ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(01):57-70

# Optimization and Investigation of Effective Parameters in ECAP-Conform Process Using Response Surface Method, Case Study: AA7075 Rod

**ARTICLEINFO**

***Article Type***
Original Research

***Authors***
Moradia S.[1],
Gerdooei M. [1*],
Ghaforian Nosrati H.[2],
Varedi-Koulaeid S.M.[3],

**How to cite this article**
Moradia S, Gerdooei M, Ghaforian Nosrati H, Varedi-Koulaeid S M. Optimization and Investigation of Effective Parameters in ECAP-Conform Process Using Response Surface Method, Case Study: AA7075 Rod. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(01):57-70

**ABSTRACT**

The ECAP-Conform is one of the newest and less known processes that improve mechanical properties. In the present study, the effective parameters of the ECAP-Conform process for AA7075 have been investigated. Influence of parameters such as roller radius, bending angle, die channel angles, rod/roll friction coefficient, rod/die friction coefficient, and the aspect ratio of the die groove on the torque, the applied force on the die, the stress, and the effective plastic strain, the output rod curvature, and the strain distribution uniformity have been investigated. The design of experiments was carried out based on the response surface method by the Minitab software, and simulations were performed using the ABAQUS software. To validate the FEM, the ECAP-Conform process of AA7075 rod was performed and the comparison of experimental and numerical results have acceptable compliance (7.5% error). It was found that the die channel angles and the rod/die friction coefficient have a more significant effect on all responses. Moreover, to maximize the imposed strain and strength, and to minimize the process torque and curvature, as well as achieve a uniform distribution of strain, the optimal output parameters have been obtained.

**Keywords** ECAP-Conform, AA7075, Simulation, Optimization, Response Surface Method.

[1] Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology
[2] Department of Mechanical Engineering, Esfarayen University of Technology
[3] Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology

***Correspondence***
Address: Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
Gerdooei@Sharoodut.ac.ir

***Article History***
Received: May 23, 2021
Accepted: July 31, 2021
ePublished: November 30, 2022

**CITATIONLINKS**

[1] A study on the hardness of 7075 and 5052 aluminum alloys in the equal channel angular rolling process [2] Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation [3] Finite element analysis of deformation behavior in continuous ECAP process [4] An investigation of microstructural evolution during equal-channel angular pressing [5] Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP–Conform [6] The evolution of homogeneity on longitudinal sections during processing by ECAP [7] A New Concept for the Continuous Extrusion Forming of Metals [8] Principles of ECAP–Conform as a continuous process for achieving grain refinement: Application to an aluminum alloy [9] Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al 6101 alloy processed via ECAP-conform [10] Microstructure and mechanical properties variations of pure aluminum subjected to one pass of ECAP-Conform process. Materials Science and Engineering [11] The comparison between continuous confined strip shearing (C2S2) and ECAP conform in regard to equivalent plastic strain distribution for Al 1100 [12] Effect of die channel angle and friction coefficient in ECAP-Conform process for Al-6061 alloy [13] Theoretical and numerical investigation of required torque in ECAP-Conform process. Metallurgical and Materials Transactions B [14] Theoretical and experimental evaluation of no-slip feeding condition in ECAP-Conform of a square-section metallic rod [15] Design of experiment [16] Metal forming: mechanics and metallurgy [17] Optimization by response surface methodology.

*Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.*

# بهینه‌سازی و بررسی پارامترهای فرایندی موثر بر ایکپ مداوم با استفاده از روش سطح پاسخ، مطالعه موردی: میله آلومینیومی ۷۰۷۵

**صادق مرادی**
دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
**مهدی گردویی***
دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
**حسن غفوریان نصرتی**
دانشکده مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، خراسان شمالی، ایران
**سیدمجتبی واردی کولایی**
دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

## چکیده
فرآیند ایکپ مداوم، روشی نسبتا جدید و کمتر شناخته شده است که باعث بهبود خواص مکانیکی ماده می‌شود. در پژوهش حاضر، به بررسی پارامترهای موثر بر فرآیند ایکپ مداوم آلیاژ آلومینیومی ۷۰۷۵ پرداخته شده است. تاثیر پارامترهای ورودی شامل شعاع چرخ‌دوار، زاویه‌ی خم میله، زاویه‌های گوشه و کانال قالب، ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار، ضریب اصطکاک بین میله و قالب و نسبت ابعادی کانال قالب بر روی گشتاور فرایند، نیروی اعمالی بر قالب، میزان تنش و کرنش پلاستیک موثر، میزان انحناء میله خروجی و یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله به عنوان پارامترهای خروجی بررسی می‌شود. طراحی آزمایش‌ها براساس روش سطح پاسخ در نرم‌افزار مینی‌تب اجرا و شبیه‌سازی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. به منظور صحت‌سنجی، استحکام محصول پس از اجرای فرآیند ایکپ مداوم میله آلومینیومی ۷۰۷۵ مورد بررسی و خطای ۷/۵ درصدی مشاهده شد. مشخص شد که پارامترهای زوایای کانال قالب و ضریب اصطکاک بین میله و قالب بر روی تمامی پاسخ‌ها تاثیری معنی‌دار دارد. مقادیر بهینه این فرآیند با هدف دستیابی به میزان حداکثر استحکام، حداقل گشتاور و انحنای میله و همچنین دستیابی به توزیع کرنش یکنواخت‌تر برای پارامترهای ورودی بدست آمده است.

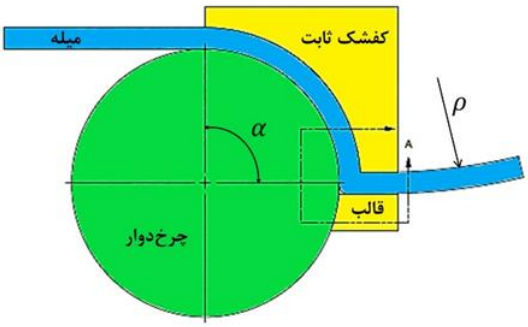
**کلیدواژه‌ها**: ایکپ مداوم، آلومینیوم ۷۰۷۵، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، روش سطح پاسخ

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۹
*نویسنده مسئول: gerdooei@shahroodut.ac.ir

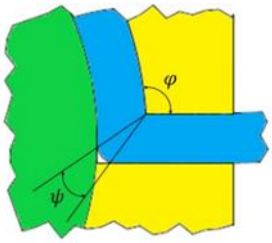
## ۱- مقدمه
در کاربردهای صنعتی بیشتر از آلیاژ آلومینیوم که حاصل ترکیب آلومینیوم با دیگر عناصر است و از طرفی خواص مکانیکی بهتری نسبت به آلومینیوم خالص دارد، استفاده می‌شود. آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به دلیل حفظ استحکام خود در دماهای بالا و قابلیت شکل‌پذیری خوب در بین آلیاژهای مختلف آلومینیوم به آلیاژ راهبردی معروف شده است که کاربرد وسیعی در صنایع نظامی، هسته‌ای و هوافضا دارد[1] . امروزه یکی از اهداف اصلی صنایع بهبود خواص مکانیکی فلزات و آلیاژها است که توجه بسیاری از محققان این حوزه را به خود جلب کرده است. خواص مکانیکی و فیزیکی ماده به فاکتورهای مختلفی بستگی دارد که یکی از پارامترهای مهم، اندازه دانه است. بر طبق رابطه هال-پچ تنش تسلیم یک ماده با جذر اندازه قطر دانه‌های آن رابطه عکس دارد:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (۱)$$

در این رابطه σ_0 استحکام شبکه دانه‌ها، k_y ثابت تنش که به جنس ماده بستگی دارد و d اندازه‌ی متوسط دانه است[2] . می‌توان با استفاده از روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید، مواد با اندازه دانه حدود ۱ میکرومتر یا کمتر که دارای خواص مکانیکی و فیزیکی منحصر به فردی است تولید کرد[3] . فرآیند فرآیند فشردن در کانال همسان زاویه‌دار یا ایکپ به عنوان یکی از روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید، به دلیل موثر بودن در تولید ساختار ریزدانه و اعمال کرنشی در حدود ۱ به مواد پلی-کریستالی در یک عبور، بیشتر در بین محققین مورد توجه قرار گرفته است[4] . با این وجود فرآیند ایکپ دارای دو نقص می‌باشد؛ اولین نقص آن مربوط به محدودیت طول قطعه کار است که منجر به محدودشدن جابه‌جایی رم دستگاه پرس و نسبت ابعادی قطعه (طول به قطر آن) در فرآیند می‌شود[5] . دومین نقص فرآیند ایکپ ناپیوسته بودن آن است، بدین معنی که به منظور اعمال کرنش بیشتر به نمونه در این فرآیند، باید نمونه به صورت تکراری در قالب قرار گرفته، فشرده و خارج شود. علاوه بر این، طول قابل‌توجه‌ای از دو انتهای قطعه به دلیل ساختار غیر یکنواخت یا ترک‌های ریز بعد از خروج از قالب باید دور ریخته شود. این محدودیت‌ها باعث علاقه کمتر صنعتگران به این فرآیند و کارایی کمتر آن در تولید شده است[6] . تلاش‌های زیادی به منظور حذف این محدودیت‌ها و صنعتی‌کردن فرآیند ایکپ انجام گرفته است که فرآیند ایکپ مداوم یا ایکپ کانفرم از جمله آن‌ها به شمار می‌آید. فرآیند ایکپ مداوم ترکیبی از فرآیند ایکپ و فرآیند کانفرم است که کانفرم اولین بار توسط اترینگون در سال ۱۹۷۴ ارائه شده است[7] . در فرآیند ایکپ مداوم قطعه به داخل شیار ایجاد شده بر روی چرخ دواری تغذیه می‌شود. از آنجا که سطح شیار روی چرخ‌دوار در تماس با قطعه است، نیروی محرکی ناشی از اصطکاک ایجاد می‌شود؛ از طرفی روی شیار با کفشک‌هایی ثابت پوشیده شده است تا مسیر حرکت قطعه را مشخص کند. سطح مقطع قطعه خروجی معمولا به شکل سطح مقطع روزنه قالب ایکپ می‌باشد. قالب ایکپ دارای دو زاویه موثر است؛ زاویه برخورد کانال‌های قالب (φ) و زاویه گوشه بیرونی قالب (ψ) که مربوط به انحنای گوشه خارجی کانال‌ها در قالب ایکپ است. طرح‌واره فرآیند ایکپ مداوم به همراه زوایای قالب ایکپ و دیگر پارامترها در شکل ۱ نمایش داده شده است.




(الف)




(ب)

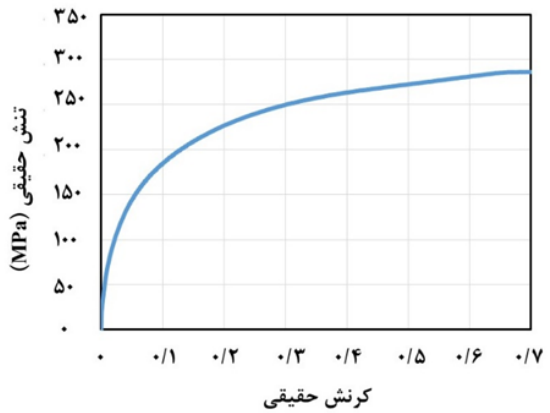
**شکل ۱)** الف) طرح‌واره کلی فرآیند ایکپ مداوم، ب) پارامترهای هندسی قالب ایکپ با مقطع چهارگوش

والیف و همکاران از میله آلومینیومی ۶۰۶۱ به طول و قطر به cm 25 و mm 4 برای اجرای فرآیند ایکپ مداوم در دمای اتاق استفاده کرده‌اند. فرآیند با سرعت ثابت rad/s ۰/۲ و تا ۴ عبور اجرا و نمونه بعد از انجام هر عبور °۹۰ حول جهت طولی خود چرخانده شده است. نتایج نشان می‌دهد مقادیر سختی در ناحیه مرکزی میله همگن‌تر است؛ در حالی که در مقاطع نزدیک به ابتدا و انتهای میله ناهمگنی صفحه‌ای وجود دارد[8] . موراشکن و همکاران به بررسی بهبود خواص مکانیکی و هدایت الکتریکی آلیاژ آلومینیوم ۶۱۰۱ پس از اجرای فرآیند ایکپ مداوم پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با اجرای فرآیند ایکپ مداوم با زاویه قالب °۱۳۰ در شش عبور می‌توان به ساختار فوق‌ریزدانه با اندازه دانه حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر دست پیدا کرد. در این پژوهش از نمونه‌ای به طول m ۱/۵ که در دمای ۵۵۰°C آنیل شده است، استفاده شد[9] . حبیبی‌پارسا و همکاران به بررسی عددی و تجربی تاثیر استفاده از فرآیند ایکپ مداوم بر روی خواص مکانیکی و ساختار میله آلومینیومی ۱۱۰۰ به قطر mm 5 در دمای اتاق پرداخته‌اند. مقدار سختی میله خم شده بر روی چرخ‌دوار در زوایای مختلف و بعد از خروج از قالب نشان می‌دهد که مقدار سختی قطعه با افزایش زاویه و نزدیک شدن به خروجی قالب افزایش و مقادیر استحکام تسلیم و استحکام نهایی قطعه خروجی افزایش پیدا کرده است[10] . موسوی و همکاران به مقایسه دو فرآیند باریکه محصور تحت برش پیوسته و ایکپ مداوم به صورت عددی برای آلومینیوم خالص تجاری ۱۱۰۰ با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که کرنش پلاستیک در فرآیند باریکه محصور تحت برش پیوسته تحت عبور اول به مقدار ۰/۱۳ رسیده؛ در حالی که در فرآیند ایکپ مداوم این مقدار برابر ۰/۵۲ است. مقدار کرنش پلاستیک نهایی ایجاد شده در قطعه، در فرآیند باریکه محصور تحت برش پیوسته و فرآیند ایکپ مداوم به ترتیب برابر ۰/۸۶ و ۱/۳۶ است[11] . پوربشیری و همکاران شبیه‌سازی عددی فرآیند ایکپ مداوم میله آلومینیومی ۶۰۶۱ را در زاویای مختلف کانال قالب و ضرایب اصطکاکی مختلف اجرا کردند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه کانال از °۹۰ به °۱۱۰ نیروی مورد نیاز فرآیند ۴۰ تا ۵۰ درصد کاهش پیدا می‌کند؛ همچنین با افزایش ضریب اصطکاک از ۰/۲ تا ۰/۴ مقدار کرنش پلاستیک در میله از ۸ تا ۱۲ درصد افزایش داشته است[12] . بررسی تحلیلی و عددی گشتاور موردنیاز فرآیند ایکپ مداوم میله تیتانیومی خالص تجاری رده ۲ توسط گردویی و همکاران انجام شد. آنها یک روش تحلیلی که تلفیقی از دو روش تعادل انرژی و تحلیل کران بالا بود را ارائه و تاثیر دو پارامتر فاکتور اصطکاک برشی و توان کرنش سختی را بر فرآیند مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که با افزایش فاکتور اصطکاک برشی مقدار گشتاور موردنیاز فرآیند افزایش پیدا کرده است؛ در صورتی که با افزایش توان کرنش سختی مقدار گشتاور تغییرات قابل ملاحظه‌ای ندارد[13] . در ادامه پژوهش قبلی، گردویی و همکاران به بررسی تحلیلی و تجربی گشتاور مورد نیاز فرآیند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش پرداخته و همچنین معیار آستانه لغزش را برای اجرای موفقیت‌آمیز این فرآیند ارائه کردند. مقدار خطای گزارش شده بین روش تحلیلی و تجربی برابر ۱۱٪ گزارش شده است[14] .

تاکنون تحقیق جامع و منسجمی در مورد بررسی اثرات عوامل موثر بر فرآیند ایکپ مداوم صورت نگرفته است؛ لذا در پژوهش حاضر به بررسی پارامترهای مختلف فرآیند ایکپ مداوم میله آلومینیومی ۷۰۷۵ با مقطع چهارگوش از قبیل شعاع چرخ‌دوار (R)، زاویه‌ی خم میله بر روی چرخ‌دوار (α)، زاویه برخورد کانال‌های قالب (φ)، زاویه گوشه خارجی قالب (ψ)، ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار ($\mu_r$)، ضریب اصطکاک بین میله و کانال قالب ($\mu_d$) و نسبت ابعادی سطح مقطع کانال قالب ($^a/_b$) پرداخته می‌شود. پارامترهای موثر و نحوه تاثیر این پارامترها بر روی گشتاور موردنیاز فرآیند (T)، نیروی واردشده بر قالب (RF)، کرنش پلاستیک ایجادشده در میله آلومینیومی ($STD_\varepsilon$)، میزان تنش موثر میله ($\bar{\sigma}$)، میزان انحنا میله آلومینیومی پس از خروج از قالب (ρ) و یکنواختی توزیع کرنش ($STD_\varepsilon$)، در سطح مقطع میله با استفاده از روش سطح پاسخ بررسی شده است. هدف، مشخص-کردن مقدار بهینه هر پارامتر برای اجرا و بهبود فرآیند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش برای میله آلومینیومی است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در پژوهش حاضر از میله آلومینیومی ۷۰۷۵ به قطر ۸ mm که دارای طول ۷۵۰ mm است، استفاده شده است. این میله در دمای ۴۱۵°C به مدت ۳ ساعت تحت فرآیند آنیل قرار گرفته است. شکل ۲ منحنی تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمون فشار آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده را براساس استاندارد ASTM E9 نشان می‌دهد.




**شکل ۲)** منحنی تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمون فشار آلیاژ آلومینیومی ۷۰۷۵ آنیل شده

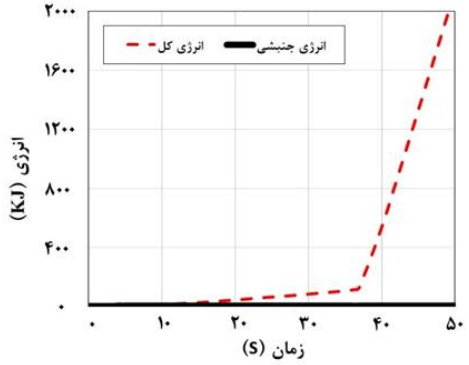
### ۲-۱- شبیه‌سازی فرآیند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش

به منظور مدل‌سازي فرآیند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش برای میله آلومینیومی ۷۰۷۵ از نرم‌افزار آباکوس ۶-۱۴ استفاده شده است. براي كاهش زمان محاسبات از حل‌گر صریح، با روش بزرگ‌نمایی جرم به منظور افزایش نمو زمانی برای حل پایدار و كاهش تعداد نموهاي زماني استفاده شده است. در استفاده از این روش باید این موضوع را مد نظر قرار داد که کاهش بازه زمانی نباید موجب افزایش غیر واقعی انرژي جنبشی در فرآیند شود؛ زیرا مقدار بیش از حد بزرگ‌نمایی باعث ایجاد پاسخ‌های نادرست می‌شود. مقایسه بین مقدار انرژي جنبشی و انرژي کل فرآیند بیان‌کننده این است که کاهش بازه زمانی موجب افزایش غیرواقعی انرژي جنبشی در فرآیند ایکپ مداوم نشده است (شکل ۳-الف). در این مدل-سازی از المان‌های تغییرشکل‌پذیر نوع C3D8R و صلب گسسته نوع R3D4 به ترتیب برای میله و سایر قطعات مجموعه استفاده شده است. لازم به ذکر است که آنالیز حساسیت المان به منظور انتخاب اندازه مناسب المان‌ها اجرا شده است. برای این منظور شبیه‌سازی‌هایی با تغییرات اندازه المان‌های میله اجرا و تا هنگامی که مقدار نیروی وارد بر قالب مستقل از تغییرات اندازه المان باشد، تکرار شد و در نهایت بهینه‌ترین اندازه المان برای میله برابر ۱ mm و برای سایر اجزا برابر ۲ mm به‌دست آمد.

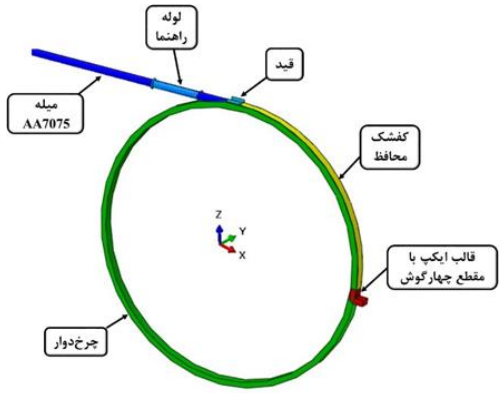
حرکت دورانی چرخ‌دوار براساس سرعت زاویه‌ای ثابت تنظیم و برای تعیین شرایط اصطکاکی از تماس سطح به سطح با تعیین ضرایب اصطکاک مختلف بین میله و چرخ‌دوار و بین میله و کانال قالب استفاده شده است. مقادیر مورداستفاده برای شبیه‌سازی فرآیند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش در جدول ۱ آورده شده است. همچنین مدل المان محدود این فرآیند در شکل ۳-ب نمایش داده شده است. بر اساس شرایط ذکر شده برای شبیه‌سازی عددی فرآیند، میله آلومینیومی به وسیله نیروی اصطکاک (حاصل از تماس میله و چرخ‌دوار) به داخل قالب ایکپ با مقطع چهارگوش فشرده و آلومینیوم خروجی دارای سطح مقطع چهارگوش خواهد بود.

### ۲-۲- روش سطح پاسخ

طراحی آزمایش روشی است که به منظور مشخص‌شدن ارتباط بین عوامل موثر یک فرآیند (متغیرهای مستقل) و خروجی‌های آن (متغیرهای وابسته) استفاده می‌شود؛ روشی کارا به منظور انجام آزمایش‌ها، به گونه‌ای که داده‌های به‌دست آمده قابل تجزیه و تحلیل آماری بوده و نتایج با سطح اطمینان معینی ارائه می‌شوند. یکی از بهترین روش‌های طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ می‌باشد که در آن، همانند دیگر روش‌های طراحی آزمایش، رابطه بین عوامل موثر و خروجی‌ها ناشناخته است. بنابراین گام اول، یافتن تخمین مناسب از تابعی صحیح بین عوامل موثر و




(الف)




(ب)

**شکل ۳)** مقایسه انرژي جنبشی با انرژي کل در شبیه‌سازي فرآیند ب) مدل المان محدود فرآیند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش

**جدول ۱)** خصوصیات فیزیکی و مکانیکی میله آلومینیومی ۷۰۷۵ به همراه پارامترهای ثابت شبیه‌سازی فرآیند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش

| | پارامتر | مقدار |
|---|---|---|
| ماده | چگالی (kg/m3) | ۲۷۵۰ |
| | مدول یانگ (GPa) | ۷۰ |
| | نسبت پواسون | ۰/۳۳ |
| | ضریب سختی (MPa) | ۳۱۸ |
| | توان کرنش سختی | ۰/۲۳ |
| فرایند | قطر میله (mm) | ۸ |
| | طول میله (mm) | ۷۵۰ |
| | سرعت زاویه‌ای (rad/s) | ۰/۱ |

خروجی‌ها است. معمولاً از یک چندجمله‌ای مرتبه پایین در برخی از نواحی متغیرهای مستقل استفاده می‌شود؛ اگر پاسخ به خوبی توسط تابعی خطی بر حسب متغیرهای مستقل مدل نشود، آنگاه از تابع تقریب مرتبه دوم استفاده خواهد شد. در پژوهش حاضر، از یک مدل رگرسیون چند جمله‌ای مرتبه دوم برای پیدا کردن تقریب مناسب بر طبق رابطه (۲) استفاده شده است.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i \qquad (۲)$$

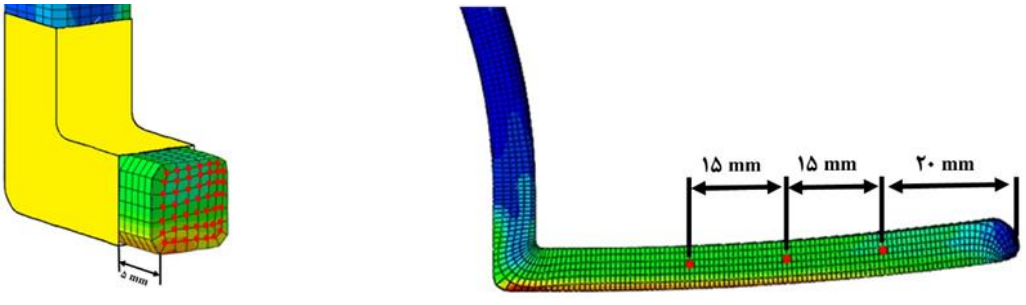
در این رابطه y تابع پاسخ، $x_i$ متغیرهای مستقل، k تعداد متغیرهای مستقل، $\beta_0$ تا $\beta_{ij}$ ضرایب ثابت مجهول هستند که از تحلیل به‌دست می‌آیند[15]. دو طرح مرکب مرکزی (Central Composite Design (CCD)) و باکس‌بنکن (Box-Behnken Design) معروف‌ترین طرح‌های روش سطح پاسخ هستند. روش طرح مرکب مرکزی یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌ها است که با درنظرگرفتن تعداد عوامل موثر در فرآیند و محدوده آن‌ها، ماتریس آزمون را طراحی می‌کند. در این روش بر مبنای مقادیر مختلف α سطوح مختلف برای هر متغیر ایجاد می‌شود (در مقدار α=1 ماتریس طراحی سه سطح و در مقادیر غیر از ۱ ماتریس ۵ سطح خواهد داشت). مقدار α در پژوهش حاضر برابر ۱/۳ در نظر گرفته شد. ماتریس طراحی پارامترهای مستقل در پژوهش حاضر به همراه مقادیر سطوح اصلی در جدول ۲ آورده شده است.

با توجه به طراحی آزمایش با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب، برای تعداد ۷ پارامتر مستقل به عنوان ورودی، تعداد ۸۸ آزمایش تعیین شد. در نهایت نتایج حاصل برای گشتاور مورد نیاز فرآیند (T)، نیروی اعمالی به قالب ایکپ (RF)، کرنش پلاستیک موثر ایجاد شده در میله آلومینیومی ($\varepsilon_{peeq}$)، تنش موثر ($\bar{\sigma}$)، مقدار انحنا در میله پس از خروج از قالب ایکپ (ρ) و یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله ($STD_\varepsilon$) به‌دست آمد. تحلیل و تفسیر نتایج اجرا و مدل‌سازی ریاضی به همراه ضرایب حاکم بر آزمایش استخراج شد.

به منظور تعیین میزان انحنای میله خروجی از قالب، در ابتدا ۳ نقطه با فاصله مساوی از هم روی میله انتخاب می‌شود. پس از انجام فرآیند ایکپ مداوم، مختصات این سه نقطه ثبت و در یکی از نرم‌افزارهای طراحی این نقاط ترسیم می‌شوند. با عبور دادن یک دایره از این سه نقطه می‌توان شعاع انحنا را به‌دست آورد (شکل ٤-الف). مقدار معکوس شعاع انحنا برابر میزان انحنا یا تابیدگی میله خروجی از قالب در نظر گرفته می‌شود. به جهت تعیین میزان تنش موثر، کرنش موثر و توزیع کرنش در سطح مقطع میله، پس از عبور میله از قالب ایکپ به فاصله ۵ میلی‌متر از لبه قالب مقطعی زده شده است. با اندازه‌گیری مقادیر تنش و کرنش موثر در گره‌های موجود در این سطح مقطع، میانگین مقادیر آن‌ها گزارش می‌شود، از طرفی با اندازه‌گیری مقادیر کرنش پلاستیک مؤثر در گره‌های موجود در این سطح مقطع و محاسبه انحراف معیار داده‌ها،

**جدول ۲)** پارامترهای مستقل فرآیند با سطوح طراحی

| پارامترهای مستقل | سطح ۱ | سطح ۲ | سطح ۳ |
|---|---|---|---|
| **شعاع چرخ‌دوار (A) – میلی‌متر** | ۱۰۰ | ۱۲۵ | ۱۵۰ |
| **زاویه خم میله بر روی چرخ‌دوار (B)** | ۹۰° | ۱۸۰° | ۲۷۰° |
| **زاویه برخورد کانال قالب (C)** | ۹۰° | ۱۰۵° | ۱۲۰° |
| **زاویه گوشه بیرونی قالب (D)** | ۲۰° | ۴۵° | ۷۰° |
| **ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار (E)** | ۰/۳ | ۰/۴ | ۰/۵ |
| **ضریب اصطکاک بین میله و قالب (F)** | ۰/۰۵ | ۰/۱ | ۰/۱۵ |
| **نسبت ابعادی سطح مقطع کانال (G)** | ۱ | ۱/۲ | ۱/۴ |




(الف) (ب)

**شکل ۴)** الف) تعیین میزان انحنای میله پس از خروج از قالب ایکپ ب) نحوه اندازه‌گیری تنش و کرنش در سطح مقطع میله

یکنواختی یا غیریکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله بررسی می‌شود. بدین صورت که هر چه مقدار انحراف معیار عدد کوچکی باشد، توزیع کرنش در سطح مقطع یکنواخت‌تر خواهد بود (شکل ۴-ب).

## ۳- نتایج و بحث

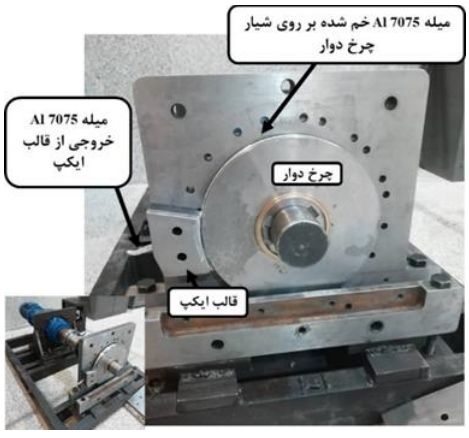
### ۳-۱- صحت‌سنجی شبیه‌سازی

به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی فرآیند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش، آزمون تجربی این فرآیند برای میله آلومینیومی ۷۰۷۵ به قطر 8 mm تحت شرایط ذکر شده در جدول ۳ اجرا شده است. در این آزمون میله آلومینیومی به محض واردشدن درون شیار روی چرخ‌دوار، با توجه به اصطکاک بین میله و دیوارهای شیار چرخ‌دوار به داخل کشیده شده و روی چرخ‌دوار خم شده و پس از حدود ۲۷۰° چرخش حول چرخ‌دوار با زبانه قالب برخورد کرده و از درون قالب ایکپ خارج می‌شود (شکل ۵-الف). به منظور به‌دست آوردن استحکام تسلیم میله آلومینیومی ۷۰۷۵ بعد از یک عبور ایکپ مداوم، آزمون فشار بر روی نمونه‌های ایکپ مداوم شده با استفاده از دستگاه SANTAM STD-600، در دمای اتاق و نسبت ابعادی (ارتفاع به قطر) برابر ۲ اجرا شد.

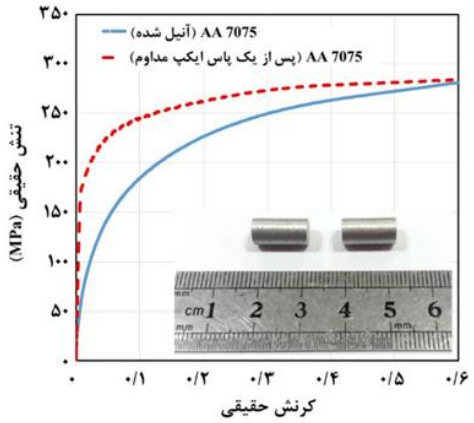
نتایج آزمون فشار نشان می‌دهد که استحکام تسلیم میله آلومینیومی از ۵۵ MPa به ۱۸۰ MPa افزایش یافته است؛ تقریبا ۲/۳ برابر استحکام نمونه اولیه است. منحنی تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم ۷۰۷۵ قبل و بعد از اجرای فرآیند ایکپ مداوم در شکل ۵-ب نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی ریاضی رفتار پلاستیک ماده از مدل کرنش سختی توانی به صورت $\sigma = k\varepsilon^n$ استفاده شد که در آن k ضریب سختی و n توان کرنش-سختی است. با مقایسه مقدار توان کرنش سختی نمونه‌های آلومینیومی قبل و بعد از اجرای فرآیند ایکپ مداوم می‌توان مشاهده کرد که توان کرنش سختی میله آلومینیومی از ۰/۲۳ به ۰/۱ کاهش یافته است. باید دقت داشت که توان کرنش‌سختی بر طبق یافته‌های تحلیلی و تجربی تقریبا معادل کرنش حقیقی در لحظه گلویی شدن در کشش می‌باشد[16] بر این اساس عدد کرنش سختی را می‌توان معادل با کرنش آغاز ناپایداری تفسیر کرد؛ لذا بر خلاف افزایش استحکام تسلیم ماده، توان کرنش‌سختی میله آلومینیومی از ۰/۲۳ به ۰/۱ کاهش یافته و این به معنی کاهش حدودا ۵۵ درصدی انعطاف‌پذیری است. همچنین مقادیر ضریب سختی قبل و بعد از اجرای فرآیند ایکپ مداوم به ترتیب برابر ۳۱۸ و ۳۰۳ مگاپاسکال است. پس از شبیه‌سازی فرآیند ایکپ مداوم میله آلومینیومی تحت شرایط ذکر شده در جدول ۳، میزان تنش موثر فون-میسز ایجادشده در میله ایکپ‌شده برابر ۱۹۵ مگاپاسکال بدست آمده که با مقایسه با تنش تسلیم ماده بعد از اجرای یک عبور فرآیند ایکپ مداوم (مقدار تنش تسلیم میله با استفاده از خط ۰/۲ درصد برابر با ۱۸۰ مگاپاسکال بدست آمد) مشخص می‌شود نتایج حدود ۷/۵ درصد اختلاف دارد که خطای قابل‌قبولی است و نشان از دقت مطلوب شبیه‌سازی المان محدود دارد.

**جدول ۳)** پارامترهای مورد استفاده در اجرای فرآیند ایکپ مداوم میله آلومینیومی ۷۰۷۵ به صورت عددی و تجربی

| پارامترها | مقادیر |
|---|---|
| زاویه برخورد کانال قالب ($\varphi$) | ۱۲۰° |
| زاویه گوشه بیرونی قالب ($\psi$) | ۰° |
| زاویه خم میله بر روی چرخ‌دوار ($\alpha$) | ۲۷۰° |
| ابعاد کانال قالب | ۷/۵ mm × ۷/۵ mm |
| شعاع چرخ‌دوار (R) | ۱۵۰ mm |
| ضریب اصطکاک میله و چرخ‌دوار ($\mu_r$) | ۰/۴ |
| ضریب اصطکاک میله و قالب ($\mu_d$) | ۰/۱ |




(الف)




(ب)

**شکل ۵)** الف) مجموعه ایکپ مداوم مقطع چهارگوش میله آلومینیومی ۷۰۷۵ ب) منحنی تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده و یک عبور ایکپ مداوم شده

### ۳-۲- صحت‌سنجی تحلیل واریانس

نتیجه‌گیری قطعی از نمودارها و نتایج ارائه شده مستلزم تایید اثرات نشان داده شده عوامل با استفاده از تحلیل واریانس است. این تحلیل با فرض بهینه‌بودن توزیع داده‌ها، گوسی‌بودن توزیع خطا و استقلال آن و ثابت‌بودن واریانس، به آزمون فرضیه تهی با استفاده از مقدار P می‌پردازد. پیروی‌نکردن باقیمانده‌ها از هیچ الگویی در شکل ۶-الف نمایانگر برقراری فرض استقلال و هچنین عدم وجود نقاط پرت در شکل ۶-ب نشان‌دهنده برقراربودن فرض نرمال‌بودن داده‌هاست. این شکل‌ها صحت فرض‌های نخستین تحلیل واریانس و در نتیجه صحت نتایج آن را تایید می‌کند. لازم به ذکر است که در تحلیل واریانس، متغیرهایی در فرآیند مؤثر هستند که مقدار P آن‌ها با درنظرگرفتن قابلیت اعتماد ۹۵٪، از ۰/۰۵ کمتر باشد. بر این اساس می‌توان از اثر عواملی که P آن‌ها از ۰/۰۵ بیشتر است، صرف‌نظر کرد.

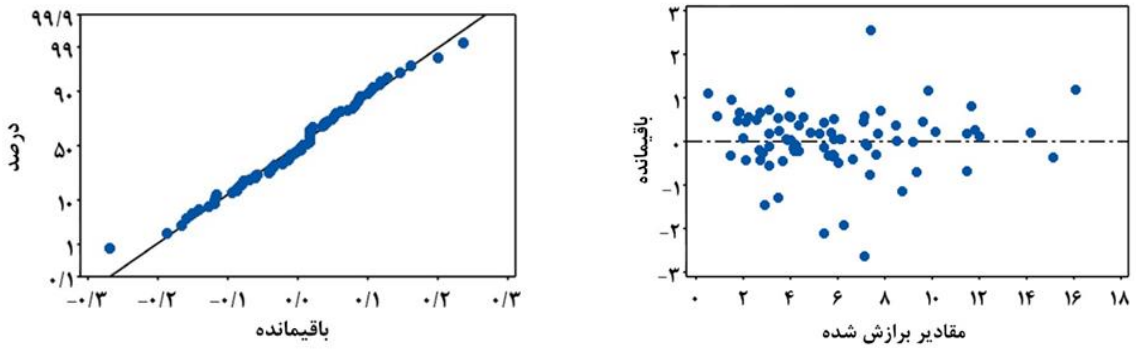
### ۳-۳- تحلیل واریانس

برای بررسی دقیق پارامترهای موثر در این فرآیند باید به دقت اثر عامل‌های اصلی و اثرات تقابلی آن‌ها را مورد ارزیابی و تحلیل قرار داد. به همین منظور ابتدا نمودار اثرات بهینه عوامل در فرآیند ایکپ مداوم میله آلومینیومی را بر روی میزان گشتاور موردنیاز فرآیند (T)، نیروی وارده بر قالب (RF)، کرنش پلاستیک موثر ($\varepsilon_{peeq}$)، تنش موثر ($\bar{\sigma}$)، یکنواختی کرنش در سطح مقطع میله ($STD_{\varepsilon}$) و مقدار انحنای میله خروجی ($\rho$) بررسی خواهد شد. بر طبق این نمودارها هرچه فاصله عامل از خط مورب بیشتر باشد، تاثیر آن عامل بر روی فرآیند معنی‌دارتر خواهد بود. لذا می‌توان با درنظرگرفتن عواملی که بیشترین اثر را دارند، تحلیل واریانس را اجرا و جدول تحلیل واریانس و مدل رگرسیونی برای هر پاسخ را ارائه کرد.

بررسی نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی میزان گشتاور موردنیاز فرآیند نشان‌دهنده این است که از بین عوامل مورد بررسی، عوامل اصلی ضریب اصطکاک بین میله و قالب ایکپ (F)، شعاع چرخ-دوار (A)، زاویه برخورد کانال‌های قالب (C)، نسبت ابعادی سطح مقطع کانال قالب (G)، زاویه خم میله بر روی چرخ‌دوار (B) و زاویه گوشه بیرونی قالب (D) بیشترین تاثیر را بر فرآیند (به ترتیب از مقدار بیشتر به کمتر) دارند. همچنین در بین اثرات تقابلی، اثر تقابلی BG بر روی فرآیند معنی‌دارتر است (شکل ۷-الف). حال با در نظر گرفتن این عوامل تحلیل واریانس را اجرا و جدول تحلیل واریانس (جدول ۴) و مدل رگرسیونی حاکم بر مسئله (رابطه ۳) ارائه می‌شود. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود از بین پارامترهای متغیر، عامل اصطکاک بین میله و سطوح قالب ایکپ (F) با ۴۸/۸۶ درصد بیشترین تاثیر را بر میزان گشتاور مورد نیاز فرآیند ایکپ مداوم میله آلومینیومی ۷۰۷۵ دارد. لازم به ذکر است که میزان ضریب تعیین مدل رگرسیونی ارائه شده در رابطه (۳) برابر ۹۳/۵۴٪ است. ضریب تعیین کیفیت برازش داده‌ها را با مدل مشخص می‌کند، که هر چه مقدار آن به عدد ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد، قدرت مدل برازش یافته بیشتر می‌باشد[17] . لازم به ذکر است که حذف پارامترها براساس نمودار اثرات بهینه باعث کاهش در مقدار ضریب تعیین مدل شده است.

$$\begin{aligned} T\,(kN.m) = {} & 11.39 + 0.0379A - 0.03609B \\ & + 0.0593C - 0.0914D + 2.2F \\ & - 15.20G - 0.000996AC + 0.4578AF \\ & + 0.0575AG + 0.03411BG \\ & + 0.000884CD - 0.669CF - 0.2127DF \\ & + 60.1FG \end{aligned} \qquad (۳)$$

نمودار اثرات بهینه عوامل بر روی میزان نیروی وارد بر قالب ایکپ (شکل ۷-ب) نشان دهنده این است که عوامل اصلی ضریب اصطکاک بین میله و قالب ایکپ (F)، زاویه برخورد کانال‌های قالب (C) و زاویه گوشه بیرونی قالب (D) تاثیر گذار هستند. همچنین در بین اثرات تقابلی، اثر تقابلی CF بر روی نیروی وارده اثر معنی‌دارتری دارد. با در نظر گرفتن این عوامل تحلیل واریانس اجرا و جدول تحلیل واریانس (جدول ۴) و مدل رگرسیونی حاکم بر مسئله (رابطه ۴) ارائه می‌شود. با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود از بین پارامترهای متغیر، عامل اصطکاک بین میله و سطوح قالب ایکپ (F) با ۵۳/۳۵٪ بیشترین تاثیر را بر میزان نیروی اعمالی بر قالب ایکپ دارد. میزان ضریب تعیین مدل رگرسیونی ارائه شده در رابطه (۴) برابر ۹۴/۵۵٪ است.




(الف) (ب)

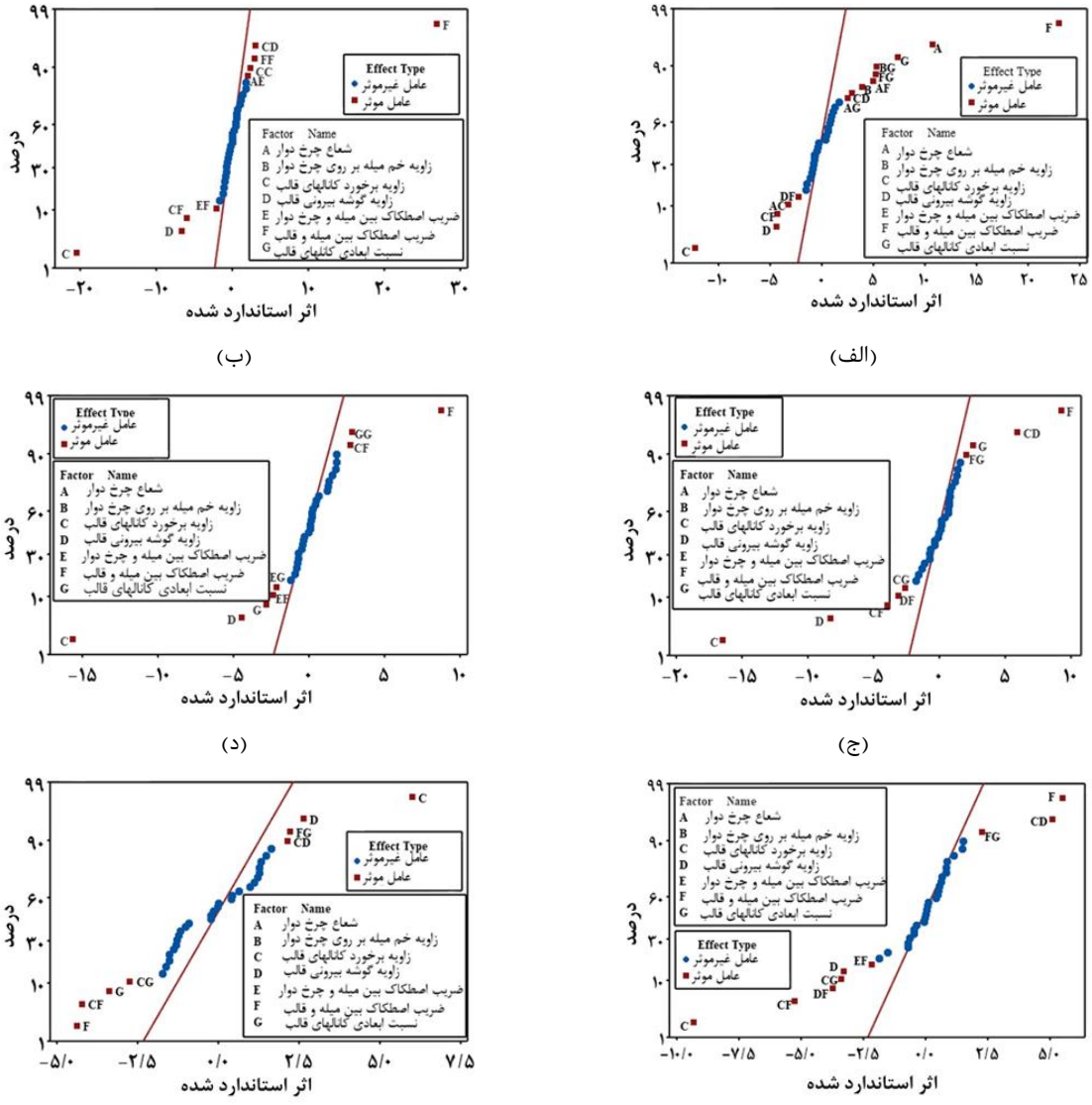
**شکل ۶)** الف) نمودار مقادیر باقیمانده به مقادیر برازش یافته ب) نمودار احتمال مقادیر باقیمانده

$$RF(kN) = 193.9 - 0.1447A - 2.77C - 0.497D - 28.4E + 434F + 0.01128C^2 + 1316F^2 + 0.372AE + 0.00362CD - 3.647CF - 193.8EF \quad (٤)$$

بررسی نمودار اثرات بهینه عوامل بر روی میزان کرنش پلاستیک ایجاد شده در میله در شکل ۷-ج نشان دهنده این است که از بین عوامل مورد بررسی، عوامل اصلی زاویه برخورد کانال‌های قالب (C)، ضریب اصطکاک بین میله و قالب ایکپ (F) و زاویه گوشه بیرونی قالب (D) تاثیر گذارتر می‌باشند و در بین اثرات تقابلی، اثر تقابلی CD بر روی کرنش فرآیند معنی‌دارتر است. تحلیل واریانس با در نظر گرفتن این عوامل اجرا و جدول تحلیل واریانس (جدول ۴) و مدل رگرسیونی حاکم بر مسئله (رابطه ۵) ارائه می‌شود. مشاهده می‌شود از بین پارامترهای متغیر، عامل زاویه برخورد کانال‌های قالب (C) با ۴۴/۴۰٪ بیشترین تاثیر را بر میزان کرنش پلاستیک ایجاد شده در میله دارد (جدول ۴).

$$\varepsilon_{Peeq} = 1.83 - 0.0063C - 0.0504D + 17.51F + 2.40G + 0.000460CD - 0.1532CF - 0.0251CG - 0.0733DF + 5.92FG \quad (۵)$$

بر طبق نمودار اثرات نرمال عوامل برای میزان تنش موثر میله (شکل ۷-د) مشخص شد که از بین عوامل مورد بررسی، عوامل اصلی زاویه برخورد کانال‌های قالب (C)، ضریب اصطکاک بین میله و قالب ایکپ (F)، زاویه گوشه بیرونی قالب (D) و نسبت ابعادی کانال قالب (G) عوامل تاثیر گذار می‌باشند و در بین اثرات تقابلی، اثر تقابلی مرتبه دوم GG یا G2 بر روی فرآیند اثر معنی‌دارتری دارد. با در نظر گرفتن این عوامل تحلیل واریانس را اجرا و جدول تحلیل واریانس (جدول ۴) و مدل رگرسیونی حاکم بر مسئله (رابطه ۶) ارائه می‌شود. مشاهده می‌شود از بین پارامترهای متغیر، عامل زاویه برخورد کانال‌های قالب (C) با ۵۱٪/۱۴ بیشترین تاثیر را بر میزان تنش موثر ایجاد شده در میله دارد.




**شکل ۷)** الف) نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی الف) گشتاور مورد نیاز ب) نیروی وارد بر قالب ایکپ ج) کرنش پلاستیک موثر د) تنش موثر و) یکنواختی کرنش در سطح مقطع میله ی) انحنای میله خروجی

**جدول ۴)** جدول تحلیل واریانس برای پاسخ‌های مورد نظر در بررسی فرآیند ایکپ مداوم

| پاسخ | گشتاور فرآیند ایکپ مداوم (T) | | نیروی اعمالی به قالب ایکپ (RF) | | کرنش پلاستیک موثر ایجاد شده در تنش موثر ایجاد شده در میله ($\varepsilon_{peeq}$) | | میله ($\bar{\sigma}$) | | یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله ($STD_\varepsilon$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| عامل | درصد مشارکت | مقدار P | درصد مشارکت | مقدار P | درصد مشارکت | مقدار P | درصد مشارکت | مقدار P | درصد مشارکت | مقدار P |
| مدل | ۹۳/۵۴ | ۰/۰۰ | ۹۴/۵۵ | ۰/۰۰ | ۸۲/۳۸ | ۰/۰۰ | ۸۴/۵۲ | ۰/۰۰ | ۷۴/۰۹ | ۰/۰۰ |
| A | ۱۰/۵۹ | ۰/۰۰ | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| B | ۱/۳۹ | ۰/۰۰ | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| C | ۱۳/۹۸ | ۰/۰۰ | ۳۱ | ۰/۰۰ | ۴۴/۴۰ | ۰/۰۰ | ۵۱/۱۴ | ۰/۰۰ | ۲۹/۲۰ | ۰/۰۰ |
| D | ۱/۸۰ | ۰/۰۰ | ۳/۲۵ | ۰/۰۰ | ۱۱/۳۴ | ۰/۰۰ | ۴/۱۵ | ۰/۰۰ | ۳/۶۳ | ۰/۰۰۲ |
| E | ----- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ۰/۷۷ | ۰/۱۳۷ |
| F | ۴۸/۸۶ | ۰/۰۰ | ۵۳/۳۵ | ۰/۰۰ | ۱۳/۹۲ | ۰/۰۰ | ۱۶/۰۷ | ۰/۰۰ | ۱۰/۲۰ | ۰/۰۰ |
| G | ۵ | ۰/۰۰ | ---- | ---- | ۱/۰۳ | ۰/۰۳۶ | ۱/۶۴ | ۰/۰۰۵ | ---- | ---- |
| C2 | ---- | ---- | ۲/۳۴ | ۰/۰۳۰ | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| F2 | ---- | ---- | ۰/۵۹ | ۰/۰۰۵ | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| G2 | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ۷/۵ | ۰/۰۰ | ---- | ---- |
| AC | ۰/۹۷ | ۰/۰۰۱ | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| AE | ---- | ---- | ۰/۳۱ | ۰/۰۴۰ | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| AF | ۲/۲۷ | ۰/۰۰ | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| AG | ۰/۵۷ | ۰/۰۱۳ | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| BG | ۲/۶۱ | ۰/۰۰ | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| CD | ۰/۷۶ | ۰/۰۰۴ | ۰/۶۷ | ۰/۰۰۳ | ۵/۷۴ | ۰/۰۰ | ---- | ---- | ۸/۶۷ | ۰/۰۰ |
| CF | ۱/۷۴ | ۰/۰۰ | ۲/۷ | ۰/۰۰ | ۲/۵۵ | ۰/۰۰۱ | ۱/۶ | ۰/۰۰۶ | ۹/۲۸ | ۰/۰۰ |
| CG | ---- | ---- | ---- | ---- | ۱/۱۰ | ۰/۰۳۰ | ---- | ---- | ۳/۹ | ۰/۰۰۱ |
| DF | ۰/۴۹ | ۰/۰۲۱ | ---- | ---- | ۱/۶۲ | ۰/۰۰۹ | ---- | ---- | ۴/۷۱ | ۰/۰۰ |
| EF | ---- | ---- | ۰/۳۴ | ۰/۰۳۳ | ---- | ---- | ۱/۱۵ | ۰/۰۱۹ | ۱/۵۸ | ۰/۰۳۵ |
| EG | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ۰/۹۸ | ۰/۰۲۹ | ---- | ---- |
| FG | ۲/۵ | ۰/۰۰ | ---- | ---- | ۰/۶۸ | ۰/۰۸۷ | ---- | ---- | ۱/۷۱ | ۰/۰۲۸ |
| خطا | ۶/۴۶ | | ۵/۴۵ | | ۱۷/۶۲ | | ۱۵/۴۸ | | ۲۵/۹۱ | |
| کل | ۱۰۰ | | ۱۰۰ | | ۱۰۰ | | ۱۰۰ | | ۱۰۰ | |

$$\bar{\sigma} = 866.8 - 1.527C - 0.1915D + 207.5E - 33F - 712G + 310.1G^2 + 4.07C - 516EF - 119.1EG \quad (۶)$$

نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی میزان یکنواختی کرنش در سطح مقطع میله نشان دهنده این است که از بین عوامل مورد بررسی، عوامل اصلی زاویه برخورد کانال‌های قالب (C)، ضریب اصطکاک بین میله و قالب ایکپ (F) و زاویه گوشه بیرونی قالب (D) تاثیرگذار بوده و در بین اثرات تقابلی، اثر تقابلی CF بر روی فرآیند اثر معنی‌دارتری است (شکل ۷-و). با در نظر گرفتن این عوامل تحلیل واریانس اجرا و جدول تحلیل واریانس (جدول ۴) و مدل رگرسیونی حاکم بر مسئله (رابطه ۷) ارائه می‌شود. برطبق نمودار اثرات بهینه عوامل بر روی میزان انحنای میله خروجی از قالب ایکپ (شکل ۷-ی) عوامل اصلی زاویه برخورد کانال‌های قالب (C)، ضریب اصطکاک بین میله و قالب ایکپ (F)، نسبت ابعادی کانال قالب (G) و زاویه گوشه بیرونی قالب (D) عوامل تاثیر گذار بر انحنای میله می‌باشند و در بین اثرات تقابلی نیز، اثر تقابلی CF بر روی آن اثر معنی‌دارتری است. با در نظر گرفتن این شرایط تحلیل واریانس اجرا و مدل رگرسیونی حاکم بر مسئله (رابطه ۸) ارائه می‌شود. همان‌طورکه در جدول ۴ مشاهده می‌شود از بین پارامترهای متغیر، عامل زاویه برخورد کانال‌های قالب (C) با ۲۹٪/۲۰ بیشترین تاثیر را بر میزان یکنواختی کرنش در سطح مقطع میله دارد.

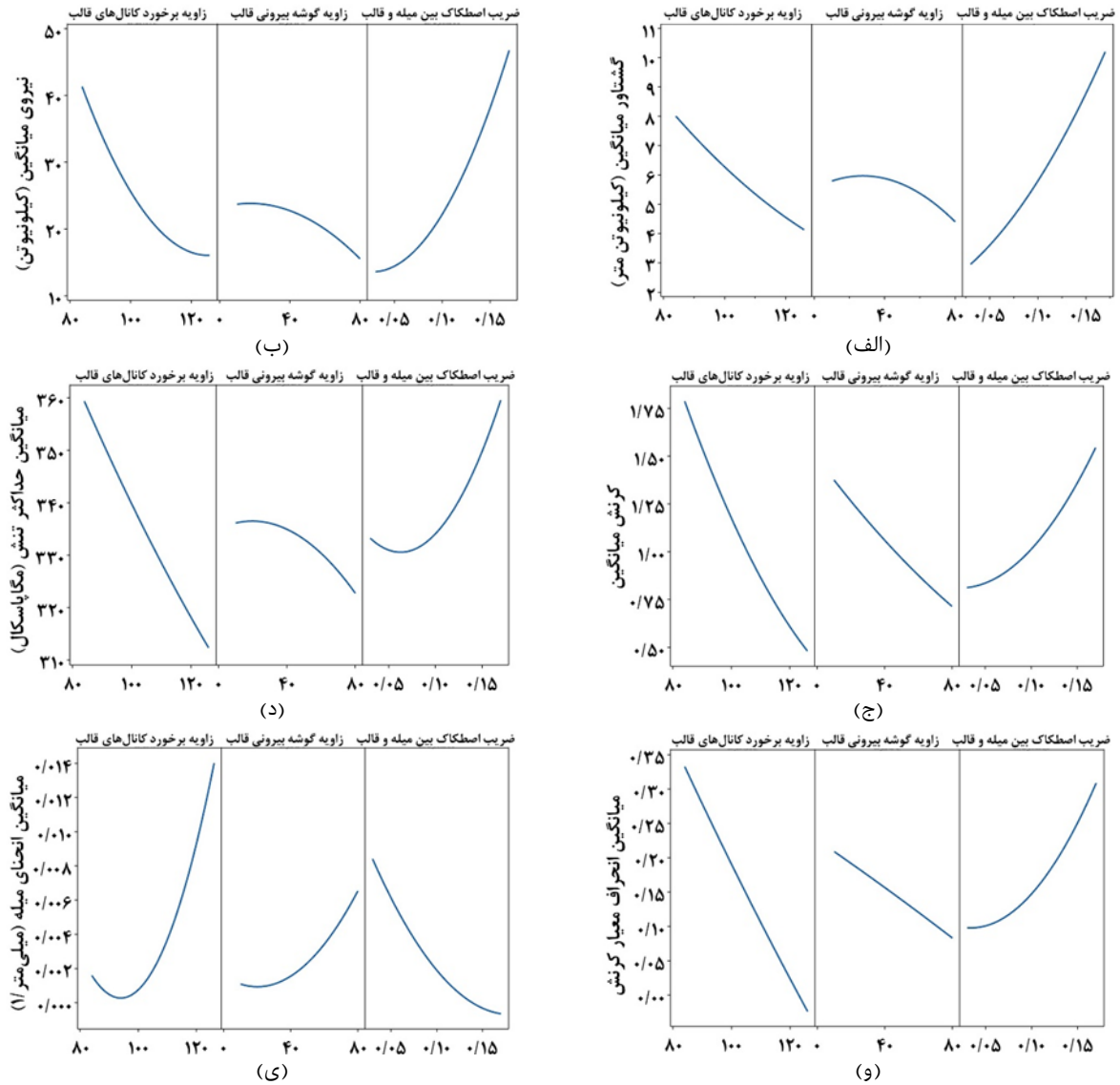
$$STD_\varepsilon = -1.152 + 0.01189C - 0.01756D + 0.401E + 12.36F + 1.435 + 0.000190CD - 0.0983CF - 0.01593CG - 0.0420DF - 6F + 3.16FG \quad (۷)$$

$$\rho = -0.0995 + 0.001359C - 0.000377D + 0.182F + 0.0433G + 0.000004C - 0.00428CF - 0.000692CG + 0.1685FG \quad (۸)$$

### ۳-۴- اثرات اصلی پارامترها

با توجه به جدول تحلیل واریانس پاسخ‌ها (جدول ٤) مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک بین میله و قالب (F)، زاویه برخورد کانال‌های قالب (C) و زاویه گوشه بیرونی قالب (D) بر روی تمامی پاسخ‌ها اثر معنی‌داری دارند. به همین منظور در ادامه نحوه تاثیر این عوامل بر روی تمامی پاسخ‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

همانطور که در جدول تحلیل واریانس مربوط به میزان گشتاور فرآیند ایکپ مداوم میله آلومینیومی ۷۰۷۵ مشخص است، ضریب اصطکاک سطوح قالب و زوایای آن بر میزان گشتاور فرآیند تاثیر معنی‌داری دارند. این موضوع در شکل ۸-الف نیز به وضوح قابل مشاهده است؛ به گونه‌ای که با افزایش زوایای قالب میزان گشتاور




**شکل ۸)** چگونگی تاثیر ضریب اصطکاک بین میله و قالب، زاویه برخورد کانال‌های قالب و زاویه گوشه بیرونی قالب بر الف)گشتاور فرآیند ب)نیروی اعمالی بر قالب ج)کرنش پلاستیک د)تنش موثر و)یکنواختی کرنش ی)انحنای میله آلومینیومی

کاهش می‌یابد؛ که مقدار این کاهش با تغییر زاویه برخورد کانال-های قالب (C) شدیدتر است. از طرفی با افزایش مقدار ضریب اصطکاک بین سطوح میله و قالب ایکپ (F) مقدار گشتاور فرآیند ایکپ مداوم به میزان ۳۵۰٪ افزایش پیدا کرده است. تاثیر این عوامل بر روی میزان نیروی اعمالی بر قالب ایکپ روندی مشابه با تاثیر آن‌ها بر روی گشتاور دارد البته شیب این تغییرات نسبتا بیشتر است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار ضریب اصطکاک بین سطوح میله و قالب ایکپ (F)، مقدار نیروی اعمالی بر قالب ایکپ به صورت غیرخطی از ۱۲ به حدود ٤٥ کیلونیوتن افزایش یافته است (شکل ۸-ب). در مورد چگونگی تاثیر زوایای قالب ایکپ بر روی گشتاور فرآیند و نیروی اعمالی بر قالب می‌توان ذکر کرد که با افزایش زوایای قالب از °۹۰ به °۱۲۰ سیلان ماده در داخل کانال‌های قالب نسبت به حالتی که این زوایا کوچک باشند، راحت‌تر خواهد بود. با توجه به شکل ۸-ج مشاهده می‌شود که با افزایش زوایای قالب و افزایش ضریب اصطکاک، میزان کرنش پلاستیک ایجاد شده در میله به ترتیب کاهش و افزایش خواهد یافت. مشاهده می‌شود که نحوه تاثیر شرایط اصطکاکی درون قالب ایکپ و زوایای آن بر روی میزان تنش موثر ایجاد شده در میله و یکنواختی توزیع کرنش در آن، از لحاظ شکل ظاهری رفتاری نسبتا مشابه با میزان کرنش ایجاد شده در میله دارد. بدین معنی که افزایش زوایای قالب موجب کاهش تنش و بهبود یکنواختی توزیع کرنش در میله (یا کاهش انحراف معیار کرنش در سطح مقطع) می‌گردد. از طرفی افزایش ضریب اصطکاک میزان تنش موثر در میله را افزایش می‌دهد (شکل ۸-د) و باعث افزایش پارامتر یکنواختی توزیع کرنش (شکل ۸-و) و در نتیجه ناهمگنی کرنش در سطح مقطع میله افزایش می‌یابد. می‌توان اذعان داشت که هر چه زوایای قالب کوچکتر باشد تغییرشکل برشی ماده بیشتر و میزان تنش و کرنش ایجاد شده در ماده افزایش می‌یابد؛ در حالیکه

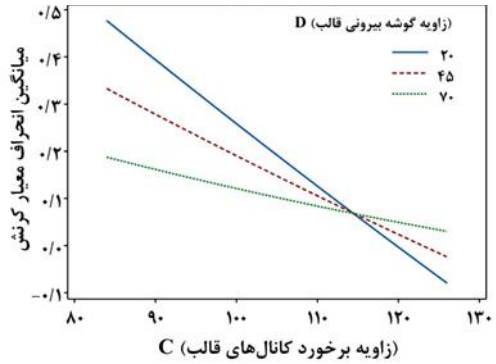
توزیع کرنش در سطح مقطع میله ناهمگن‌تر خواهد شد. افزایش ضریب اصطکاک بین میله و قالب باعث افزایش تغییرشکل برشی ساده در اثر افزایش فشار تماسی می‌شود؛ که تاثیری مشابه با حالت قبل خواهد داشت.

در شکل ۸-ی مشاهده می‌گردد که افزایش زوایای قالب باعث افزایش انحنای میله آلومینیومی خروجی از قالب شده که امری نامطلوب خواهد بود. از طرفی افزایش ضریب اصطکاک در درون قالب باعث بهبود کیفیت میله خروجی با کاهش انحنا خواهد شد.

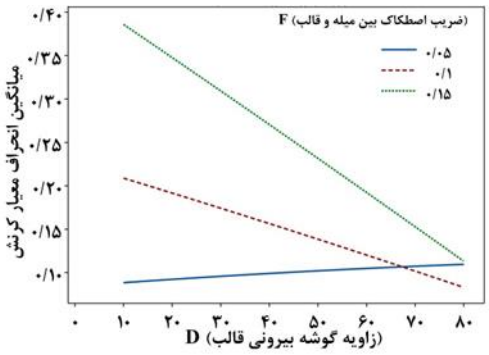
**۳-۵- اثرات تقابلی پارامترها**

اگر بین پارامترها اثر تقابلی وجود داشته باشد، نتیجه‌گیری بدون در نظر گرفتن این اثرات فاقد اعتبار علمی خواهد بود. با توجه به جدول ۴ و با بررسی مقادیر P و درصد مشارکت (با فرض بالاتر از ۴ درصد) می‌توان دریافت که میزان یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله از اثرات تقابلی بین ضریب اصطکاک درون قالب اگر بین پارامترها اثر تقابلی وجود داشته باشد، نتیجه‌گیری بدون در نظر گرفتن این اثرات فاقد اعتبار علمی خواهد بود. با توجه به جدول ۴ و با بررسی مقادیر P و درصد مشارکت (با فرض بالاتر از ۴ درصد) می‌توان دریافت که میزان یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله از اثرات تقابلی بین ضریب اصطکاک درون قالب و زوایای قالب ایکپ (CF و DF)، و همچنین اثر تقابلی بین دو زاویه قالب (CD) تاثیر می‌پذیرد. علاوه بر این اثر تقابلی بین دو زاویه قالب (CD) بر روی میزان کرنش پلاستیک ایجاد شده در میله نیز اثرگذار است. شکل ۹ اثرات تقابلی برای میزان یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله را نمایش می‌دهد. این اثرات در شکل ۹-الف باعث می‌شود تا در زاویه کانال قالب 90° (C) با افزایش زاویه گوشه قالب (D) از ۲۰° به ۷۰° مقدار کرنش در سطح مقطع یکنواخت‌تر شود (به عبارتی مقدار انحراف معیار کرنش در سطح مقطع میله کاهش می‌یابد) و با افزایش مقدار زاویه کانال قالب تا حدود ۱۱۵° این روند ادامه دارد، اما از مقدار ۱۱۵° به بعد دقیقا عکس حالت قبل اتفاق افتاده و با افزایش زاویای قالب مقدار یکنواختی کرنش در سطح مقطع کاهش می‌یابد.

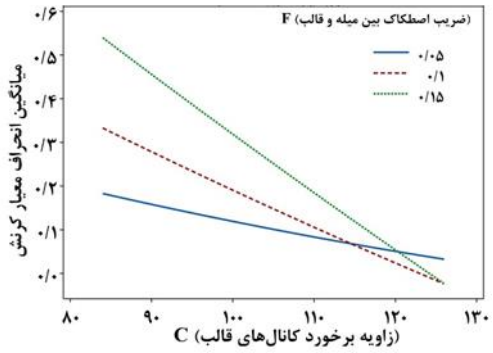
همان‌طور که پیشتر ذکر شد با توجه به جدول ۴ مشاهده شد که اثر تقابلی CF بر روی تمامی پارامترهای خروجی تاثیر دارد. به منظور بررسی بهتر و دقیق‌تر، سطح پاسخ سه بعدی مربوط به اثر زاویه برخورد کانال قالب و ضریب اصطکاک بین میله و قالب (CF) بر روی پارامترهای خروجی در شکل ۱۰ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۰-الف، حداکثر میزان گشتاور مورد نیاز فرآیند ایکپ مداوم تحت شرایطی ایجاد خواهد شد که زاویه کانال قالب در کمترین مقدار خود و ضریب اصطکاک قالب در بیشترین حالت خود باشد. لازم به‌ذکر است که در حالتی که زاویه کانال قالب در کمترین مقدار خود (۹۰°) ثابت در نظر گرفته شده باشد با افزایش ضریب اصطکاک قالب، شیب تغییرات گشتاور شدید خواهد بود اما در مقدار بزرگتر زاویه قالب این شیب کندتر است. از طرفی حداکثر میزان نیرو اعمال شده به قالب نیز در شرایطی که زاویه کانال قالب در کمترین حالت و ضریب اصطکاک قالب در بیشترین حالت خود باشد؛ ایجاد خواهد شد. مشابه حالت قبل شیب تغییرات در زاویه کمتر قالب بیشتر از شیب تغییرات در زاویه بزرگتر قالب خواهد بود؛ با این تفاوت که شیب تغییرات خطی نیست (شکل ۱۰-ب).




(الف)

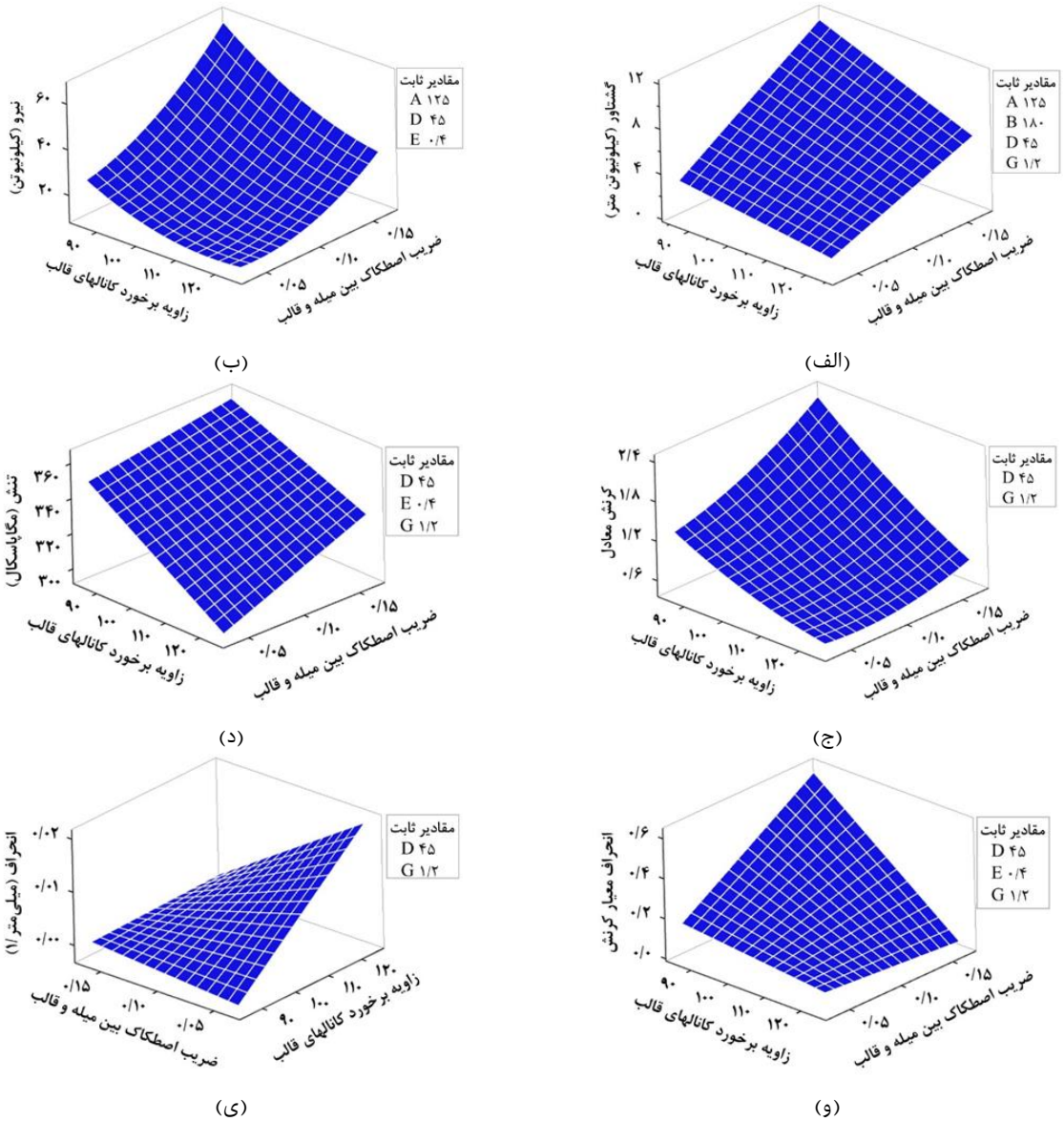



(ج)




(ب)

**شکل ۹)** اثرات تقابلی پارامترها بر یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله آلومینیومی؛ الف) اثر تقابلی بین زوایای قالب (CD)، ب) اثر تقابلی بین اصطکاک قالب و زاویه برخورد کانال قالب (CF)، ج) اثر تقابلی بین اصطکاک قالب و زاویه گوشه آن (DF)




**شکل ۱۰)** چگونگی تاثیر اثر تقابلی بین ضریب اصطکاک قالب و زاویه برخورد کانال قالب (CF) بر پاسخ‌ها؛ الف)گشتاور فرآیند ایکپ مداوم، ب) نیروی اعمالی بر قالب، ج) کرنش ایجاد شده در میله، د)تنش ایجاد شده در میله، و) یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله، ی) انحنا در میله خروجی از قالب ایکپ

با ثابت در نظر گرفتن زاویه کانال قالب در کمترین حالت با افزایش ضریب اصطکاک قالب شیب کرنش ایجاد شده در میله تند بوده که با افزایش زاویه کانال قالب به سمت بیشترین مقدار خود شیب تغییرات کرنش کندتر خواهد بود. از طرفی نیز بیشترین مقدار تنش ایجاد شده در میله زمانی خواهد بود که مقدار زاویه کانال قالب در کمترین و ضریب اصطکاک قالب در بیشترین حالت خود باشد(شکل ۱۰-د). با توجه به شکل ۱۰-و بیشترین مقدار پارامتر یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله زمانی رخ می‌دهد که مقدار زاویه کانال قالب در کمترین حالت و مقدار ضریب اصطکاک قالب در بیشترین حالت خود باشد؛ این بدان معنی است که در این حالت توزیع کرنش در سطح مقطع میله یکنواختی خوبی ندارد. با توجه به شکل ۱۰-ی مشاهده می‌شود که کمترین میزان انحنا در میله خروجی در کمترین مقدار ضریب اصطکاک قالب و زاویه آن رخ خواهد داد که با ثابت در نظر گرفتن ضریب اصطکاک قالب در کمترین حالت با افزایش زاویه کانال قالب شیب تغییرات افزایشی انحنا در میله خروجی تند خواهد بود.

### ۳-۶- انتخاب حالت بهینه

اغلب مهندسان تمایل دارند به شرایط بهینه پارامترهای ورودی هر فرآیند (مقادیر حداقل و یا حداکثر برای پارامترهای خروجی) به جهت رسیدن به کیفیت مطلوب دست پیدا کنند. همان‌طور که ذکر شد برخی از پاسخ‌ها اثر عکس روی یکدیگر دارند و افزایش در یکی منجر به کاهش دیگری می‌شود، به عبارت دیگر بین پارامترها اثر تقابلی وجود دارد. در نتیجه باید حالتی را انتخاب نمود که هریك از پاسخ‌ها به سطحی قابل‌قبول از مطلوبیت دست یابند.

برای این کار از قسمت بهینه‌ساز پاسخ نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است.

به منظور افزایش بهره‌وری در فرآیند ایکپ مدوام با مقطع چهارگوش از میله آلومینیومی ۷۰۷۵، نیاز است که متغیرهای پاسخ تحت کنترل قرار گیرند. لذا هدف مطلوب در این پژوهش کاهش گشتاور موردنیاز فرآیند، یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله خروجی، افزایش استحکام میله و کاهش میزان انحنای میله خروجی از قالب ایکپ به عنوان یک پارامتر کیفی محصول می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، نرم‌افزار مینی‌تب با دقت ۹۸ درصدی تابع مطلوبیت خود، مقادیر موجود در جدول ۵ را برای پارامترهای ورودی فرآیند ایکپ مداوم پیش‌بینی کرده است. عملا برای اجرای موفقیت‌آمیز فرآیند ایکپ مداوم هر چه مقدار زاویه خم بزرگتر و ضریب اصطکاک میله و چرخ‌دوار بیشتر باشد، مطلوب‌تر خواهد بود؛ از طرفی برای رسیدن به کرنش یکنواخت‌تر در سطح مقطع میله باید زاویه گوشه قالب بزرگتر و به منظـــور کاهش نیروی اعمالی بر قالب هم ضریب اصطکاک بین میله و قالب باید کمینه باشد.

تحت این شرایط پیش‌بینی شده، مقادیر گشتاور، تنش، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنا میله خروجی توسط نرم‌افزار مینی‌تب به ترتیب برابر ۲/۰۵۳ کیلونیوتن‌متر، ۳۶۹/۹۵ مگاپاسکال، ۰/۰۸۱۴ و ۰/۰۰۰۶ میلی‌متر پیش‌بینی شده است.

با شبیه‌سازی فرآیند ایکپ مداوم تحت پارامترهای ورودی پیش‌بینی شده موجود در جدول ۵ مقادیر پاسخ برای گشتاور، تنش، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنای میله خروجی از قالب به ترتیب برابر ۲/۰۸۲ کیلونیوتن‌متر، ۳۷۰ مگاپاسکال، ۰/۰۷۳۹ و ۰/۰۰۱۵ میلی‌متر به‌دست آمده است.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش چگونگی تاثیر پارامترهای مختلف فرآیند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش برای میله آلومینیومی ۷۰۷۵ از قبیل شعاع چرخ‌دوار (R)، زاویه‌ی خم میله بر روی چرخ‌دوار ($\alpha$)، زاویه برخورد کانال‌های قالب ($\varphi$)، زاویه گوشه خارجی قالب ($\psi$)، ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار ($\mu_r$)، ضریب اصطکاک بین میله و کانال قالب ($\mu_d$) و نسبت ابعادی سطح مقطع کانال قالب ($a/b$) بر روی گشتاور مورد نیاز فرآیند ($T$)، نیروی وارد شده بر قالب (RF)، کرنش پلاستیک ایجاد شده در میله آلومینیومی ($\varepsilon_{peeq}$)، میزان تنش موثر میله ($\bar{\sigma}$)، میزان انحنا میله پس از خروج از قالب ($\rho$) و یکنواختی توزیع کرنش ($STD_\varepsilon$) در سطح مقطع میله با استفاده از روش سطح پاسخ بررسی شده است. هدف انتخاب مقادیر بهینه هر یک از پارامترها به منظور بهبود عملکرد فرآیند ایکپ مداوم است. صحت‌سنجی مدل المان محدود فرآیند ایکپ مداوم میله آلومینیومی ۷۰۷۵ با اجرا و مقایسه نتایج تجربی و عددی این فرآیند انجام شد. در ادامه مهمترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر ارائه شده است:

در شبیه‌سازی فرآیند ایکپ مداوم میله آلومینیومی با مقطع چهارگوش، میزان تنش موثر فون-میسز ایجاد شده در میله ایکپ شده برابر ۱۹۵ مگاپاسکال بدست آمده است. میزان تنش تسلیم ماده بعد از اجرای یک عبور فرآیند ایکپ مداوم به صورت تجربی از مقدار ۵۵ مگاپاسکل به ۱۸۰ مگاپاسکال افزایش یافته است. مقایسه مقادیر تنش تجربی و عددی فرآیند اختلافی حدود ۷/۵ درصدی داشته که نشان از دقت مطلوب مدل المان محدود دارد.

تحلیل واریانس مربوط به میزان گشتاور فرآیند ایکپ مداوم نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک سطوح قالب و زوایای آن بر میزان گشتاور فرآیند تاثیر معنی‌داری دارند. مشاهده می‌گردد که پارامتر اصطکاک بین میله و سطح قالب ایکپ (F) بیشترین تاثیر (۴۹٪) بر روی میزان گشتاور فرآیند دارد. به طوری که با افزایش مقدار ضریب اصطکاک بین سطوح میله و قالب (F) مقدار گشتاور فرآیند ایکپ مداوم به میزان ۳۵۰٪ افزایش پیدا می‌کند.

بیشترین تاثیر بر روی میزان نیروی اعمالی بر قالب ایکپ را پارامتر ضریب اصطکاک درون قالب (F) با درصد مشارکتی در حدود ۵۳٪ داراست. به طوری که با افزایش مقدار ضریب اصطکاک درون قالب (F)، مقدار نیروی اعمالی بر آن به صورت غیرخطی از ۱۲ به حدود ۴۵ کیلونیوتن افزایش یافته است.

مشاهده می‌شود با افزایش زوایای قالب یکنواختی کرنش در سطح مقطع میله بهبود یافته، از طرفی افزایش ضریب اصطکاک باعث ناهمگنی کرنش در سطح مقطع میله می‌شود. همچنین افزایش زوایای قالب باعث افزایش انحنای میله خروجی از قالب نیز می‌شود که از نظر کیفی نامطلوب خواهد بود. از طرفی افزایش ضریب اصطکاک در درون قالب باعث بهبود کیفیت میله خروجی با کاهش انحنا خواهد شد اما این افزایش اصطکاک، افزایش گشتاور و نیروی اعمالی را هم در پی خواهد داشت.

بهینه‌سازی فرآیند با هدف کاهش گشتاور فرایند، یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله، افزایش استحکام میله و کاهش میزان انحنای میله خروجی از قالب ایکپ به عنوان یک پارامتر کیفی محصول انجام شد. نرم‌افزار مینی‌تب با دقت ۹۸ درصدی مقادیر بهینه را به ترتیب برای پارامترهای شعاع چرخ‌دوار، زاویه‌ی خم میله، زوایه کانال قالب، زاویه گوشه قالب، ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار، ضریب اصطکاک بین میله و قالب و نسبت

**جدول ۵)** مقادیر بهینه پارامترهای ورودی فرآیند ایکپ مداوم میله آلومینیومی ۷۰۷۵

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| شعاع چرخ‌دوار ($R$) | ۹۲/۵ |
| زاویه خم میله بر روی چرخ‌دوار ($\alpha$) | ۲۹۷° |
| زاویه برخورد کانال قالب ($\varphi$) | ۹۰° |
| زاویه گوشه بیرونی قالب ($\Psi$) | ۷۳/۵° |
| ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار ($\mu_r$) | ۰/۵۳ |
| ضریب اصطکاک بین میله و قالب ($\mu_d$) | ۰/۰۳۷ |
| نسبت ابعادی سطح مقطع کانال قالب ($a/b$) | ۰/۹۴ |

ابعادی کانال برابر ۹۲/۵ mm، ۲۹۷°، ۹۰°، ۷۳/۵°، ۰/۵۳، ۰/۰۳۷ و ۰/۹٤ به‌دست آورده است. با استفاده از این مقادیر بهینه میزان گشتاور، تنش، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنا میله خروجی توسط نرم‌افزار مینی‌تب به ترتیب برابر ۲/۰۵۳ kN.m، ۳٦۹/۹۵ MPa، ۰/۰۸۱٤ و ۰/۰۰۰٦ mm پیش‌بینی شده است.

در شبیه‌سازی فرآیند ایکپ مداوم با مقادیر بهینه پارامترها؛ مقادیر پاسخ برای گشتاور، تنش، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنای میله خروجی از قالب را به ترتیب برابر ۲/۰۸۲ کیلونیوتن-متر، ۳۷۰ مگاپاسکال، ۰/۰۷۳۹ و ۰/۰۰۱۵ میلی‌متر به‌دست آمده است.

از بین پارامترها، زوایای کانال قالب و ضریب اصطکاک بین میله و قالب بر روی تمامی پاسخ‌ها تاثیری معنی‌دار دارد. از طرفی پارامتر زاویه برخورد کانال قالب (C) بیشترین تاثیر را بر روی تنش موثر، کرنش پلاستیک موثر، یکنواختی توزیع کرنش و میزان انحنای میله خروجی به ترتیب با مقدار درصد مشارکت ۵۱/۱٤، ٤٤/٤۰، ۲۹/۲۰ و ۱۸/۰۱ دارد.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که این مقاله حاصل دستاوردهای پژوهشی ایشان بوده و این مقاله یا بخشی از آن در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسیده است.

**تعارض منافع:** نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که هیچگونه تعارض منافعی بین هر یک از عوامل مشارکت‌کننده در تولید این مقاله (پشتیبانان علمی و نویسندگان) وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**منابع مالی:** هزینه‌ها از طریق گرنت پژوهشی اختصاص یافته شده توسط دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود تامین شده است.

## منابع

1- Entezami SS, Honarpisheh M. A study on the hardness of 7075 and 5052 aluminum alloys in the equal channel angular rolling process. Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège. 2016;85:879-89.
2- Djavanroodi F, Ebrahimi M. Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation. Materials Science and Engineering: A. 2010;527(4-5):1230-5.
3- Wei W, Zhang W, Wei KX, Zhong Y, Cheng G, Hu J. Finite element analysis of deformation behavior in continuous ECAP process. Materials Science and Engineering: A. 2009;516(1-2):111-8.
4- Iwahashi Y, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. An investigation of microstructural evolution during equal-channel angular pressing. Acta materialia. 1997;45(11):4733-41.
5- Raab GJ, Valiev RZ, Lowe TC, Zhu YT. Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP–Conform. Materials Science and Engineering: A. 2004;382(1-2):30-4.
6- Prell M, Xu C, Langdon TG. The evolution of homogeneity on longitudinal sections during processing by ECAP. Materials Science and Engineering: A. 2008;480(1-2):449-55.
7- Etherington, C. (August 1, 1974). "Conform—A New Concept for the Continuous Extrusion Forming of Metals." ASME. J. Eng. Ind. August 1974; 96(3): 893–900.
8- Xu C, Schroeder S, Berbon PB, Langdon TG. Principles of ECAP–Conform as a continuous process for achieving grain refinement: Application to an aluminum alloy. Acta Materialia. 2010;58(4):1379-86.
9- Murashkin M, Medvedev A, Kazykhanov V, Krokhin A, Raab G, Enikeev N, Valiev RZ. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al 6101 alloy processed via ECAP-conform. Metals. 2015;5(4):2148-64.
10- Derakhshan JF, Parsa MH, Jafarian HR. Microstructure and mechanical properties variations of pure aluminum subjected to one pass of ECAP-Conform process. Materials Science and Engineering: A. 2019;747:120-9.
11- Shahab AR, Akbari Mousavi SA, Ranjbar Bahadori S, Ebrahimi SM. The comparison between continuous confined strip shearing (C2S2) and ECAP conform in regard to equivalent plastic strain distribution for Al 1100. InInternational Journal of Modern Physics: Conference Series 2012 (Vol. 5, pp. 400-409). World Scientific Publishing Company.
12- Gholami J, Sedighi M, Pourbashiri M. Effect of die channel angle and friction coefficient in ECAP-Conform process for Al-6061 alloy. InIran Int. Alum. Conf 2014.
13- Nosrati HG, Khalili K, Gerdooei M. Theoretical and numerical investigation of required torque in ECAP-Conform process. Metallurgical and Materials Transactions B. 2020;51(2):519-28.
14- Nosrati HG, Khalili K, Gerdooei M. Theoretical and experimental evaluation of no-slip feeding condition in ECAP-Conform of a square-section metallic rod. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021;112(1):375-85.
15- Freddi A, Salmon M. Design of experiment. InDesign Principles and Methodologies 2019 (pp. 127-158). Springer, Cham.
16- Hosford WF, Caddell RM. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge university press; 2011.
17- Samavati V. Polysaccharide extraction from Abelmoschus esculentus: Optimization by response surface methodology. Carbohydrate polymers. 2013; 95(1):588-97.