق در پاس نخست در هنگام به‌کارگیری قالب شیاردار با زاویه 53 درجه

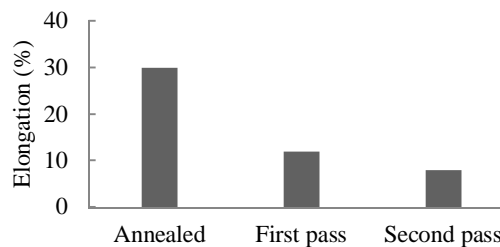


Fig. 11 The elongation of Al 5052 sheets annealed and fabricated by CGP process

شکل 11 کشیدگی ورق‌های Al 5052 تحت فرایندهای آنیل و پرس کاری شیاری

$$I.F. = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(HV_i - HV_{ave})^2}{n-1}}}{HV_{ave}} \quad (10)$$

که در آن  $I.F.$  ضریب ناهمگنی،  $HV_i$  سختی ویکرز در نقطه دلخواه  $i$ -ام،  $HV_{ave}$  میانگین سختی‌های ویکرز برای  $m$  نقطه دلخواه است. در شکل 13 ضریب ناهمگنی برای نمونه‌های آنیل‌شده، تحت یک پاس و تحت دو پاس ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگر چه پس از پاس اول پرس کاری، میزان استحکام و سختی نمونه افزایش قابل توجهی دارد، اما این افزایش با یک توزیع غیریکنواخت‌تر نسبت به ورق آنیل‌شده همراه است. این در حالی است که در پاس دوم، برخلاف پاس اول، همراه با تغییرات ناچیز استحکام و سختی، توزیع یکنواخت‌تر از کرنش مؤثر و خواص مکانیکی در ورق قابل مشاهده است. این موضوع اهمیت مراحل بالاتر پرس کاری را تأکید دارد؛ بنابراین تخمین استحکام و سختی ورق براساس خواص ورق تحت یک پاس پرس کاری مورد اهمیت است. در بیشتر مراجع نیز [15] تغییرات خواص در پاس‌های بعدی بسیار کمتر از تغییرات خواص در پاس اول گزارش شده

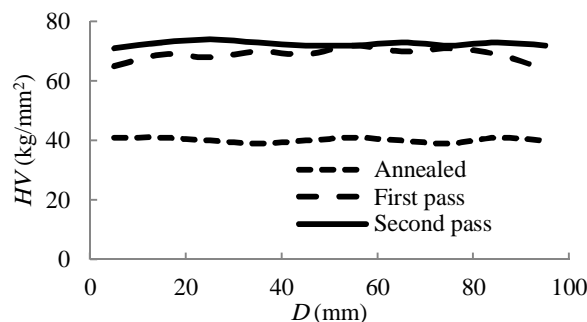


Fig. 12 The Vickers hardness distribution in Al 5052 sheets annealed and fabricated by CGP process

شکل 12 توزیع سختی ویکرز در ورق‌های Al 5052 تحت فرایندهای آنیل و پرس کاری شیاری

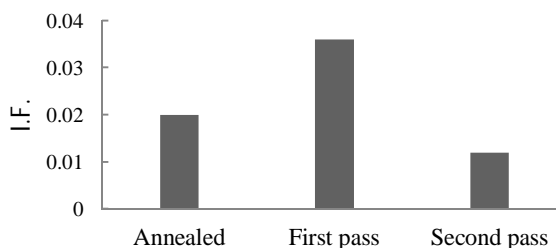


Fig. 13 The inhomogeneity factor of Al 5052 sheets annealed and fabricated by CGP process

شکل 13 ضریب ناهمگنی در ورق‌های Al 5052 تحت فرایندهای آنیل و پرس کاری شیاری

**جدول 4** مقایسه تنش تسلیم آلومینیوم خالص پرس کاری شده به‌دست‌آمده در مرجع [16] و پیش‌بینی الگوریتم پیشنهادی

**Table 4** The comparison of the CGPed pure aluminum Yield stress obtained by [16] and predicted by proposed algorithm

روش / تعداد پاس	1	2	3
تنش تسلیم (MPa)، آزمایش [16]	85	97	105
تنش تسلیم (MPa)، الگوریتم پیشنهادی	84	94	100
خطا (%)	-1.18	-3.1	-4.8

**جدول 5** مقایسه سختی Al 5052 پرس کاری شده به‌دست‌آمده از آزمایش و پیش‌بینی الگوریتم پیشنهادی

**Table 5** The comparison of the CGPed Al 5052 sheet Vickers hardness obtained by experiment and predicted by proposed algorithm

روش / تعداد پاس	1	2
سختی ویکرز (kg/mm <sup>2</sup> )، آزمایش	68.7	72.5
سختی ویکرز (kg/mm <sup>2</sup> )، الگوریتم پیشنهادی	70.2	71.5
خطا (%)	2.2	-1.4

**جدول 6** مقایسه تنش تسلیم ورق Al5052 به‌دست‌آمده در مطالعه تجربی و الگوریتم پیشنهادی

**Table 6** The comparison of the Al 5052 Yield stress hardness of obtained by experiment and proposed algorithm

روش / تعداد پاس	1	2
تنش تسلیم (MPa)، آزمایش	160	167
تنش تسلیم (MPa)، الگوریتم پیشنهادی	161.65	164.4
خطا (%)	1.03	-1.5

**جدول 7** مقایسه سختی به‌دست‌آمده در مرجع [2] و الگوریتم پیشنهادی

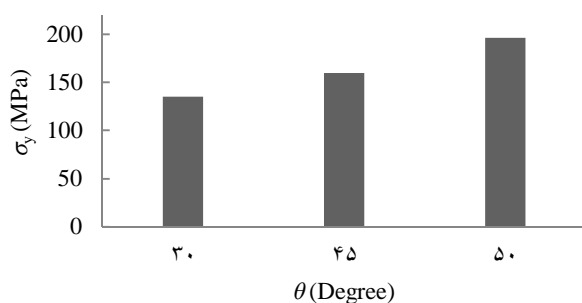
**Table 7** The comparison of the Vickers hardness obtained by [2] and proposed algorithm

روش / تعداد پاس	1	2
سختی ویکرز (kg/mm <sup>2</sup> )، آزمایش [2]	85	100.5
سختی ویکرز (kg/mm <sup>2</sup> )، الگوریتم پیشنهادی	83.2	94.9
خطا (%)	-1.35	5.1

**جدول 8** مقایسه تنش تسلیم به‌دست‌آمده در مرجع [2] و الگوریتم پیشنهادی

**Table 8** The comparison of the Yield stress hardness obtained by [2] and proposed algorithm

روش / تعداد پاس	1	2
تنش تسلیم (MPa)، آزمایش [2]	85	97
تنش تسلیم (MPa)، الگوریتم پیشنهادی	84	94
خطا (%)	-1.18	-3.1



**Fig. 14** The effect of groove angle on yield stress of Al 5052 sheet fabricated by one pass of CGP process

**شکل 14** تأثیر زاویه شیار بر تنش تسلیم ورق Al 5052 تحت یک پاس پرس کاری شیاری

بیشتر از پارامترهای مشابه در هنگام به‌کارگیری قالب شیاردار با زاویه 45 درجه است، ولی با قالب دوم تعداد بیشتر پاس پرس کاری تا پیش از گسیختگی ورق قابل انجام شده است. در جداول 7 و 8 به ترتیب نتایج سختی ویکرز و تنش تسلیم در انتهای پاس نخست و دوم برای آلومینیوم خالص تحت پرس کاری با قالب شیاردار 53 درجه ارائه شده است. نتایج تجربی [2] با نتایج حاصل از پیش‌بینی الگوریتم پیشنهادی مقایسه شده است. مقایسه نتایج حاکی از تطابق مناسب و اختلاف بیشینه 5.1% است؛ بنابراین الگوریتم پیشنهادی به سادگی امکان پیش‌بینی تغییر رفتار مکانیکی ورق در اثر تغییرات هندسه شیار قالب‌ها را فراهم کرده است. این موضوع امکان ارزیابی وسیع‌تر این فرایند در آینده را میسر می‌کند. از جمله اشکالات فرایند پرس کاری شیاری، ایجاد سطوح نامطلوب در انتهای فرایند است که به‌کارگیری این الگوریتم در کنار مطالعات تجربی امکان بهره‌مندی از نمونه‌هایی برای صافی سطح مناسب‌تر را فراهم خواهد کرد. این الگوریتم هزینه‌های مالی و زمانی تهیه انواع قالب را تا حدود بسیاری کاهش می‌دهد و ابزار مناسبی برای طراح در تسریع انتخاب قالب بهینه خواهد بود.

### 3-6- اثر زاویه شیار

پس از مطالعه تجربی و عددی تغییر رفتار ورق Al 5052 در طی ریزساختارسازی، که در صنعت خودروسازی دنیا بسیار مورد توجه است، همچنین ارزیابی صحت پیش‌بینی الگوریتم پیشنهادی، به مطالعه اثر زاویه شیار قالب بر نتایج سختی و تنش تسلیم ورق پرداخته می‌شود. بدین منظور سه زاویه 30، 45 و 50 درجه برای شیارهای قالب در نظر گرفته شده است. مطابق الگوریتم شکل 8، روند پیش‌بینی نتایج صورت پذیرفت. در شکل 14 مقادیر تنش تسلیم ورق یک پاس پرس کاری شیاری شده با سه قالب مختلف نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه شیار تنش تسلیم ورق نهایی بیشتر می‌شود. البته این موضوع با محدودیت‌هایی نیز مواجه است. ایجاد ترک‌های سطحی در قالب‌هایی با زوایای بزرگ‌تر از جمله مشکلات است، که در نتیجه، با افزایش زاویه شیار، تعداد پاس‌های قابل اعمال پیش از گسیختگی ورق کاهش می‌یابد. گسیختگی ورق‌ها تحت این شرایط در مدل‌سازی عددی و طی به‌کارگیری الگوریتم قابل مطالعه است، که در اینجا از ارائه آن پرهیز می‌شود.

در شکل 15 توزیع سختی ویکرز در عرض نمونه‌های تحت پرس کاری با زاویه شیار قالب 30، 45 و 50 ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه شیار قالب میزان سختی نمونه بزرگ‌تر شده است. میانگین سختی این نمونه‌ها در شکل 16 ترسیم شده است. با افزایش زاویه شیار از 30 درجه به 45 درجه، سختی نمونه‌ها بیش از 15% افزایش یافته است، همچنین با افزایش زاویه به 50 درجه، سختی ویکرز 45% بزرگ‌تر و به عدد 85 می‌رسد. علاوه بر بروز آسیب‌های سطحی، افزایش بیش از اندازه زاویه شیار

**جدول 3** مقایسه سختی ویکرز آلومینیوم خالص پرس کاری شده به‌دست‌آمده در

مرجع [16] و پیش‌بینی الگوریتم پیشنهادی

**Table 3** The comparison of the CGPed pure aluminum Vickers hardness obtained by [16] and predicted by proposed algorithm

روش / تعداد پاس	1	2	3
سختی ویکرز (kg/mm <sup>2</sup> )، آزمایش [16]	37	40	40.5
سختی ویکرز (kg/mm <sup>2</sup> )، الگوریتم پیشنهادی	36.5	40.6	43.3
خطا (%)	-1.35	1.5	6.9



ریزساختار سازی منجر به افزایش استحکام و سختی نمونه‌ها و کاهش شکل‌پذیری آن‌ها می‌شود. از جمله مسائل کلیدی در به‌کارگیری این فرایند، طراحی شیارهای قالب و طراحی تعریف مراحل پرس کاری فرایند در هر پاس برای هدایت فرایند جهت نیل به ورقی با خصوصیات مطلوب بوده است. از آن‌جا که مطالعه تجربی اثر هندسه قالب پرهزینه و زمان‌بر است، در این مطالعه سعی شد تا یک الگوریتم ساده برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی ورق‌های پرس‌کاری شده ارائه شود. این الگوریتم بر پایه تئوری‌های حاکم بر تغییرات رفتار مکانیکی ورق‌ها با تغییرات دانه‌بندی و همچنین شبیه‌سازی فرایند بوده است. به‌کارگیری این الگوریتم در کنار داده‌های تجربی از تست کشش و فشار نمونه امکان تخمین تنش تسلیم و سختی ورق در انتهای هر پاس پرس کاری را مهیا ساخته است و پژوهشگر احتیاجی به ساخت انواع قالب و تکرار آزمایش با هر یک از آن‌ها را نخواهد داشت. این الگوریتم فرایند طراحی قالب بهینه را تسریع می‌بخشد. فرایند پرس کاری شیار آلایژ Al 5052 به‌صورت تجربی انجام شد. نتایج استحکام تسلیم و سختی ویکرز برگرفته از تست‌های استاندارد نمونه آنیل‌شده، تحت پاس نخست و تحت پاس دوم از این آلایژ مؤید پیش‌بینی الگوریتم پیشنهادی بوده است. سپس از این الگوریتم برای پیش‌بینی داده‌های تجربی موجود در مراجع درخصوص پرس کاری آلومینیوم خالص با قالب‌های مختلف استفاده شد که نتایج حاکی از دقت بالای مقادیر تخمین‌زده‌شده داشته است. ارزیابی اثر زاویه شیار قالب بر رفتار مکانیکی ورق پرس‌کاری شده به کمک این الگوریتم انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه شیار از 30 به 50 درجه، تنش تسلیم و سختی نمونه‌ها در حدود 45% بیشتر می‌شود. در نهایت در خصوص محدودیت‌های این الگوریتم به نداشتن امکان پیش‌بینی نرم‌شوندگی تناوبی در پاس‌های بالا و همچنین محدودیت دقت نتایج در گرو محدودیت دقت شبیه‌سازی عددی بحث شد. به‌کارگیری مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی انواع رفتار ورق‌ها، مانند آسیب‌های سطحی، امکان توسعه را فراهم می‌کند.

## 8- فهرست علائم

D	فاصله از لبه ورق (mm)
HV	سختی ویکرز ( $\text{kgmm}^{-2}$ )
I. F.	ضریب ناهمگنی
K	ضریب سختی
t	عرض شیار (mm)
$\epsilon$	کرنش
$\theta$	زاویه شیار (Degree)
$\sigma$	تنش (MPa)

## بالانویس‌ها

n	توان سخت‌شوندگی
n *	شاخص ارتباط استحکام و سختی

## زیرنویس‌ها

ave	میانگین
eff	مؤثر
uts	نهایی
x, y, z	جهات دستگاه مختصات
y	تسلیم

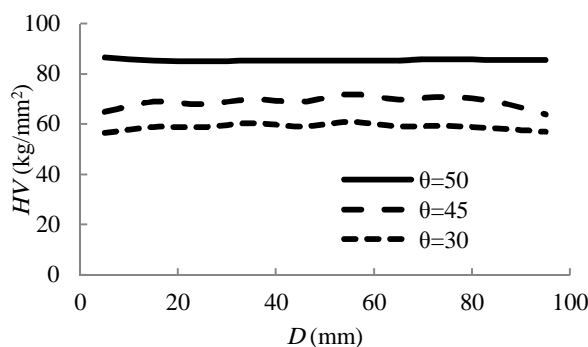


Fig. 15 The effect of groove angle on Vickers hardness distribution in Al 5052 sheet fabricated by one pass of CGP process

شکل 15 تأثیر زاویه شیار بر توزیع سختی ویکرز در ورق Al 5052 تحت یک پاس پرس کاری شیاری

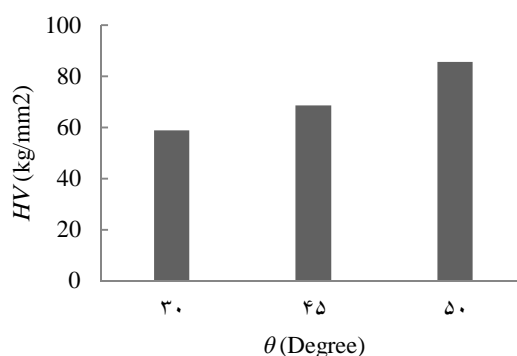


Fig. 16 The effect of groove angle on Vickers hardness of Al 5052 sheet fabricated by one pass of CGP process

شکل 16 تأثیر زاویه شیار بر سختی ویکرز ورق Al 5052 تحت یک پاس پرس کاری شیاری

می‌تواند منجر به ناپایداری تغییر شکل برشی خالص نیز گردد.

## 6-4- محدودیت‌ها و امکان توسعه

الگوریتم پیشنهادی امکان پیش‌بینی رفتار ورق در طی فرایند پرس کاری شیاری را فراهم کرده است، ولی از جمله محدودیت‌ها این الگوریتم نداشتن امکان پیش‌بینی رفتارهایی مانند نرم‌شوندگی تناوبی در تعداد پاس‌های بالا اشاره کرد. پیش‌بینی رفتارهایی مانند نرم‌شوندگی تناوبی با تجویز داده‌های آزمایشگاهی در قالب مدل‌های ریاضی به این الگوریتم قالب انجام است. همچنین محدودیت در شبیه‌سازی عددی فرایند با فرض‌های ساده‌ساز مهندسی امکان پیش‌بینی انواع رفتارهای ماکروسکوپی ورق را محدود خواهد کرد. بدیهی است که مدل‌سازی دقیق‌تر فرایند، مانند شبیه‌سازی سه بعدی به جای به‌کارگیری فرض کرنش صفحه‌ای و همچنین استفاده از مدل‌های آسیب در تعریف رفتار مواد، می‌تواند منجر به توسعه کاربری این الگوریتم نیز شود. بدیهی است که چنین الگوریتم‌های قابل توسعه به انواع روش‌های تغییر پلاستیک شدید نیز خواهد بود.

## 7- جمع‌بندی

در این پژوهش به بررسی تغییر رفتار آلومینیوم خالص و آلایژ Al 5052 در اثر فرایند پرس کاری شیار پرداخته شد. این فرایند با اعمال کرنش‌های برشی شدید سبب ریزتر شدن ابعاد دانه‌بندی از میکرون و نانو می‌شود. این

## 9- مراجع

- aluminum sheets processed by groove pressing, *Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 11, pp. 1511-1516, 2010.
- [10] S. S. Satheesh Kumar, T. Raghu, Structural and mechanical behaviour of severe plastically deformed high purity aluminium sheets processed by constrained groove pressing technique, *Materials & Design*, Vol. 57, No. 1, pp. 114-120, 2014.
- [11] F. O. Sonmez, A. Demir, Analytical relations between hardness and strain for cold formed parts, *Materials processing technology*, Vol. 186, No. 1, pp. 163-173, 2007.
- [12] Y. M. Podrezov, *Nanostructured Materials by High-Pressure Severe Plastic Deformation*, First Edition, pp. 161-168: Springer Netherlands, 2006.
- [13] F. Khodabakhshi, M. Haghsheenas, H. Eskandari, B. Koohbor, Hardness-strength relationships in fine and ultra-fine grained metals processed through constrained groove pressing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 636, No. 1, pp. 331-339, 2015.
- [14] I. N. Fridlyander, V. G. Sister, O. E. Grushko, V. V. Berstenev, L. M. Sheveleva, L. A. Ivanova, Aluminum alloys: promising materials in the automotive industry, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 44, No. 9-10, pp. 365-370, 2002. English
- [15] E. Hosseini, M. Kazeminezhad, Nanostructure and mechanical properties of 0-7 strained aluminum by CGP: XRD, TEM and tensile test, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 526, No. 1, pp. 219-224, 2009.
- [16] S. Morattab, K. Ranjbar, M. Reihanian, On the mechanical properties and microstructure of commercially pure Al fabricated by semi-constrained groove pressing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 22, pp. 6912-6918, 2011.
- [1] D. H. Shin, J.-J. Park, Y.-S. Kim, K.-T. Park, Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 328, No. 1-2, pp. 98-103, 2002.
- [2] M. Borhani, F. Djavanroodi, Rubber pad-constrained groove pressing process: Experimental and finite element investigation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 546, No. 1, pp. 1-7, 2012.
- [3] A. Sajadi, M. Ebrahimi, F. Djavanroodi, Experimental and numerical investigation of Al properties fabricated by CGP process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 552, No. 1, pp. 97-103, 2012.
- [4] K. Peng, L. Su, L. L. Shaw, K.-W. Qian, Grain refinement and crack prevention in constrained groove pressing of two-phase Cu-Zn alloys, *Scripta Materialia*, Vol. 56, No. 11, pp. 987-990, 2007.
- [5] K. Peng, Y. Zhang, L. L. Shaw, K.-W. Qian, Microstructure dependence of a Cu-38Zn alloy on processing conditions of constrained groove pressing, *Acta Materialia*, Vol. 57, No. 18, pp. 5543-5553, 2009.
- [6] Z.-S. Wang, Y.-J. Guan, G.-C. Wang, C.-K. Zhong, Influences of die structure on constrained groove pressing of commercially pure Ni sheets, *Materials Processing Technology*, Vol. 215, No. 1, pp. 205-218, 2015.
- [7] A. Shirdel, A. Khajeh, M. Moshksar, Experimental and finite element investigation of semi-constrained groove pressing process, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 2, pp. 946-950, 2010.
- [8] M. Ebrahimi, S. Attarilar, F. Djavanroodi, C. Gode, H. Kim, Wear properties of brass samples subjected to constrained groove pressing process, *Materials & Design*, Vol. 63, No. 1, pp. 531-537, 2014.
- [9] G. G. Niranjana, U. Chakkingal, Deep drawability of commercial purity