

## بررسی اثر فرآیند ECAP با استفاده از قالبی با طرح جدید بر سختی آلیاژ ۷۰۷۵ AL

**بهزاد عباس زاده** دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، abbaszadeh7676@gmail.com  
**محمد مراد شیخی\*** دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، m.sheikhi@sru.ac.ir  
**محمد مقداد فلاح** استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، m.fallah@sru.ac.ir  
**سیدمحمد عرب** استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، m.arab@uma.ac.ir

### چکیده

یکی از روش‌های استحکام بخشی و افزایش سختی مواد، اصلاح ریزساختار با کمک فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد. از جمله روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، روش پرس در کانال زاویه‌دار همسان (ECAP) می‌باشد. دو موضوع بسیار کلیدی شامل (۱) نیروی سنبه مورد نیاز بسیار زیاد، و (۲) کماتش سنبه قالب مانع استفاده گسترده از این روش در صنعت شده است. در این مقاله طرح جدیدی برای سنبه قالب ECAP ارائه شده، که علاوه بر کاهش نیروی سنبه، مشکل کماتش سنبه نیز حل می‌شود. هدف اصلی در این مقاله، بررسی تاثیر پارامترهای فرایند شامل دمای فرآیند (۱۰۰-۲۰۰-۳۰۰) بر حسب درجه سلسیوس، روانکاری (خشک و گرافیت) و تعداد مرحله (۱-۲-۳) بر سختی نمونه آلیاژ ۷۰۷۵ آلومینیوم و تعیین سطوح بهینه آنها در طرح جدید قالب ECAP می‌باشد. در این مطالعه به منظور گردآوری داده‌های تجربی از طرح تاگوجی استفاده شده است. با استفاده از نسبت S/N، سطوح بهینه پارامترها به منظور بیشینه کردن سختی ماده تعیین شده‌اند. براساس تحلیل واریانس به ترتیب دمای فرآیند و تعداد پاس بیشترین تاثیر را در میزان سختی قطعه خروجی دارد. ولی شرایط روانکاری تاثیر معنی داری در میزان سختی قطعه کار خروجی ندارد.

**واژه‌های کلیدی:** تغییر شکل پلاستیک شدید، ECAP، سختی، نسبت سیگنال به نویز، طراحی آزمایش، تحلیل واریانس.

### Investigating the effect of the new ECAP process on the hardness of the post ECAP Al7075 samples

**B. Abbaszadeh** Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran  
**M. M. Sheikhi** Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran  
**M. Meghdad Fallah** Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran  
**S. M. Arab** Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil 56199-11367, Iran.

### Abstract

One of the main methods for strengthening and increasing the hardness of the materials is the use of the severe plastic deformation (SPD) processes. Equal channel angular pressing (ECAP) method is one of the SPD methods. Two challenging issues including (1) the very high required punching force, and (2) the deflection of the punch restrict the application of the method in industry. In this paper, a new design of ECAP process is proposed, which in addition to reducing the punching force, eliminates the deflection problem. The main purpose of this paper is to investigate the effect of the process parameters including process temperature (100-200-300) °C, lubrication (dry and graphite) and the number of ECAP passes (1-2-3) on the hardness of 7075 aluminum material and determining their optimal levels. The Taguchi design is used for design of experiment and the S/N ratio is used to find the optimal levels of the parameters and to maximize the hardness of the material. Based on the analysis of the variance, the process temperature and the number of ECAP passes have the greatest effect on the hardness of the post ECAP samples. However, the lubrication condition has not a significant effect on the hardness of the post ECAP samples in all temperatures.

**Keywords:** Severe Plastic Deformation, ECAP, Hardness, Signal to noise ratio, design of experiment, analysis of variance.

### ۱-مقدمه

ماده، افزایش استحکام با کاهش قابل اغماز در شکل‌پذیری ماده همراه می‌باشد [۳]. بر اساس رابطه‌ی هال-پچ (معادله ۱)، خواص استحکامی مواد به اندازه‌ی متوسط دانه در ریزساختار مرتبط می‌شود [۴].

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (1)$$

که در آن  $\sigma_0$  تنش اصطکاکی،  $d$  اندازه‌ی متوسط دانه،  $\sigma_y$  استحکام تسلیم و  $k_y$  ثابت تسلیم است. رابطه هال - پچ نشان می‌دهد که استحکام ماده با عکس جذر اندازه‌ی دانه رابطه دارد. به عبارت دیگر با ریز شدن اندازه دانه های میکروساختاری استحکام ماده افزایش می‌یابد. یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، روش پرس در کانال زاویه‌دار همسان (ECAP) می‌باشد. در فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار

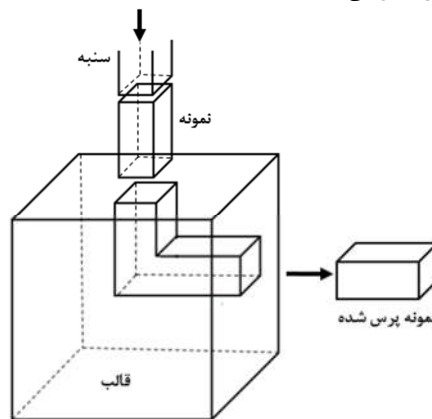
در صنعت ساخت، تولید قطعات با استحکام بالا و هزینه کم اهمیت زیادی دارد، عملیات استحکام بخشی قطعات یکی از عوامل تاثیرگذار بر روی کیفیت محصول تولیدی به شمار می‌آید [۱]. روش‌های گوناگونی برای بهبود خواص مکانیکی فلزات و آلیاژها وجود دارد. از میان روش‌های مختلف تولید قطعات با استحکام بالا، ایجاد ساختارهای نانو و فوق ریزدانه کردن قطعه با استفاده از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید فلزات به عنوان روشی موثر و کاربردی پذیرفته شده است [۲]. در بیشتر روش‌های استحکام بخشی، افزایش استحکام ماده به خرج کاهش شکل‌پذیری ماده به وقوع می‌پیوندد؛ اما در روش کاهش اندازه دانه‌های

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.sheikhi@sru.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۱/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۹/۲۸

همسان، نمونه اغلب به کانال ورودی یک قالب با دو کانال متقاطع و با سطح مقطع یکسان که نسبت به هم زاویه‌دار هستند اکستروژن می‌شود. نمونه‌های مورد استفاده معمولاً استوانه‌ای یا چهارگوش هستند و پس از برش در محل تقاطع دو کانال و اعمال کرنش بالا روی نمونه، از کانال دیگر خارج می‌شود [۵]. شکل ۱ قالب پرس در کانال زاویه‌دار همسان را نشان می‌دهد.



شکل ۱- قالب و فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار همسان

طرح‌های مختلفی برای بهینه‌سازی فرآیند ECAP ارائه شده است. یکی از مهمترین نمونه‌ها، استفاده از فشار پشتی در کانال افقی می‌باشد که قطعات با کیفیت‌تری به دست می‌دهد [۶]. از دیگر طرح‌های موفق می‌توان به فرآیندهای ECAP اکستروژن جانبی دو کانال مساوی [۷]، ECAP تکراری با اکستروژن جانبی [۸]، ECAP به کمک امواج اولتراسونیک [۹] اشاره کرد. از بین روش‌های مذکور ECAP به کمک امواج اولتراسونیک بیشترین تاثیر را در مقدار نیروی سنبه دارد.

آلیاژ ۷۰۷۵ از سری آلیاژهای آلومینیوم است که در آن روی به‌عنوان عنصر اصلی آلیاژی به حساب می‌آید. از مزایای آن می‌توان به استحکام قابل‌مقایسه با بسیاری از فولادها، استحکام خستگی خوب و سطح متوسط ماشین‌کاری و از معایب آن می‌توان به مقاومت کم‌تر در برابر خوردگی در مقایسه با بسیاری از آلیاژهای آلومینیومی اشاره کرد. آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ از مهم‌ترین آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا به شمار می‌رود که به‌صورت گسترده‌ای برای ساخت اجزاء مختلف در صنایع هوافضا، دفاعی و نظامی به کار می‌رود [۱۰].

تاثیر فرآیند ECAP بر میزان مقاومت به خزش آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ توسط محققین مطالعه شده است [۱۱]. بر اساس نتایج ایشان، انجام تعداد یک پاس فرآیند ECAP بر روی آلیاژ ۷۰۷۵، باعث بهبود مقاومت به خزش این آلیاژ می‌شود، با این وجود تعداد پاس‌های بیشتر تاثیر چندانی بر خواص خزش ندارد. همچنین نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پاس‌های ECAP ضریب اصطکاک آلومینیوم ۷۰۷۵ کاهش پیدا می‌کند [۱۲].

شکل‌پذیری آلیاژهای سری ۷۰۰۰ در فرآیند ECAP در دمای اتاق دارای محدودیت می‌باشد. عموماً برای حل این محدودیت می‌توان با تغییر و تنظیم پارامترهای فرآیند این نوع آلیاژها را ECAP کرد. استفاده از دمای بالا در فرآیند ECAP برای موادی که شکل‌پذیری کمتری دارد، مفید می‌باشد. [۱۳ و ۱۴].

سختی یکی از خواص مکانیکی مهم مواد است. سختی مناسب باعث ایجاد مقاومت به خستگی، و مقاومت به سایش مناسب در قطعه کار می‌شود. سختی قطعه‌کار که از جمله مهمترین مشخصه‌های مکانیکی تغییر یافته پس از فرآیند ECAP می‌باشد، که تحت تاثیر مقادیر پارامترهای تنظیمی فرآیند ECAP قرار دارد. دما، زاویه قالب، مسیر انجام فرآیند، زاویه انحناء، سرعت سنبه، تعداد پاس‌های ECAP از پارامترهای مهم در فرآیند می‌باشد که مطالعه و بررسی کم و کیف آن‌ها جهت کنترل و مهندسی خواص مواد ضروری است [۱۵ و ۱۶]. یکی از پارامترهای مورد مطالعه در این مقاله، پارامتر دما می‌باشد. هدف از مطالعه دما بررسی احتمال رخداد پدیده‌های بازبایی مانند تبلور مجدد دینامیکی در کنار پدیده‌هایی مانند رشد دانه‌های میکروساختاری است. در واقع ممکن است با افزایش دما تا یک محدوده‌ی مشخص دو پدیده‌ی ریزدانه شدن در اثر تبلور مجدد دینامیکی و رشد دانه‌ها، به تعادل رسیده و پس از آن افزایش اندازه دانه و در نتیجه کاهش سختی رخ دهد. در کنار پارامتر دما، پارامتر روانکاری تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار مورد نیاز نیروی سنبه دارد. از این جهت روانکاری می‌تواند سختی را نیز تحت تاثیر قرار دهد. لذا در این مطالعه، اثر روانکاری بر روی مقدار سختی مطالعه شده است. اثر تعداد پاس بر افزایش سختی قبلاً در مطالعات متعدد گزارش شده است. با این وجود تاثیر تعداد پاس‌های ECAP در دماهای مختلف، و نیز برهم کنش این پارامترها با سایر پارامترها مطالعه نگردیده است. لذا در این مقاله، اثر پارامترهای دمای فرآیند، تعداد پاس و روانکاری در فرآیند ECAP آلومینیوم ۷۰۷۵ با قالب جدید بر مقدار سختی نمونه ECAP شده مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر بهینه پارامترها برای بدست آوردن حداکثر سختی بدست آمده است.

جدول ۱- مقادیر متغیر پارامترهای فرآیند

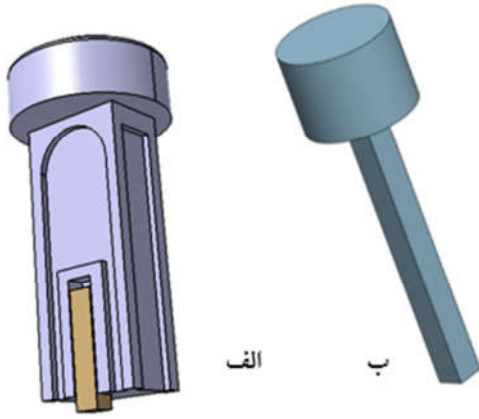
نوع روانکار	تعداد پاس	دمای قالب (درجه سلسیوس)	سطح اول
بدون روانکار	۱	۱۰۰	سطح اول
با روانکار (گرافیت)	۲	۲۰۰	سطح دوم
ندارد	۳	۳۰۰	سطح سوم

جدول ۲- مقادیر ثابت پارامترهای فرآیند

پارامتر	بازه
سرعت پرس	۱۰ میلی متر بر دقیقه
زاویه قالب	۹۰ درجه
زاویه انحناء	۱۵ درجه

## ۲- طراحی آزمایش

برای بررسی تاثیر هر کدام از پارامترهای فرآیند بر سختی محصول تولیدی با فرآیند ECAP طرح جدید، از طراحی آزمایش تاگوچی به کمک نرم افزار Minitab استفاده شده است. بدین منظور ابتدا از بین همه پارامترهای فرآیند، موثرترین آنها انتخاب و سطوح مربوطه براساس مطالعه و تجربه عملی در محدوده منطقی و مناسب انتخاب شد. سه فاکتور مهم دمای قالب، تعداد پاس‌ها و نوع روانکاری برای بررسی انتخاب گردیده و بقیه فاکتورهای اثرگذار ثابت در نظر گرفته شد. با



شکل ۲- الف) طرح نوین سنبه، ب) طرح سنتی سنبه

قالب از فولاد گرم کار با قابلیت عملیات حرارتی ساخته شد. برای گرم کردن قالب از ۴ المنت فشنگی ۲۰۰ وات و یک ترموکوپل برای اندازه گیری و کنترل دمای قالب استفاده شد. جهت انجام عملیات بر روی نمونه های اولیه، قالب بر روی پرس ۱۰۰ تنی جایگذاری شده و با در نظر گرفتن پارامترهای انتخاب شده ECAP نمونه ها مطابق با طراحی آزمایش تاگوچی انجام شد. نمونه های حاصل در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- فرآیند ECAP با استفاده از قالب با طراحی جدید



شکل ۴- نمونه های ساخته شده با فرآیند ECAP با طرح جدید قالب

توجه به انتخاب دو پارامتر سه سطحی و یک پارامتر دو سطحی در طراحی تاگوچی آرایه متعامد L18 استفاده گردید. جدول ۱ محدوده مقادیر پارامترهای متغیر فرآیند و جدول ۲ مقادیر پارامترهای ثابت فرآیند را نشان می دهد.

### ۱-ظ- آزمایش تجربی

ترکیب شیمیایی آلیاژ ۷۵Al-۷۵Alومینیوم در جدول ۳ آمده است. نمونه های آلیاژ مذکور بوسیله ماشین تخلیه الکتریکی، با ابعاد ۱۰×۱۰ میلی متر و به طول ۵۰ میلی متر تحت عملیات برش قرار گرفت. لازم به ذکر است که نمونه های مورد تحقیق به صورت پیرسازی شده (T6) تهیه شده اند. نمونه ها قبل از فرآیند به مدت ۳ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس آنیل شدند.

برای انجام فرآیند، طرح جدید قالب ECAP مطابق با طراحی نوین ساخته شد. در طرح جدید، قطعه کار در داخل حفره ای که در سنبه تعبیه شده، قرار گرفته و با نیروی پرس، قطعه و سنبه همزمان باهم حرکت می کنند و قطعه فقط در یکی از وجوه با قالب در تماس بوده و در سه وجه دیگر لغزشی بین قطعه و قالب اتفاق نمی افتد.

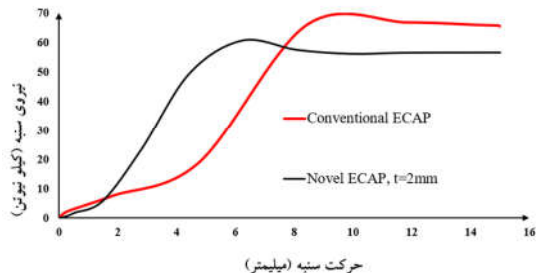
جدول ۳- ترکیب شیمیایی آلیاژ ۷۵Al-۷۵Alومینیوم

عناصر شیمیایی	درصد وزنی
آهن	۰/۵
کروم	۰/۲۱
منیزیم	۲/۳
کیالت	۱/۵
تیتانیوم	۰/۲
روی	۵/۶
سیلیسیم	۰/۴
منگنز	۰/۳

برای کاهش تماس سطح سنبه با قالب شیارهایی در قسمت های مختلف سنبه ایجاد شده است. در نتیجه سطح تماس سنبه با قالب به میزان قابل توجهی کم شده و در نتیجه نیروی سنبه کاهش می یابد این درحالی است که در قالب معمولی قطعه در هر چهار سطح با قالب در تماس می باشد. در شکل ۲ طرح نوین و سنتی سنبه باهم مقایسه شده اند. همچنین در شکل ۳ نمای کلی قالب نوین حین انجام فرآیند نشان داده شده است.

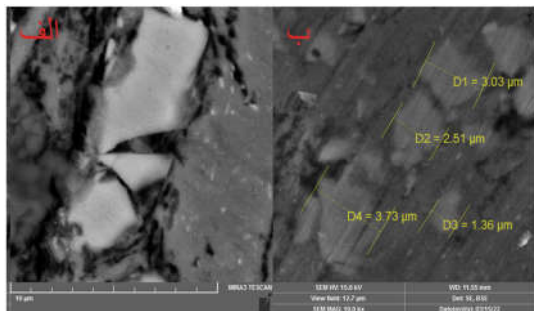
۱۰٪ کمتر از قالب طرح قدیم می باشد. این بدان معنی است که مقدار فشار هیدرواستاتیک در قالب طرح جدید حدود ۱۰٪ کمتر از فرآیند ECAP سنتی می باشد.

همچنین همانطوریکه از شکل ۲ مشخص است، در قالب های سنتی چون سنبه دارای نسبت طول به قطر (سطح مقطع) بالایی است،



شکل ۷- نیروی سنبه در طرح جدید و قدیم قالب ECAP

احتمال کممانش سنبه به ویژه در ابتدای فرآیند وجود دارد. ولی در قالب طرح جدید، هم سطح مقطع سنبه چندین برابر نمونه است و هم قسمت عمده‌ی آن در حین فرآیند در درون قالب قرار می گیرد. لذا در قالب طرح جدید احتمال کممانش سنبه تا حد زیادی کاهش می یابد.



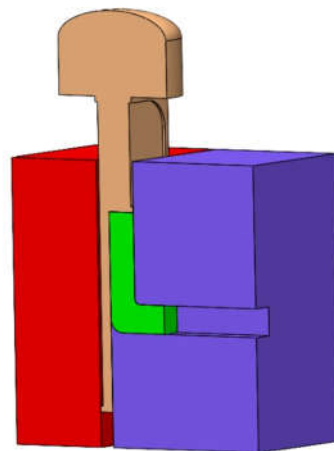
شکل ۸- الف) ECAP یک مرحله ای، ب) ECAP دو مرحله ای

همچنین مطابق شکل ۸ پس از دو مرحله ECAP در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس با استفاده از قالب طرح جدید، میکروساختار نمونه به شدت ریز دانه شده است. لازم به ذکر است که اندازه متوسط دانه های قطعه انیل شده حدود ۲۳ میکرومتر بود.

هدف از تحلیل آماری، بررسی پارامترهای موثر بر فرآیند و تاثیر رابطه بین این پارامترها بر سختی نمونه می باشد. برای انجام تحلیل داده ها نخست بایستی آنالیز آماری بر روی مقادیر مشاهده شده انجام بگیرد. برای ارزیابی اهمیت پارامترهایی که در فرآیند حضور دارند، از نمودار اثرات اصلی استفاده شده است که در ادامه هر کدام از پارامترها مورد بررسی قرار می گیرند.

#### ۴-۱- تاثیر روانکاری بر سختی ماده

شکل ۹ اثر روانکاری بر روی سختی ماده را نشان می دهد. مطابق شکل، مقدار سختی در حالت بدون روانکاری کمی بیشتر از حالت با روانکاری می باشد. بنابراین، اختلاف سختی بین دو حالت روانکاری بسیار ناچیز است. لذا در این فرآیند اثر روانکاری در افزایش یا کاهش سختی ماده

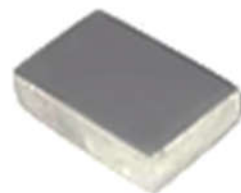


شکل ۵- طرحواره فرآیند ECAP جدید

شکل ۵ طرحواره طرح جدید قالب ECAP را نشان می دهد. همانطوریکه از شکل ۵ مشخص است، در قالب طرح جدید، سطح مقطع سنبه بزرگتر از قالبهای مرسوم می باشد. همچنین در طرح جدید قطعه کار (قطعه سبز رنگ در شکل ۵) در داخل سنبه و توسط سنبه به سمت کانال بعدی هدایت می شود.

برای مقایسه مقدار نیروی سنبه در قالب طرح جدید و قالب طرح قدیم، قالبهای طرح قدیم و طرح جدید با اندازه های کانال مساوی و نیز اندازه نمونه مساوی ساخته شده و نمونه های آلومینیومی در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس در هر دو قالب تولید گردید. برای اندازه گیری نیروی سنبه مورد نیاز از لودسل که مابین سنبه و پرس هیدرولیک تعبیه شده بود استفاده گردید.

برای تعیین سختی نمونه ها از آزمون میکروسختی ویکرز مدل-HV 1000Z ساخت PACE Technologies استفاده شد که از متداولترین آزمون های ریز سختی سنجی است. میکروسختی نمونه ها با روش ویکرز در دمای محیط، تحت بار ۰/۵ گرم و زمان ۱۵ ثانیه اندازه گیری شد. برای عملیات سختی سنجی، قطعه در ابعاد ۱۵ × ۱۰ × ۱ میلی متر آماده شد. شکل ۶ نمونه های قطعات آماده شده برای سختی سنجی را نشان می دهد. مقادیر سطوح پارامترهای ورودی و نتایج آزمایش ها، براساس معیار طراحی تاگوچی در جدول ۴ نشان داده شده است.

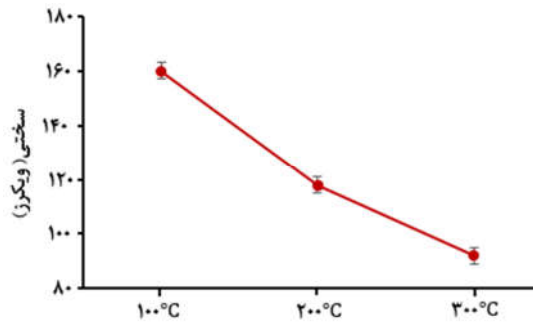


شکل ۶- نمونه قطعه سختی سنجی

#### ۴-۲ تحلیل داده ها

شکل ۷ نتایج اندازه گیری نیروی سنبه برای قالب طرح جدید و قدیم را نشان می دهد. همانطوریکه از شکل ۷ مشخص است، مقدار نیروی سنبه مورد نیاز برای پرس قطعه کارهای یکسان در قالب جدید حدود

افزایش سختی نسبت به ماده اولیه) و در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، سختی ماده HV ۲ (معادل ۲ درصد کاهش سختی نسبت به مقدار سختی ماده اولیه) اتفاق افتاده است. در حین انجام فرآیند تغییر شکل پلاستیک در دمای بالا، تبلور مجدد دینامیکی رخ می دهد. در استحاله‌ی تبلور مجدد دانه‌های تغییر شکل یافته در اثر کار مکانیکی با گروه جدیدی از دانه‌های بی نقص جایگزین می‌شوند. این پدیده شامل مرحله جوانه‌زنی و رشد دانه است، که با کاهش استحکام و سختی ماده و افزایش شکل‌پذیری آن همراه می‌باشد. با توجه به اینکه تبلور مجدد در آلایژ ۷۰۷۵ آلومینیوم در بازه دمای ۲۸۰-۱۹۰ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۰- تاثیر دمای فرآیند بر سختی

جوانه زنی و تبلور مجدد و رشد دانه ها در محدوده دمایی ۳۰۰ درجه سلسیوس اتفاق می افتد. دلیل کاهش مقدار سختی ماده نسبت به ماده خام اولیه در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس رخداد پدیده‌ی رشد دانه است. باید به این نکته نیز توجه داشت که هر چه دمای فرآیند کمتر باشد، از یکسو دانه‌ها ریزتر و زاویه‌ی جهت‌گیری آنها بیشتر می‌شود که هر دو عامل سبب افزایش استحکام ماده می‌شود و از سوی دیگر رشد دانه کمتر رخ خواهد بود [۱۴ و ۱۵].

#### ۴-۳- تاثیر تعداد مراحل فرآیند بر روی سختی ماده

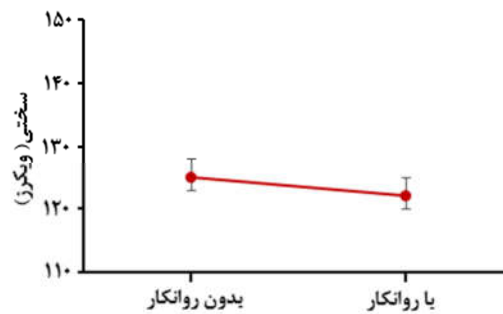
با افزایش تعداد مراحل ECAP، سختی ماده افزایش یافت (شکل ۱۱). در مرحله‌ی اول ۱۹ ویکرز معادل ۱۷ درصد افزایش سختی نسبت به سختی ماده اولیه اتفاق افتاده است. در مرحله‌ی دوم ۱۲ ویکرز معادل ۹/۵ درصد افزایش سختی نسبت به مرحله‌ی اول و در مرحله‌ی سوم ۸ ویکرز معادل ۶ درصد افزایش سختی ماده نسبت به مرحله‌ی دوم مشاهده شد. بیشترین افزایش سختی در مرحله‌ی اول اتفاق افتاده است. سختی در مقطع نمونه‌ها در مرحله‌ی اول افزایش قابل توجهی دارد، در حالی که در مراحل بعدی شیب افزایش سختی کاهش یافته است. علت این موضوع به تعادل رسیدن فرایندهای منجر به نرم شدن (بازیابی) و پدیده‌های منجر به افزایش استحکام و سختی (ریز شدن دانه ها) است. در هر مرحله میزان مشخصی از کرنش به ماده اعمال شده و با تکرار آن می توان به حداکثر کرنش ممکن و در نتیجه حداکثر میزان ریزدانه شدن و افزایش مرز دانه ها دست یافت.

قابل توجه نیست. علت آن است که روانکاری در واقع باعث کاهش نیروی اصطکاکی می شود و روی کرنش اعمالی در هر پاس که تابعی از هندسه ی قالب است تأثیری ندارد. تغییرات جزئی سختی نیز می تواند ناشی از این باشد که جزء حذف شده ی انرژی لازم برای غلبه بر اصطکاک در اثر روانکاری، صرف تغییر شکل پلاستیک شدید شده است.

#### جدول ۴- ماتریس آزمایش‌های طرح L18 تاگوچی و نتایج سختی

##### سنجی به عنوان پارامتر خروجی

ردیف	نوع روانکاری	دمای فرآیند (سلسیوس)	تعداد پاس	سختی (HV)
۱	۱	۱۰۰	۱	۱۴۵
۲	۱	۱۰۰	۲	۱۶۴
۳	۱	۱۰۰	۳	۱۷۷
۴	۱	۲۰۰	۱	۱۰۱
۵	۱	۲۰۰	۲	۱۲۳
۶	۱	۲۰۰	۳	۱۳۶
۷	۱	۳۰۰	۱	۸۵
۸	۱	۳۰۰	۲	۹۷
۹	۱	۳۰۰	۳	۹۹
۱۰	۲	۱۰۰	۱	۱۴۳
۱۱	۲	۱۰۰	۲	۱۶۳
۱۲	۲	۱۰۰	۳	۱۷۲
۱۳	۲	۲۰۰	۱	۱۰۲
۱۴	۲	۲۰۰	۲	۱۱۹
۱۵	۲	۲۰۰	۳	۱۳۱
۱۶	۲	۳۰۰	۱	۸۳
۱۷	۲	۳۰۰	۲	۹۴
۱۸	۲	۳۰۰	۳	۹۷



شکل ۹- تاثیر ماده روانکاری بر سختی

#### ۴-۲- تاثیر دمای فرآیند بر سختی ماده

با افزایش دما سختی ماده کاهش داشته است (شکل ۱۰). در دمای ۱۰۰°C، سختی ماده HV ۶۶ بوده که معادل ۴۱ درصد افزایش سختی ماده نسبت به مقدار سختی اولیه HV ۹۴ مشاهده شد. همچنین در دمای ۲۰۰°C سختی ماده ۲۴ ویکرز (معادل ۲۰ درصد

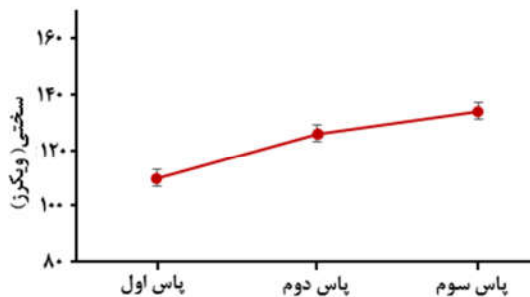


شکل ۱۴- اثرات متقابل تعداد مرحله و دمای فرآیند بر سختی

برای انتخاب مقادیر بهینه فرآیند ECAP با بیشترین مقدار سختی ماده نهایی، از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می‌شود. نسبت S/N یک معیار تبدیل شده است که انحراف بین مقادیر تجربی و مقادیر مطلوب داده‌ها را بیان می‌کند. در اینجا براساس این اصل که مطلوب است سختی ماده به حداکثر برسد نسبت S/N بصورت رابطه (۲) بیان شده است.

جدول ۵- نسبت سیگنال به نویز S/N

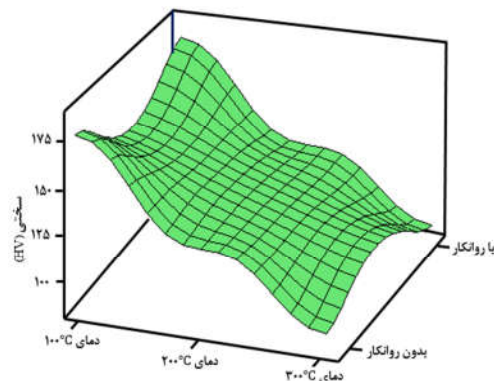
ردیف	نوع روانکاری	دمای فرآیند (سلسیوس)	تعداد پاس	S/N سختی نمونه
۱	۱	۱۰۰	۱	۴۳/۲۲
۲	۱	۱۰۰	۲	۴۴/۲۹
۳	۱	۱۰۰	۳	۴۴/۹۵
۴	۱	۲۰۰	۱	۴۰/۰۸
۵	۱	۲۰۰	۲	۴۱/۷۹
۶	۱	۲۰۰	۳	۴۲/۶۷
۷	۱	۳۰۰	۱	۳۸/۵۸
۸	۱	۳۰۰	۲	۳۹/۷۳
۹	۱	۳۰۰	۳	۳۹/۹۱
۱۰	۲	۱۰۰	۱	۴۳/۱۰
۱۱	۲	۱۰۰	۲	۴۴/۲۴
۱۲	۲	۱۰۰	۳	۴۴/۷۱
۱۳	۲	۲۰۰	۱	۴۰/۱۷
۱۴	۲	۲۰۰	۲	۴۱/۵۱
۱۵	۲	۲۰۰	۳	۴۲/۳۴
۱۶	۲	۳۰۰	۱	۳۸/۳۸
۱۷	۲	۳۰۰	۲	۳۹/۴۶
۱۸	۲	۳۰۰	۳	۳۹/۷۳



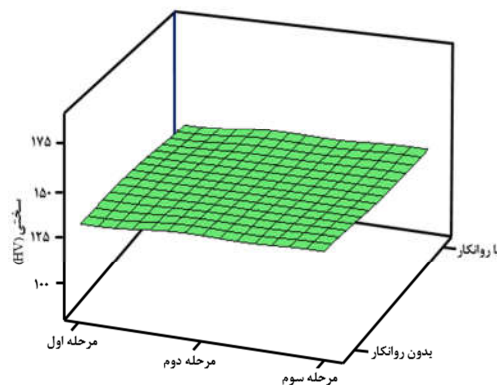
شکل ۱۱- تاثیر تعداد مراحل ECAP بر سختی نمونه ها

#### ۴-۴- اثرات متقابل پارامترهای ورودی بر سختی

شکل ۱۲ اثر متقابل روانکاری و دمای فرآیند، شکل ۱۳ اثر متقابل روانکاری و تعداد مراحل و شکل ۱۴ اثر متقابل تعداد مراحل و دمای فرآیند بر سختی را نشان می‌دهد. در بین اثرات متقابل، برهم کنش بین دمای فرآیند و تعداد مرحله بیشترین تاثیر را بر روی سختی ماده دارد.



شکل ۱۲- اثرات متقابل روانکاری و دمای فرآیند بر سختی

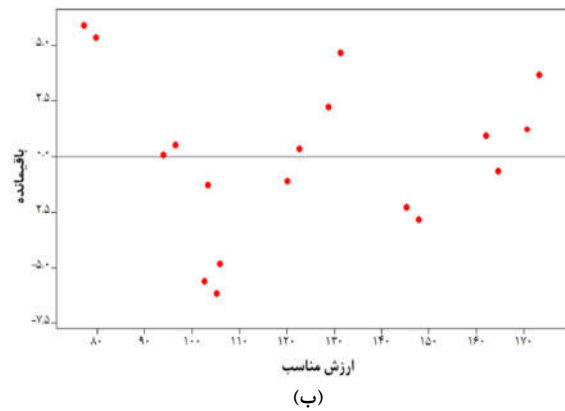
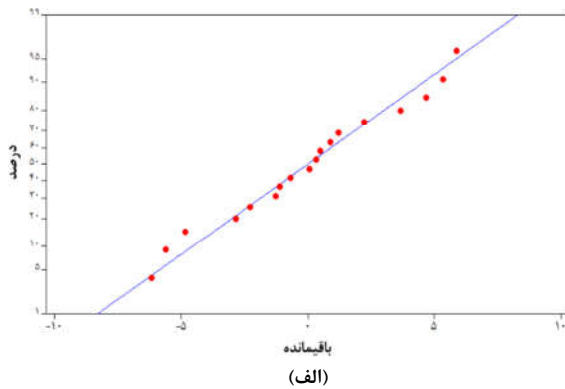


شکل ۱۳- اثرات متقابل روانکاری و تعداد مرحله بر سختی

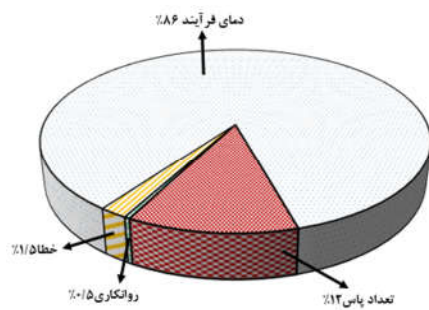
تاثیر و روانکاری کمترین اثر را بر روی سختی فرآیند دارد. درصد خطای تحلیل نیز منطقی می باشد.

جدول ۸ آنالیز واریانس خروجی فرآیند ECAP

Sours	DF	SS	MS	F	P -value
روانکاری	۱	۲۹/۴	۲۹/۴	۱/۶۴	۰/۲۲۵
دما	۲	۱۴۱۹۰/۸	۷۰۹۵/۴	۳۹۵/۴۱	۰/۰۰۰
تعداد مرحله	۲	۲۰۱۷/۴	۱۰۰۸/۷	۵۶/۲۱	۰/۰۰۰
خطا	۱۲	۲۱۵/۳	۱۷/۹		
Total	۱۷	۱۶۴۵۲/۹	-		



شکل ۱۵- الف) نمودار مقادیر باقیمانده به مقادیر برازش یافته ب) نمودار احتمال مقادیر باقیمانده



شکل ۱۶ - نمودار درصد مشارکت پارامترهای فرآیند ECAP روی سختی نمونه ها

جدول ۶- نسبت سیگنال به نویز پاسخ

سطح	نوع روانکاری	دمای فرآیند	تعداد مرحله
اول	۴۱/۷۰	۴۴/۰۹	۴۰/۵۹
دوم	۴۱/۵۲	۴۱/۴۳	۴۱/۸۴
سوم	-	۳۹/۳۰	۴۲/۳۹
Delta	۰/۱۸	۴/۷۹	۱/۸۰
Rank	۳	۱	۲

جدول ۵ نسبت سیگنال به نویز S/N در تحلیل فرآیند ECAP را نشان می دهد. همچنین جدول ۶ نسبت سیگنال به نویز برای پارامتر سختی بیشتر-بهرتر، را نشان می دهد.

با بررسی انجام شده مقادیر نسبت سیگنال به نویز، مشاهده می شود دمای فرآیند بیشترین اثر را بر روی سختی ماده دارد، بعد از آن به ترتیب تعداد مرحله و روانکاری بر روی سختی ماده اثر بیشتری می-گذارد. مقدار بهینه برای حصول بیشترین سختی در ماده بر اساس نتایج سیگنال به نویز، در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷- مقدار بهینه پارامترها

نوع روانکاری	دمای فرآیند	تعداد مرحله
بدون روانکاری	۱۰۰ درجه سلسیوس	مرحله سوم

### ۵- صحت سنجی تحلیل واریانس

نتیجه گیری نهایی از نمودارها و نتایج ارائه شده نیازمند تایید اثرات نشان داده شده عوامل با استفاده از تحلیل واریانس است. این تحلیل با فرض بهینه بودن توزیع داده ها، گوسی بودن توزیع خطا و استقلال آن و ثابت بودن واریانس، به آزمون فرضیه تهی با استفاده از مقدار P می پردازد. پیروی نکردن باقیمانده ها از هیچ الگویی در شکل ۱۵ الف نمایانگر برقراری فرض استقلال و همچنین عدم وجود نقاط پرت در شکل ۱۵ ب نشان دهنده برقرار بودن فرض نرمال بودن داده ها است. این شکل ها صحت فرض های نخستین تحلیل واریانس و در نتیجه صحت نتایج آن را تایید می کند. لازم به ذکر است که در تحلیل واریانس، متغیرهایی در فرآیند مؤثر در نظر گرفته می شوند که مقدار P آنها با در نظر گرفتن قابلیت اعتماد ۹۵٪ از ۰/۰۵ کمتر باشد. بر این اساس می توان از اثر عواملی که مقدار P آنها از ۰/۰۵ بیشتر است، صرف نظر کرد.

### ۶- آنالیز واریانس

برای بدست آوردن درصد مشارکت هر فاکتور بر روی خروجی از آنالیز واریانس استفاده شده است. جدول ۸ آنالیز واریانس برای فرآیند را نشان می دهد. بر اساس نتایج آنالیز واریانس دمای فرآیند، تعداد مرحله و روانکاری به ترتیب بیشترین تاثیر را بر روی سختی ماده دارند. نمودار درصد مشارکت هر فاکتور در مقدار سختی ماده در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این نمودار هم نشان می دهد که دمای فرآیند بیشترین

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله، تاثیر پارامترهای فرآیند و تعیین سطوح بهینه آنها در طرح جدید سنبه قالب بر روی سختی ماده آلیاژ ۷۰۷۵ آلومینیوم مورد مطالعه قرار گرفت. مهمترین یافته های پژوهش به شرح ذیل است.

۱- در طرح جدید قالب ECAP با مکانیزم کاهش سطح تماس سنبه با قالب، نیروی سنبه کاهش یافت.

۲- همچنین با توجه به اینکه در طرح جدید قالب ECAP، نسبت طول به سطح مقطع نمونه بسیار بیشتر از قالبهای سنتی می باشد، در طرح جدید، امکان کماتش سنبه مرتفع شده است.

۳- مطابق تحلیل ها، در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، مکانیزم ریز شدن دانه ها و تبلور مجدد دینامیکی به تعادل می رسد.

۴- مقدار بهینه و بیشترین سختی ماده در حالت بدون روانکاری، دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و سومین مرحله ی ECAP بدست می آید.

۵- براساس تحلیل واریانس به ترتیب دمای فرآیند با ۸۶٪ و تعداد مرحله با ۱۲٪ سهم، به ترتیب بیشترین تاثیر را در میزان سختی قطعه خروجی از قالب ECAP دارد. شرایط روانکاری نیز تاثیر معنی داری در میزان سختی قطعه کار خروجی ندارد.

## ۶- مراجع

- under Electromagnetic Hot Forming, Materials (Basel), Vol. 14, No. 17, p. 4954, Aug. 2021.
- [11] Shahriyari F., Shaeri M. H., Bavarsiha F. and Talafi Noghani M., Creep behavior of solid solutioned and annealed Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A* 765: 138225, 2019.
- [12] Arezoo E., Shaeri M. H., Talafi Noghani M., and Ahmad Razaghian. Fatigue behavior of AA7075 aluminium alloy severely deformed by equal channel angular pressing. *Journal of Alloys and Compounds* 757: 324-332, 2018.
- [13] Agarwal K.M., Tyagi R. K., Choubey V. and Saxena K. K., Mechanical behaviour of Aluminium Alloy AA6063 processed through ECAP with optimum die design parameters, *Adv. Mater. Process. Technol.*, pp. 1-15, Feb. 2021.
- [14] Shivashankara B.S., Gopi K. R., Pradeep S. and Raghavendra Rao R., Investigation of mechanical properties of ECAP processed AL7068 aluminium alloy, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 1189, No. 1, pp. 012027, Oct. 2021.
- [15] Khelfa T. et al., Microstructure and mechanical properties of AA6082-T6 by ECAP under warm processing. *Met. Mater. Int.*, 2019
- [16] Balasundar I., Rao M.S., Raghu T., Equal channel angular pressing die to extrude a variety of materials. *Mater. Des.* 30(4), 1050- 1059 , 2009.
- [1] Bagherpour E., Pardis N., Reihanian M., and Ebrahimi R., An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 100, no. 5-8, pp. 1647-1694, Feb. 2019.
- [2] Mehdi Eskandarzade A. M., Faraji Gh., Numerical and analytical investigation of an ultrasonic assisted ECAP process, *J. Theor. Appl. Vib. Acoust.*, Vol. 2, No. 2, p. 18, 2016.
- [3] Callister W.D., *Materials science and engineering : an introduction*, 4th ed. John Wiley & Sons, New York, ©1997, 1997.
- [4] Figueiredo R.B. and Langdon T. G., Deformation mechanisms in ultrafine-grained metals with an emphasis on the Hall-Petch relationship and strain rate sensitivity, *J. Mater. Res. Technol.*, Vol. 14, pp. 137-159, Sep. 2021.
- [5] Aff M.A. et al., Effect of ECAP processing on microstructure evolution and dynamic compressive behavior at different temperatures in an Al-Zn-Mg alloy. *Mater. Sci. Eng. Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process.* 684, 617-625, 2017.
- [6] Sankuru A.B., et al., Optimization of processing temperature and back pressure of equal channel angular pressing for achieving crack-free fine grained magnesium. *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [7] Sadasivan, N., et al., Influence of equal channel angular pressing in an acute angle die with a back pressure notch on grain refinement, torsion and mechanical properties of aluminium. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.* 50(2): p. 155-164, 2019 .
- [8] Ruzs S., et al., ECAP methods application on selected non-ferrous metals and alloys. *Archives of Materials Science and Engineering*, 43(2): p. 69-76, 2010.
- [9] Günay Bulutsuz A., Ultrasonic Assisted Incremental Equal Angular Channel Pressing Process of AA 6063. *Advanced Engineering Materials.* 23(2): p. 2000784, 2021.
- [10] Du Z., Deng Z., Cui X. and Xiao A., Deformation Behavior and Properties of 7075 Aluminum Alloy