



مطالعه توزیع تنش پسماند در فرایند سوراخ کاری اصطکاکی در ورق‌های آلومینیوم ۷۰۷۵ با به کارگیری مدل سازی المان محدود

علیرضا باقری بمی^۱، محمد هنرپیشه^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: honarpishe@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۹ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

سوراخ کاری اصطکاکی

تنش پسماند

طراحی آزمایش

المان محدود

نیرو

اهمیت سوراخ کاری ورق‌ها در صنعت از دیرباز مورد توجه بوده است. این فرایند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و به عنوان روشی موثر برای ایجاد اتصالات در قطعات، به‌ویژه ورق‌ها، شناخته می‌شود. فرایند سوراخ کاری اصطکاکی، علاوه بر کاهش دورریز ماده در قطعات، با ایجاد فلنج‌های متصل کننده، توانایی ایجاد اتصالات قوی را فراهم می‌کند. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس، فرایند سوراخ کاری اصطکاکی بر روی ورق‌هایی با سه ضخامت، سه سرعت دورانی و سه نرخ پیشروی، شبیه‌سازی و طراحی شد. سپس، نتایج نیروی به دست آمده از طریق تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری دیزاین اکسپرت مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این تحقیق، جهت بررسی فرایند، از آزمایشی به روش سطح پاسخ و تحلیل داده‌ها استفاده شد. در این مطالعه، مواد مورد استفاده از آلومینیوم ۷۰۷۵ بود که به عنوان یکی از مواد مهم در صنایع خودروسازی، تولیدی، نظامی و هوافضا شناخته شده است. در ادامه، نتایج نشان داد که با تنظیم نیروی ماشین کاری بهینه، می‌توان به شرایط بهتری در فرایند دست یافت. همچنین، شرایط بهینه برای انتخاب پارامترها به گونه‌ای تعیین شد که بیشترین سرعت دورانی، کمترین نرخ پیشروی و کمترین ضخامت قطعه را در بر داشته باشد. در این فرایند، دمای بالاتر به دلیل بهبود جریان یافتن ماده مناسب است و همچنین با افزایش ضخامت، حرارت افزایش می‌یابد. مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عیوب قطعات در صنعت، تنش‌های پسماند هستند. تاکنون بررسی تنش پسماند به صورت شبیه‌سازی المان محدود روی این فرایند انجام نشده است؛ بنابراین در این تحقیق، تنش پسماند در جهات مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

An investigation of residual stress distribution in friction drilling of AA 7075 sheets by finite element modeling

Alireza Bagheri-Bami¹, Mohammad Honarpisheh^{2*}

1- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

* Corresponding Author's Email: honarpishe@kashanu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 19 January 2024

Accepted: 4 May 2024

Keywords:

Friction Drilling

Residual Stress

Design Of Experiment (DOE)

Finite Element Method (FEM)

Force

Abstract

The significance of sheet metal drilling within industrial applications is widely recognized, particularly for its critical role in creating durable connections in sheet components. This process, especially when implemented through friction drilling, not only minimizes material waste by generating connecting flanges bush shape but also enhances the robustness of the connections. In this study, we used the ABAQUS finite element software (FEM) to simulate and design the friction drilling process on sheets of three different thicknesses, employing three rotational speeds and three feed rates. The analysis was conducted using Design Expert statistical software, which integrated response surface methodology (RSM) and data analysis to thoroughly investigate the process forces. Aluminum AA 7075 was selected for the study due to its extensive use in the automotive, manufacturing, military, and aerospace organizations, highlighting its industrial relevance. The findings suggest that optimizing the machining force leads to more favorable conditions within the process. The optimal parameters were determined to include the highest rotational speed, the lowest feed rate, and the smallest sheet thickness. These conditions promote higher temperatures that facilitate better material flow. An increase in thickness was also found to correlate with higher temperatures. Additionally, the study addressed the significant industrial challenge of residual stresses and their effects on component defects, a topic not previously explored through finite element simulations in this context. This research contributes new insights into the implications of residual stresses in various directions for friction drilling processes.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Bagheri-Bami A, Honarpisheh M. An investigation of residual stress distribution in friction drilling of AA 7075 sheets by finite element modeling. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Apr 20;11(2):20-36. doi: 10.22034/IJME.2024.436544.1920 [In Persian]

۱- مقدمه

روش‌های سنتی سوراخ کاری با کمک مته که ابزاری چند لبه است، بسیار متداول است. با این حال، برای سوراخ کاری ورق‌ها و اینکله چگونه ورق‌ها به هم متصل شوند راه‌حل‌های زیادی وجود ندارد. سوراخ کاری اصطکاکی^۱ با ایجاد یک پلیسه یا به اصطلاح بوش^۲ که مخروطی نما است، یک راه مناسب برای اتصال ورق‌های فلزی ایجاد می‌کند [۱]. علاوه بر این، این روش از دورریز ماده نیز جلوگیری کرده و روشی اقتصادی است. بهبود خواص این بوش‌ها، افزایش کیفیت و حالت بهینه برای مواد و قطعات مختلف و نیز به دست آوردن بهترین پارامترها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است [۱]. در این تحقیق سعی شده است تا با کمک طراحی آزمایش‌ها^۳ و نیز شبیه‌سازی المان محدود^۴ حالت بهینه‌ای را برای فرایند به دست آورد [۲، ۳]. در فرایندهای ماشین کاری، عامل اصلی که باعث کاهش نیرو می‌شود اصطکاک است، تماس بین ابزار و قطعه در حین ماشین کاری این اثر را افزایش خواهد داد. با کاهش تماس این نیرو را به‌طور کلی در فرایند کاهش می‌یابد. اصولاً، بعد از این فرایند داخل بوش به وجود آمده را رزوه ایجاد می‌کنند تا بتوان از آن برای اتصال قطعات استفاده کرد [۴]. بنابراین، به هر میزان دقت سوراخ و پرداخت سطح داخل سوراخ بهتر باشد، آنگاه رزوه ایجاد شده دقیق‌تر و با کیفیت‌تر ایجاد خواهد شد. با توجه به اینکه بررسی تنش پسماند در قطعات بسیار مهم و نحوه توزیع تنش کششی و فشاری آن در قطعات حائز اهمیت است [۵، ۶]. علاوه بر این، فرایند سوراخ کاری اصطکاکی اخیراً در صنایع مهمی مثل خودروسازی مورد استقبال قرار گرفته است و در ساخت بدنه خودروها به جای اینکه مهره‌ای را جوش دهند؛ از این فرایند به‌عنوان روش مناسب برای اتصال ورق‌ها بهره برده می‌شود [۷]. در ضمن نحوه توزیع تنش برای فرایندهای بعدی مانند رزوه کاری بسیار مهم خواهد بود.

در تحقیق بوستیلو و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۸ روی فولاد با کمک بهینه‌سازی با روش شبکه عصبی را برای این فرایند سوراخ کاری اصطکاکی تحقیقی انجام دادند. آن‌ها میزان نیرو و گشتاور در قطعات را مشخص کردند و نیز قطر داخلی، خارجی و طول ابعادی بوش اندازه گرفتند و سپس، میزان سختی در قطعات را بررسی کردند. نتایج آن‌ها تأثیر سرعت دورانی و پیشروی را روی ابعاد قطر سوراخ ایجاد شده را نشان داد و در نتیجه، با افزایش سرعت دورانی و کاهش نرخ پیشروی میزان قطر و ابعاد سوراخ افزایش داشته است.

طراحی آزمایش در بهینه‌سازی این فرایند نیز امری ملزم و برای انتخاب کردن پارامترهای مؤثر نیاز است. در مطالعاتی، البهلول و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از روش بهینه‌سازی هدفمند الگوریتم‌های ژنتیک^۵ و فازی^۶ استفاده کردند. آن‌ها همچنین به کمک بهینه‌سازی‌های کلاسیک نیز تحقیقاتی انجام داده‌اند [۲]. در تحقیقی که روی قطعاتی از جنس‌های آلومینیوم، مس و فولاد ضدزنگ انجام شد، آن‌ها نشان دادند که یک پنل ساندویچی بعد از سوراخ کاری اصطکاکی سنتی چه میزان تأثیر روی لایه‌شدگی قطعات داشت. همچنین، آن‌ها اثر نیرو و کاهش نیرو را با جنس ماده مشخص نمودند. آن‌ها با کمک روش الگوریتم فازی و تاگوچی^۷ بهینه‌سازی روی عوامل سرعت دورانی و نرخ پیشروی نیز انجام دادند. در تحقیقشان، آن‌ها قطعاتی از جنس آلومینیوم را با نیروی کمتر به دلیل انتقال حرارت بهتر مناسب دانستند. در ادامه، آن‌ها در مطالعاتی دیگری بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک با تلفیق روش تاگوچی^۷ را روی فولاد ضدزنگ انجام دادند. آن‌ها پارامترهای سرعت دورانی، نرخ پیشروی، زاویه ابزار و قطر ابزار را روی نیرو ماشین کاری و طول بوش را به منظور بهینه‌سازی بررسی کردند. در نتیجه نشان دادند که در سرعت ۳۵۰۰ دور بر دقیقه و زاویه رأس ۳۰ درجه، قطر ۹/۲ میلی‌متر و نرخ پیشروی ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه بهترین حالت برای انجام این فرایند است. علاوه بر این، این فرایند را با کمک نرم‌افزار المان محدود نیز راستی آزمایی کرده و نتایج نیرو نیز این مورد را به خوبی به نتایج تجربی نزدیک بوده است. آن‌ها در پژوهشی دیگری بهینه‌سازی را با کمک روش فازی-ژنتیک انجام داده و در انتهای این تحقیق، ضخامت قطعه را با سرعت‌های جدیدی علاوه بر پارامترهای قبل بررسی کردند و حالت بهینه برای این فرایند را نشان دادند. حالت بهینه ضخامت ۱ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ۳۵۰۰ دور بر دقیقه و نیز قطر ابزار ۴/۵ میلی‌متر و نیز زاویه رأس ۴۵ درجه را با توجه به این آزمایش‌ها پیشنهاد دادند.

¹ Friction Drilling (Flow or Thermal Drilling)

² Bush

³ Design of Experiment (DOE)

⁴ Finite Element Method (FEM)

⁵ Genetic Algorithm

⁶ Fuzzy Algorithm

⁷ Taguchi

سوماسومدارم و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۲ به هدف بهینه‌سازی فرایند اطلاعات نتایج را با کمک آنالیز واریانس^۱ روی اثرات گردی و دایروی بودن سوراخ بررسی کردند. همچنین، میزان کیفیت سطوح ماشین‌کاری را با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ بررسی کرد. آن‌ها همچنین، میکرو براده‌های موجود در لبه قطعات ایجاد شده در اثر فرایند را نشان داد. نتایج نشان می‌دهد که در اثر کاهش نرخ پیشروی این براده‌ها کاهش می‌یابد. در این تحقیق نشان دادند که با افزایش ضخامت قطعات، افزایش نرخ پیشروی و سرعت دورانی میزان دایروی بودن سوراخ کاهش پیدا می‌کند. در ادامه، آن‌ها تعیین کردند که سرعت دورانی و نرخ پیشروی کمتر روی خروجی گردی سوراخ را جهت بهبود فرایند، مناسب دانسته‌اند [۱۰].

در تحقیقات مربوطه ریزساختار، الیسف و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۱۷ کارهایی صورت دادند و مشخص نمودند که روش سوراخ کاری اصطکاکی از جهاتی مشابهت‌هایی با روش جوشکاری اصطکاکی دارد. به این صورت که ریزساختار در اطراف نواحی سوراخ نیز مانند جوشکاری از ناحیه‌های ترمومکانیکی^۳، منطقه تحت تأثیر از حرارت^۴ و فلز پایه تشکیل می‌شود و هرکدام سختی مشخص خود را نشان می‌دهند. در این بین ریزساختار در ناحیه نزدیک سوراخ کاهش داشته و سختی در اثر حرارت و کار مکانیکی افزایش می‌یابد. تصاویر میکروسکوپی این تفکیک ریز ساختار در نواحی مختلف متأثر از دما برای ریزساختاری را نشان می‌دهد. آن‌ها ذکر کردند که نزدیک‌ترین روش تولید به این فرایند، روش‌های جوش کاری اصطکاکی و اصطکاکی اغتشاشی‌اند که از نظر سختی سنجی، نیرو و ریزساختار تشابه زیادی به فرایند سوراخ کاری اصطکاکی را دارند.

لی و همکارانش [۱۲] سختی و ریزساختار و زبری سطح داخل بوش را بررسی کردند. نتایج نشان داد سختی قطعه از سمت سوراخ به داخل فلز پایه کاهش می‌یابد و همچنین، سختی در اثر افزایش سرعت دورانی نیز افزایش داشته است. بنابراین، این افزایش سختی ناشی از بهبود شرایط حرارتی و کار حرارتی و مکانیکی ایجاد شده روی قطعه است. سرعت بالاتر زبری سطح بهتری را برای قطعه‌ها فراهم کرده است. با افزایش سرعت دورانی، زبری و سختی کاهش می‌یابد. تصاویر سطحی هم برای داخل بوش مشخص کرد. همچنین، آن‌ها نشان دادند که زبری سطح با افزایش نرخ پیشروی افزایش و با افزایش سرعت دورانی به دلیل افزایش دما و بهبود شرایط بهتر خواهد شد. علاوه بر این، آن‌ها در تحقیق [۱۳] دیگری نیز تأثیر سرعت دورانی روی حرارت و افزایش سرعت با افزایش حرارت را نشان داده و این اثر از بهبود شرایط نیرویی مشخص کرده و با افزایش حرارت، جریان و سیلان یافتن ماده، نیرو کمتر شده و این منجر به شرایط ماشین‌کاری مطلوب‌تر می‌شود. آن‌ها تأثیر جنس ابزار را روی نیرو، دما و گشتاور مشخص کردند. در انتها، نشان دادند که با افزایش سرعت دورانی، میزان نیروی فرایند کاهش داشته است.

برای اینکه بتوان هزینه‌های تولید را کم کرد، می‌توان از روش شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزارهای المان محدود استفاده کرد. لذا، از بهترین نرم‌افزارهای المان محدود تحلیل تنش می‌توان به آباکوس^۵ اشاره کرد؛ در تحقیقاتی دهقانی و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۱۷ با استفاده از این نرم‌افزار و تحلیل با روش دما-جابجایی میزان نیرو را برآورد کردند، دما را در هر مرحله از ورود ابزار به قطعه مشخص کردند، میزان تنش و کرنش مؤثر را نشان داد. از ماده فولاد استفاده کردند و نیز حالت مش اولیری-لاگرانژی بهره برده شد. نتایج به روش تجربی و آزمایشگاهی با کمک شبیه‌سازی انطباق خوبی داشته و نیرو و دمایی که اندازه‌گیری شده، تطابق خوبی را داشته است.

البهلول و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۷ نیز از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی استفاده کردند. مقدار دما و نیرو را مشاهده و با روش تجربی روی فولاد مقایسه کردند. میزان نیروها با نیروهای تجربی مشابهت زیادی داشته و روند نیرو را به خوبی طی کرده است. نتایج تفاوت ناچیزی بین زمان نیرو در تحقیق وجود دارد که میلر و همکارانش در سال ۲۰۰۷ دلیل این امر را در پژوهش خود گزارش داده‌اند، آن‌ها با نرم‌افزار آباکوس میزان نیرو و گشتاور و نیز حرارت را با روش تجربی انجام‌شده مقایسه کردند. همچنین با استفاده از ترموکوپل میزان دما را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها دلیل اینکه در مطالعه نیروها با تأخیر زمانی به قلّه اولیه نیرو می‌رسد، را ضربه اولیه ابزار به قطعه دانسته‌اند. در این تحقیق تمامی مراحل نیرو را با تفکیک مراحل ورود ابزار به قطعه بررسی و همچنین دماها را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. میزان تنش و دما و کرنش مؤثر در هر مرحله را نشان داده‌اند. همچنین، آن‌ها نشان دادند که با افزایش ورود ابزار، دما

¹ Analyses of Variance (ANOVA)

² Scan Electron Microscopy (SEM)

³ Thermo-Mechanical Affect Zone (TMAZ)

⁴ Heat Affect Zone (HAZ)

⁵ ABAQUS

در حین فرایند افزایش داشته است. آن‌ها همچنین، قطعات ساخته‌شده با روش ریخته‌گری آلومینیوم میزان گشتاور، نیرو و دما را بحالت روش تجربی مقایسه، روند و انطباق این مسئله را به‌خوبی نشان دادند.

کراسکاس و همکاران [۱۵] سال ۲۰۱۴ شبیه‌سازی فرایند سوراخ کاری اصطکاکی روی آلومینیوم را با نرم‌افزار آباکوس انجام دادند. نمودارهای نیرویی به‌صورت ناچیزی با تحقیقات ذکرشده قبلی تفاوت داشته، ولی باین‌حال، روند نیرویی توسط روش تجربی و شبیه‌سازی قابلیت پیش‌بینی نتایج را دارد. در هر حال، در این تحقیق دما، نیرو و نیز گشتاور مورد ارزیابی قرار گرفت و میزان آن با بررسی در شبیه‌سازی مطابقت داشته است. علاوه‌براین، کراسکاس و همکاران در تحقیقی دیگری میزان کاهش نیرو در هنگام سوراخ کاری را برای افزایش دما مقایسه و نشان دادند که افزایش دما باعث کاهش نیرو در این روش ماشین کاری خواهد شد. همچنین، آن‌ها طراحی آزمایشی برای بهینه‌سازی در این مورد روی فولاد و آلومینیوم انجام دادند و همچنین، مدل رگرسیون برای دما و نیرو را مشخص کرد. میزان پیشروی و ضخامت قطعه بیشترین تأثیر را روی نیرو و دما داشته، ولی میزان سرعت دورانی کمترین عامل مؤثر را نشان داده است [۱۶].

میلنر و همکارانش [۱۷] در سال ۲۰۱۶ به صورت تجربی تنش پسماند را برای قطعات بعد از فرایند سوراخ کاری اصطکاکی بررسی کردند. آن‌ها حین کشیدن قطعات با نیروی مشخصی، تنش پسماندرا اندازه‌گیری کردند. در این صورت، تنش ایجاد شده در اثر کشیدن به قطعات وارد خواهد شد و توزیع تنش در دو جهت را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان می‌دهد که تنش پسماند در نزدیک سوراخ به صورت کششی است و در ادامه تنش در داخل قطعه کمتر و فشاری است. همچنین تأثیر نیروی کشش روی تنش پسماند را نیز نشان داده‌اند که با افزایش نیرو تنش بیشتر شده است. در برخی راستاها در اثر اعمال نیروی کششی تنش پسماند فشاری شده است. آنها تنش پسماند را فقط در مقطع قطعه بررسی کردند و در فلنج به وجود آمده بررسی‌ای برای تنش پسماند انجام نشد.

دمیر [۱۸] در تحقیق دیگر در سال ۲۰۱۷ ابتدا پیش‌مته کاری برای سوراخ کاری را انجام دادند و تأثیر آن را روی سوراخ کاری اصطکاکی را مشخص کردند. پیش‌مته کاری جهت جلوگیری از خمش و تغییر شکل‌پذیری استفاده می‌شود و همچنین، برای ضخامت‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. آن‌ها در تحقیق خود، بیشترین دما در سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه ثبت کردند. آن‌ها همچنین، فرایند سوراخ کاری را برای آلومینیوم ۷۰۷۵ و سه نوع آلیاژ آلومینیوم دیگر روی فرایند سوراخ کاری اصطکاکی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش میزان دما و زبری سطح داخل سوراخ است و نیز باعث افزایش طول بوش در ماشین کاری شده است و همچنین افزایش سرعت دورانی بیشترین تأثیر را روی طول بوش دارد. در ادامه، آن‌ها نشان دادند که با افزایش سرعت دورانی طول بوش کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که نرخ پیشروی روی زبری بیشترین تأثیر را داشته است. در این صورت با افزایش سرعت دورانی دما افزایش یافته، ولی با افزایش نرخ پیشروی دما کاهش می‌یابد.

پریرا و همکارانش [۱۹] در سال ۲۰۱۹ در حالات مختلف، استفاده از سیال خنک‌کار برای فرایند سوراخ کاری اصطکاکی استفاده و میزان نیرو را به‌دست آوردند. علاوه‌براین، آن‌ها نشان دادند که در حالتی که سیال خنک‌کار استفاده شود، نیرو به‌شدت کاهش داشته است. همچنین، آن‌ها سختی در نواحی مختلف مقطع قطعات را بررسی و نشان دادند که سختی در مقطع بعد از سوراخ به سمت داخل قطعه کاهش داشته است. علاوه‌براین، سختی در مقطع از سوراخ و تغییرات آن را نیز اندازه‌گیری کردند و کاهش سختی را نسبت در فاصله نزدیکی از سوراخ نشان دادند.

هدف این تحقیق بررسی تنش پسماند در راستاهای اصلی برای فرایند سوراخ کاری اصطکاکی است. با توجه به مطالعات انجام شده بررسی تنش پسماند و توزیع تنش پسماند در اطراف سوراخ و فلنج ایجاد شده، برای فرایند سوراخ کاری اصطکاکی به صورت شبیه‌سازی انجام نشده است. لذا، در این تحقیق ابتدا طراحی آزمایشی به منظور یافتن بهترین پارامترها برای ایجاد سوراخ در قطعه بررسی شد تا کمترین نیرو برای تولید سوراخ نیاز باشد تا دمای مناسبی برای ساخت قطعه ایجاد کند. سپس، قطعه مورد نظر در حالت بهینه جهت بررسی تنش‌های پسماند در راستاهای مختلف اصلی بررسی شد.

۲- آماده‌سازی فرایند و روش‌ها

در فرایند سوراخ کاری اصطکاکی نیروی وارده از طریق اصطکاک و پارامترهای مهم آن، توسط جون کو و همکاران [۲۰] محاسبه‌شده و همچنین در تحقیق میلر و همکاران نیز این نیرو با استفاده از زاویه رأس مخروط هم تعیین شد [۲۱].

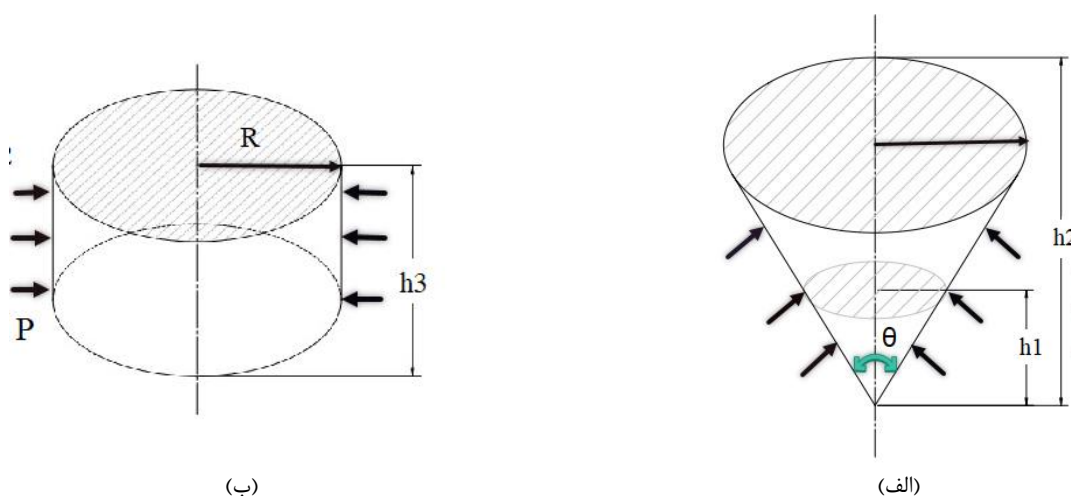
$$RF_{cylindrical} = 2\pi\mu PRh_3 \quad (1)$$

$$RF_{conical} = \pi P[h_2^2 - h_1^2] \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + \mu\pi P[h_2^2 - h_1^2] \quad (2)$$

$$RF_{cylindrical} = \frac{2\pi R h_3 V}{\sqrt{V^2 + \omega^2 R^2}} \tau \quad (3)$$

$$RF_{conical} = \pi \frac{\tau}{\mu} [h_2^2 - h_1^2] \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + 2\pi \frac{V\tau}{\omega} [h_2 - h_1] \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4)$$

در این روابط تنش وارد به ابزار توسط تنش برشی و طبق تخمین رابطه پلاستیسیته برای آلومینیوم $\tau = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$ مشخص می‌شود که σ تنش تسلیم ماده و τ تنش برشی تسلیم ورق است [۲۲]. طبق شکل ۱-الف نیرو طبق رابطه ۱ برای منطقه استوانه‌ای قابل محاسبه است و برای ناحیه مخروطی طبق رابطه ۲ و شکل ۱-ب محاسبه می‌شود که در این روابط P همان فشار وارده به سطح جانبی، μ ضریب اصطکاک بین ابزار و قطعه، R قطر بزرگ مخروط ابزار، h_3 ارتفاع استوانه h_1 و h_2 ارتفاع مخروطی ابزار در طول بلند و کوتاه به ترتیب هستند.



شکل ۱ الف) توزیع نیرو در قسمت مخروطی و ب) توزیع نیرو در قسمت استوانه‌ای

همچنین، V سرعت پیشروی ابزار، ω نیز سرعت زاویه‌ای و θ زاویه رأس مخروط است. طبق شکل ۱-ب، در رابطه ۳ در حالتی که استوانه‌ای باشد و طبق شکل ۱-الف، رابطه ۴ برای قسمت مخروطی ابزار میزان این نیرو را از تنش برشی می‌توان به‌دست آورد. در این راستا ضریب اصطکاک خشک یا کلمبی^۱ استفاده شد که با سعی و خطا^۲ و بنابر نتیجه تجربی تحقیق‌های گذشته در نتایج شبیه‌سازی بررسی شده مقدار آن ۰/۵ به‌دست آمد [۲۰]. بر طبق پیشینه تحقیق، در این حالت تمام انرژی تبدیل به حرارت خواهد شد [۸]. در این تحقیق زاویه رأس مخروط ۳۰ درجه طراحی شد. ارتفاع کوتاه ابزار ۱ میلی‌متر و ارتفاع بلند ۴ میلی‌متر و برای طول استوانه‌ای نیز مقدار ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. قطر ابزار نیز ۴ میلی‌متر تعیین شد. تنش‌نهایی ماده آلومینیوم ۷۰۷۵ مقدار ۵۶۰-۵۷۶ مگاپاسکال، تنش سیلان ۴۸۰-۵۰۰ مگاپاسکال، استحکام برشی ۳۳۰ مگاپاسکال و تنش تسلیم برشی ۱۸۰ مگاپاسکال است [۲۳].

شبیه‌سازی فرایند با کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شد. این نرم‌افزار با کمک ابزارهای خود شرایط یک فرایند را به‌طور کامل می‌تواند شبیه‌سازی کند. با توجه به اینکه هزینه و نیز زمان بااهمیت می‌باشند، بنابراین، استفاده از شبیه‌سازی و نتایج تجربی نزدیک به شبیه‌سازی با ارزش تلقی خواهد شد. فرایند سوراخ کاری با کمک این نرم‌افزار شبیه‌سازی شده در حالت بهینه آن مورد بررسی قرار گرفت. خواص ماده آلومینیوم ۷۰۷۵ استخراج شده از تحقیقات پیشین صورت گرفت [۲۳]. در شکل ۲ این شبیه‌سازی از مش و شبکه‌بندی مکعبی ۸ وجهی C3D8RT به تعداد ۴۹۹۲ برای ضخامت ۴ میلی‌متر و با تعداد ضریب تعداد ۰/۰۰۴ برای ضخامت ۲/۵ میلی‌متری تعداد ۰/۰۳۵ و ضخامت ۱ میلی‌متری تعداد ۰/۰۰۳ به قطعه اعمال شد. در نرم‌افزار روش حل صریح به کمک انتگرال

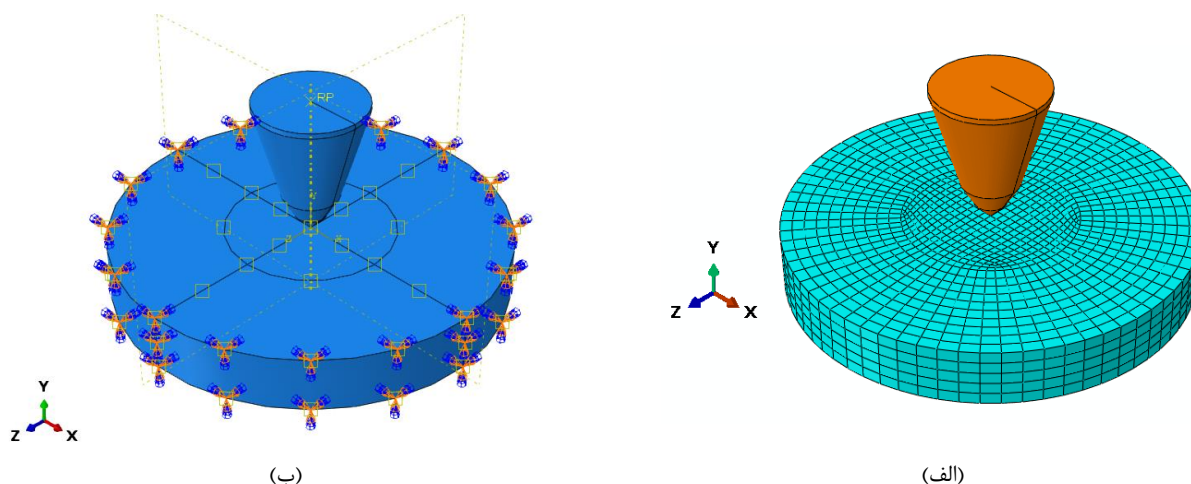
¹ Coulomb Friction

² Trial and Error

کاهش یافته^۱ به همراه روابط دما-جابجایی^۲ استفاده شد [۱۴]. همچنین، در قسمت خواص مواد از کسرهای غیر الاستیک حرارتی^۳ استفاده شد و در قسمت تداخل‌ها^۴ برای اینکه کارمکانیکی به حرارت تبدیل شود از تولید حرارت^۵ انتخاب و استفاده شد. برای اینکه قطعه دچار جدایش شود، باید از خواص آسیب^۶ مورد استفاده جانسون-کوک^۷ طبق رابطه^۶ و خواص دمایی مورد نظر ماده آلومینیوم استفاده شود. بنابراین، برای اینکه مش دچار تغییر شود، در حالت مش یا شبکه‌بندی حذف شونده و نیز حالت ALE مش سازگار لاگرانژ-اویلری که در اثر تغییر شکل‌های شدید، مش را بین حالت اولیه و ثانویه قرار دهد تا از کشش‌های ناخواسته و تغییر شکل‌های ناگهانی جلوگیری کند، استفاده شد [۳]. همچنین، ضریب انتقال حرارت^۸ جابجایی^۹ $(h) \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ ۱۳۰ استفاده شد. در طراحی ابزار و قطعه سعی بر ساده‌سازی شده است و همچنین، تلاش بر نزدیکی حالت به تحقیقات روش‌های تجربی در نظر گرفته شد. در شکل ۲ شماتیک شبکه‌بندی تعیین شده برای این حالت را نشان داده است. قطعه از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات حرارتی شده پیرسختی با مدول یانگ (E) ۷۱/۷ گیگاپاسکال و ضریب پواسون^{۱۰} ۰/۳ (ν) بوده و چگالی^{۱۱} (ρ) آن ۲۸۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. همچنین، دمای اولیه $T_m = 25^\circ\text{C}$ و دمای ذوب نیز $T_m = 520^\circ\text{C}$ ضریب انبساط حرارتی^{۱۱} $(\alpha) 32/6$ بر درجه سانتی‌گراد و ظرفیت گرمایی ویژه^{۱۲} $(C_p) 960 \text{ Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$ مشخص شده است؛ که رابطه^۵ جانسون-کوک برای تغییر شکل پلاستیک ماده است و رابطه^۶ برای خواص آسیب ماده جانسون-کوک است. مقادیر خواص پلاستیک جانسون-کوک طبق جدول ۱ و مقادیر خواص آسیب آن طبق جدول ۲ نشان می‌دهد [۲۳].

$$\bar{\sigma} = (A + B\varepsilon^n) \left[1 - C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_l}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T_0 - T_{room}}{T_m - T_{room}}\right)^m \right] \quad (5)$$

$$\varepsilon_f = \left[d_1 + d_2 \exp\left(d_3 \frac{p}{\bar{\sigma}}\right) \right] \left[1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_l}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \left[1 + d_5 \left(\frac{T_0 - T_{room}}{T_m - T_{room}}\right) \right] \quad (6)$$



شکل ۲ الف) قطعه شبکه‌بندی و ابزار طراحی شده در نرم‌افزار آباکوس ب) گیره‌بندی فقط به صورت اطراف قطعه در نرم‌افزار

باتوجه به استفاده از دماهای ذکر شده و روابط^۵ و^۶ در نرم‌افزار نرخ تغییرات حرارت برای حل مسئله اعمال می‌شود. همچنین، ابزار از قطعه خارج شده و یک گام خنک‌کاری برای اعمال تنش پسماند در قطعه در نظر گرفته شد.

1 Reduction Integration

2 Couple Temperature-Displacement

3 Inelastic Heat Fractions

4 Interaction

5 Heat Generation

6 Damage

7 Johnson-Cook

8 Thermal Conductivity or Conduction Heat Transfer Coefficient

9 Poisson's Ratio

10 Density

11 Expansion

12 Specific Heat Capacity

جدول ۱ خواص پلاستیک جانسون-کوک [۲۳]

پارامتر	ϵ_0	c	m	n	B	A
مقدار	1	0.024	1.56	0.71	678	546

جدول ۲ خواص آسیب جانسون-کوک [۲۳]

پارامتر	d_5	d_4	d_3	d_2	d_1
مقدار	0.697	0.036	-0.952	0.451	-0.068

برای تعیین بهترین عوامل و پارامترها، برای ساخت و انجام فرایند، طراحی آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۱ صورت گرفت. این طراحی آزمایش با استفاده از روش سطح پاسخ^۲ انجام شد. در جدول ۳ و ۴ به صورت استاندارد و برای کاهش تعداد آزمایش‌ها برای سه فاکتور سه سطحی از طرح مرکب مرکزی^۳ استفاده شد که ۱۵ آزمایش را شامل می‌شود. فاکتورها یا عوامل نرخ پیشروی (V)، سرعت دورانی (ω) و ضخامت قطعه (t) و علاوه بر این، خروجی نتایج به منظور بهینه‌سازی، میانگین نیروی عکس‌العمل در طول فرایند وارد به ابزار در نظر گرفته شد و در انتها، این نتایج در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳ پارامترهای طراحی آزمایش روش سطح پاسخ

کد سطوح	سرعت دورانی: ω (rev/min)	نرخ پیشروی V: (mm/min)	ضخامت: t (mm)
-1	600	20	1.0
0	1200	40	2.5
1	1800	60	4.0

جدول ۴ عوامل طراحی آزمایش به صورت کدبندی شده و میانگین نیروی عکس‌العمل وارد به ابزار

شماره آزمایش	ω ; (rev/min)	V; (mm/min)	t; (mm)	RF (N)
1	-1	-1	-1	876.5
2	1	-1	-1	874.6
3	-1	1	-1	953.2
4	1	1	-1	977.1
5	-1	-1	1	1001.8
6	1	-1	1	988.7
7	-1	1	1	1211.4
8	1	1	1	1205.3
9	-1	0	0	985.4
10	1	0	0	980.2
11	0	-1	0	899.6
12	0	1	0	1078.1
13	0	0	-1	935.1
14	0	0	1	1129.8
15	0	0	0	983.1

۳- نتایج و بحث

در فرایندهای ماشین کاری و فرایندهای تغییر شکل، کاهش نیروها از اهمیت بالایی برخوردار است. به دلیل افزایش عمر ابزار و کاهش استهلاک دستگاه این نیروها مورد بررسی خواهند بود. جهت به‌دست آوردن کمترین نیرو از میانگین نیرو در یک دوره یا سیکل ورود ابزار به قطعه در زمان سوراخ کاری اندازه‌گیری انجام شد. با تحلیل آماری و آنالیز واریانس روی این مقادیر می‌توان، سطح پاسخ کمینه را معین نمود. در جدول ۵ با توجه به مقادیر ارزشی P و F تعیین می‌کنند که کدام عوامل در فرایند موثراند. مقدار P مشخص شده زیر

¹ Design of Expert Software

² Response Surface Method (RSM)

³ Composed Center Design (CCD)

۰/۰۵ یعنی عامل تأثیرگذار در فرایند است [۲۴]. در مدل رگرسیون (همبستگی) اصلاح شده و در معادله ۷ آورده شد. سایر عوامل غیر مؤثر از مدل حذف خواهند شد.

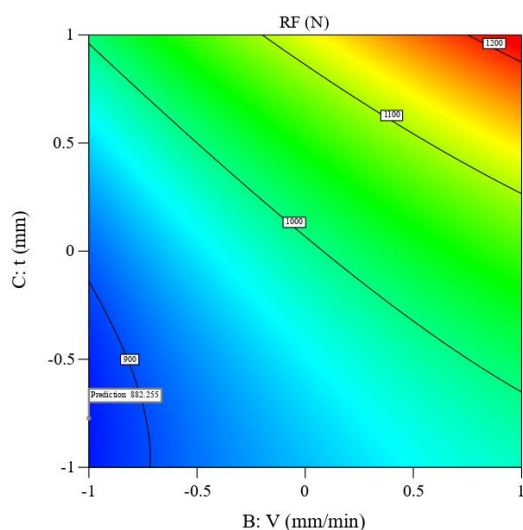
$$RF(N) = 1005.3 - 78.4 \times V + 90.2 \times t - 30.8 \times (V \times t) + 29.0 \times t^2 \quad (۷)$$

بالین حال، سرعت دورانی عامل بسیار مهمی برای ایجاد دما و گرما در فرایند است، همانطور که در تحقیقات گذشته به آن اشاره شده است [۲۵]. در این تحلیل آنالیز واریانس، عامل R^2 درستی و درصد قطعیت مدل را نشان می‌دهد. بنابراین، هرچقدر این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، خطا کمتر خواهد بود. با حذف عوامل غیر مؤثر این مقدار افزایش خواهد یافت در این صورت مدل اصلاح شده ارائه خواهد شد [۲۴].

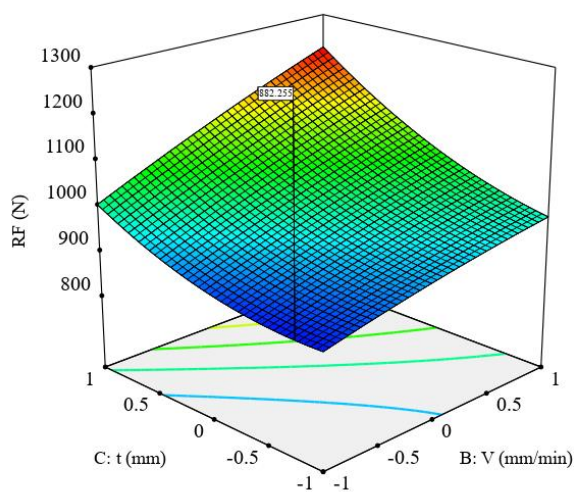
جدول ۵ آنالیز واریانس و مقادیر ارزشی P و F

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار ارزشی F	مقدار ارزشی P
مدل	1.5760E+05	9	17511.4300	154.6400	< 0.0001
A: ω	0.7306	1	0.7306	0.0065	0.9391
B: V	61466.0700	1	61466.0700	542.7900	< 0.0001
C: t	84753.5700	1	84753.5700	748.4300	< 0.0001
$\omega \times V$	133.7500	1	133.7500	1.1800	0.3267
$\omega \times t$	212.7900	1	212.7900	1.8800	0.2288
$t \times V$	7623.8400	1	7623.8400	67.3200	0.0004
ω^2	299.2600	1	299.2600	2.6400	0.1650
V^2	137.7800	1	137.7800	1.2200	0.3202
t^2	3384.0600	1	3384.0600	29.8800	0.0028
باقیمانده	566.2100	5	113.2400	-	-
کل	1.5820E+05	14	-	-	-
R^2 -adj	0.9900	R^2	0.9964	R^2 -predict	0.9693

شکل ۳ نمودارهای دوعبده و سه‌بعدی پاسخ سطح برای عامل تداخلی که پیشروی در ضخامت مؤثر واقع شده را نشان می‌دهد. در این نمودار با توجه به اینکه نیرو باید کمینه شود، اگر نرخ پیشروی روی حالت ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و ضخامت روی کمترین حالت ۱ میلی‌متر، نیرو کاهش خواهد یافت. با انجام این آزمایش‌ها آنچه در شکل ۴ مشخص شده، با افزایش ضخامت نیرو افزایش یافته است. نیروی حاصل از تغییرات پیشروی در شکل ۵ بررسی شده که با افزایش نرخ پیشروی نیز نیرو افزایش داشته است. سایر عوامل از مدل اصلاح شده به دلیل مؤثر نبودن در بررسی نیرو حذف شده‌اند. شکل ۶ تأثیر سرعت دورانی روی نیروی عکس‌العمل وارد به ابزار را نشان داده است.

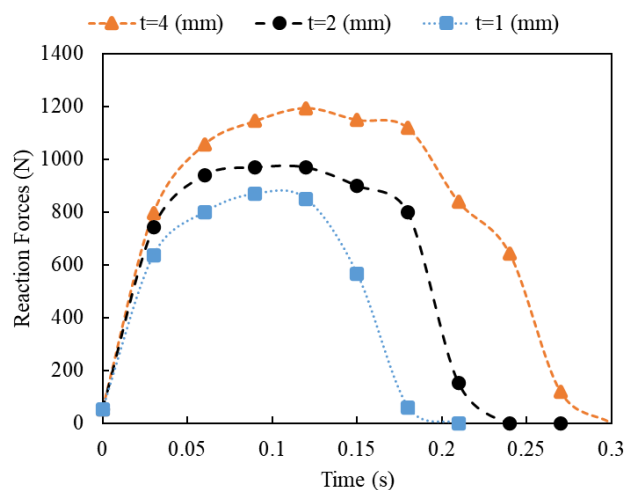


(ب)

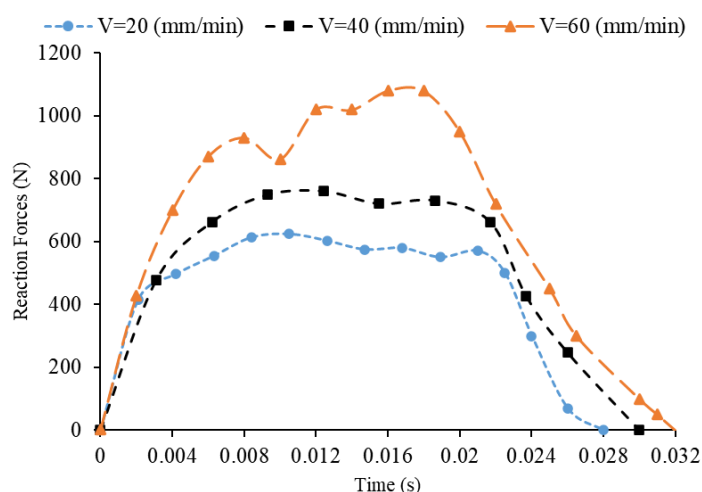


(الف)

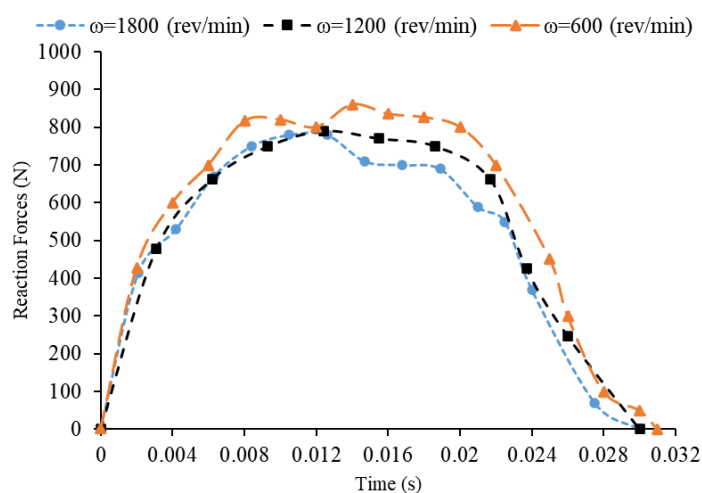
شکل ۳ تأثیر ضخامت و نرخ پیشروی روی نیروی عکس‌العمل، الف) نمودار سه‌بعدی و ب) کانتر دو‌بعدی



شکل ۴ تأثیر ضخامت قطعه روی نیروی عکس العمل وارد به ابزار در طول زمان فرایند در نرخ پیشروی ۲۰ میلی متر بر دور و سرعت دورانی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه

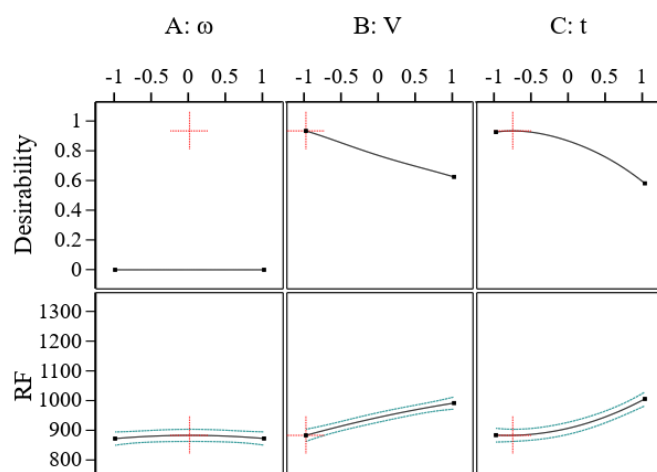


شکل ۵ تأثیر نرخ پیشروی روی نیروی عکس العمل وارد به ابزار در طول زمان فرایند با سرعت دورانی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و ضخامت ۴ میلی متر



شکل ۶ تأثیر سرعت دورانی روی نیروی عکس العمل وارد به ابزار در طول زمان فرایند با نرخ پیشروی ۲۰ میلی متر بر دقیقه و ضخامت ۴ میلی متر

با توجه به اینکه عامل سرعت دورانی در این آزمایش روی نیروی عکس العمل به ابزار بی اثر است. در شکل ۷ مشخص شد که حالت بهینه باید روی سرعت دورانی یعنی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه باشد تا نیرو کمینه شود. رابطه مدل رگرسیون ۷ از اهمیت بالای ضخامت قطعه در نیروی فرایند دارد. این مورد در روابط ۱ و ۲ نیز مورد تأیید قرار گرفته است. اهمیت هر پارامتر با میزان مقدار ارزشی F مشخص می شود، با توجه به جدول ۵، مقدار ارزشی F برای ضخامت قطعه ۵۵۹/۱ ذکر شده و برای پیشروی مقدار ۴۰۵/۵ است که نشان از بالاتر بودن اثر ضخامت قطعه روی نیروی ماشین کاری در این فرایند است [۲۶].

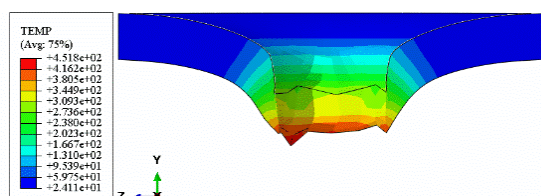


شکل ۷ حالت بهینه برای پارامترهای اصلی در فرایند جهت به دست آوردن نیروی کمینه

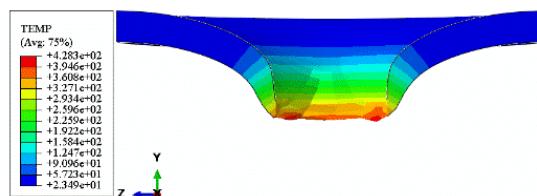
نتایج مشخص شده در شکل ۸ نشان از افزایش دما با افزایش ضخامت قطعه دارد. هرچقدر ضخامت قطعه بیشتر باشد مقدار حجم ماده افزایش داشته و این باعث افزایش دما در طی زمان فرایند موثر خواهد شد. به طوریکه با افزایش دما جریان یافتن ماده بیشتر خواهد شد و نیز روی ابزار نیز اثر خواهد گذاشت، آنچنان که اصطکاک تغییر خواهد کرد و چسبندگی بین قطعه با ابزار تغییر می کند [۲۷]. با افزایش ضخامت قطعه مقدار طولی از قطعه که با ابزار در تماس است نیز افزایش داشته و اصطکاک بین قطعه و ابزار بیشتر شده و این از دلایل اصلی افزایش دما است [۲۵]. شکل ۸ قسمت الف قطعه با ضخامت ۱ میلی متر و شکل ۸ قسمت ب قطعه با ضخامت ۲/۵ میلی متر را نشان داده است. همانطور در شکل ۸ قسمت ج دیده می شود، میزان توزیع دما در قطعه با ضخامت بالاتر بیشتر نسبت به شکل ۸ قسمت الف مشخص شده است. بنابراین، این توزیع دمایی روی تنش پسماند تأثیر زیادی خواهد داشت. با بررسی آزمایشها مشخص شده که ضخامت تأثیر بسیار کمی روی تنش و کرنش ایجاد شده در قطعات دارد. با بررسی حداکثر تنش به وجود آمده که پیشروی و سرعت دورانی تأثیر بیشتری روی تنش و کرنش دارد. در شکل های ۱۰ و ۱۱ با مقایسه نرخ پیشروی روی قطعاتی با ضخامت ۲/۵ میلی متری و نرخ پیشروی یکسان ۴۰ میلی متر بر دور با سرعت ۶۰۰ و ۱۸۰۰ دور بر دقیقه نشان داد.

در این تحقیق، برای اعتبار سنجی نتایج از مقاله ای که پیشتر توسط نویسندگان پژوهش حاضر انجام شده بود، بهره برده شد. در تحقیق قبل تر، نیرو به صورت روش تجربی و شبیه سازی بررسی شده بود. همچنین، مشابه این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ استفاده شده بود که در حالت سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و ضخامت ورق ۲ میلی متر و نیز نرخ پیشروی ۰/۱۶ میلی متر بر دور بود که نیروی تجربی مقدار ۹۵۰ نیوتن و نیروی شبیه سازی مقدار ۱۰۹۰/۷ نیوتن شد و درصد خطای ۱۴/۸۲ درصدی را تعیین کرد و سایر نیروها نیز اعتبار سنجی شده است [۲۶]. لذا، در این تحقیق از پارامترهای دیگری استفاده شد تا بررسی تنش پسماند انجام شود. همچنین، مقادیر دمایی این تحقیق با پارامترهای تحقیق دمیر و اوزک مقایسه شد و نتایج دمایی با این ضخامت ها، سرعت های دورانی و نیز نرخ پیشروی تناسب و هم پوشانی مناسبی داشته است [۱۸، ۲۸]. آن ها در اطراف سوراخ یک ترموکوپل قرار داده و دمای حین فرایند را ثبت کردند که برای حالت سرعت ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ میلی متر بر دور، ضخامت ۴ میلی متری و نرخ پیشروی ۲۰ میلی متر بر دقیقه، مقدار دمای در محدوده ۲۲۰ تا ۲۵۰ درجه را اندازه گیری کردند که در این تحقیق دما در محدوده ۲۰۰ تا ۲۷۰ درجه مشخص شد (طبق شکل ۸).

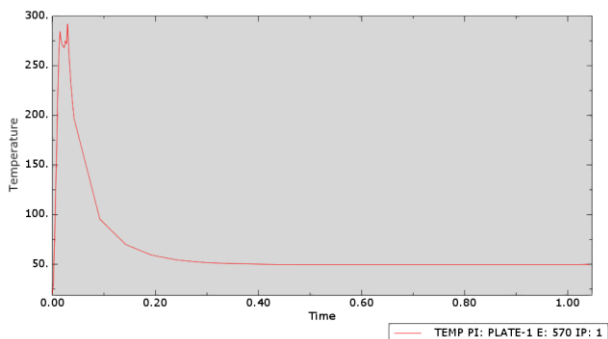
در شکل ۸ حداکثر دما در ضخامت ۱ دمای ۴۲۸ درجه سانتی‌گراد را نشان داده و در ضخامت ۲/۵ میلی‌متری دمای ۴۵۱ درجه را نشان داده است. همچنین، در ضخامت ۴ میلی‌متری نیز میزان دمای ۴۵۶ درجه را نشان داده که با افزایش ضخامت، گرما و دمای ایجاد شده افزایش می‌یابد. افزایش دما در بررسی اوزک و دمیر هم با افزایش ضخامت قطعاً ارائه شده است. به‌طوری‌که با افزایش سرعت دورانی دما نیز افزایش داشته است. نتایج دمایی ارائه شده با تطابق مناسبی با کار دمیر و همکاران اعتبار سنجی شده و مشابهت دمایی مناسبی با تحقیق آن‌ها داشته است. در پژوهش دمیر و همکاران تأثیر افزایش دما در قطعات آلومینیوم پیرسختی شده ۷۰۷۵ با افزایش نرخ پیشروی و نیز افزایش ضخامت دیده می‌شود [۱۹، ۲۰].



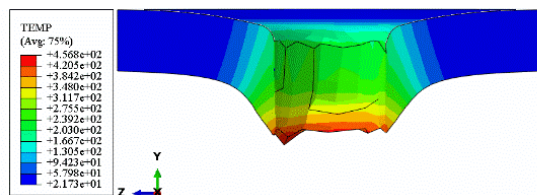
(ب)



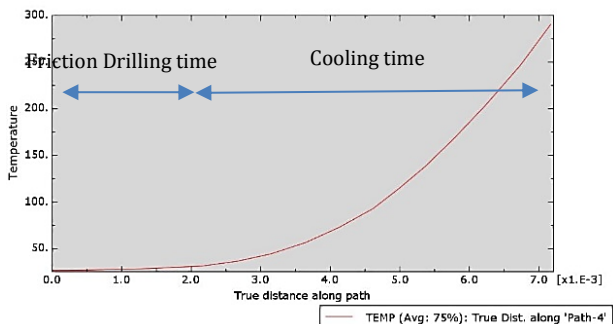
(الف)



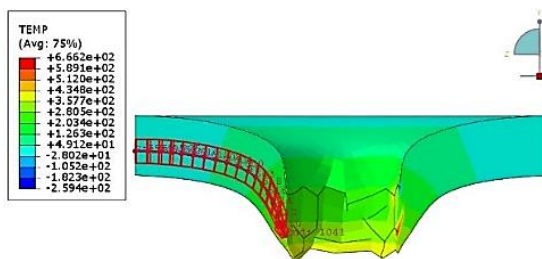
(د)



(ج)



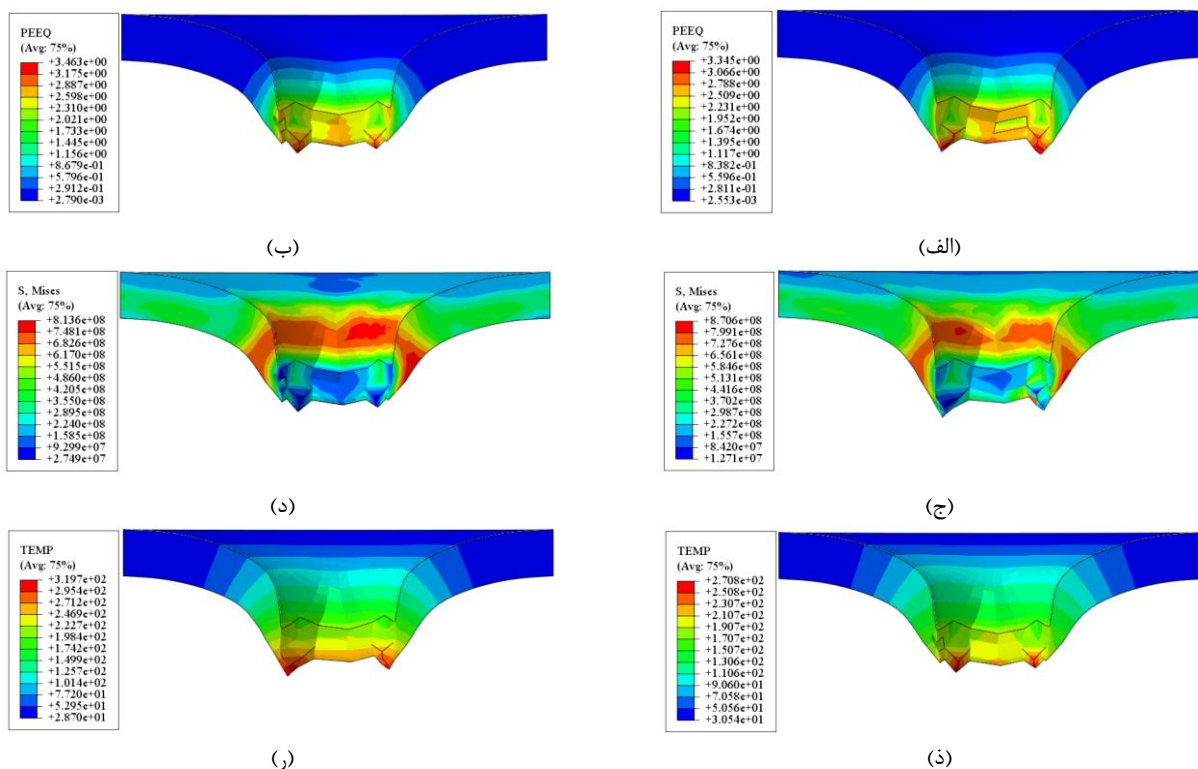
(ر)



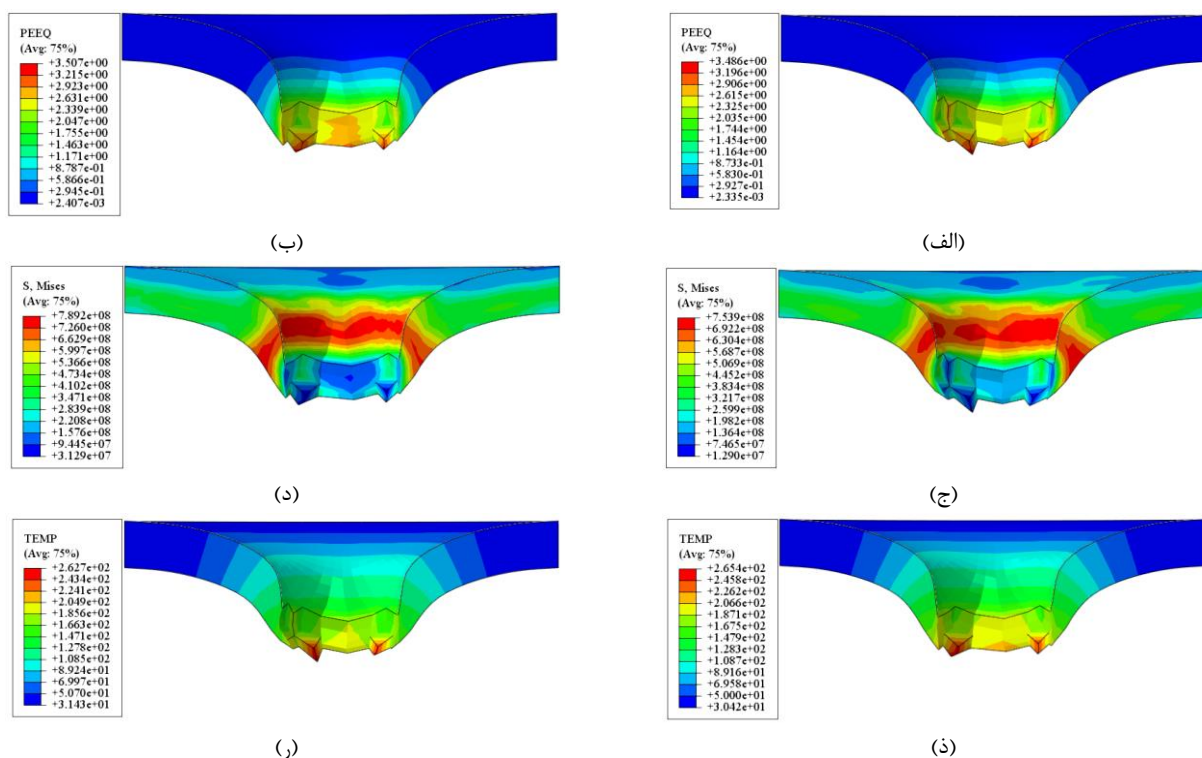
(ز)

شکل ۸ تأثیر ضخامت روی توزیع و حداکثر دمای ایجاد شده توسط فرایند، الف) ضخامت ۱ میلی‌متر، ب) ضخامت ۲/۵ میلی‌متر، ج) ضخامت ۴ میلی‌متر، د) بررسی اعتبار سنجی دمایی قطعه با ضخامت ۴ میلی‌متر، سرعت دورانی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه، ذ) مسیر مشخص شده برای اندازه‌گیری دما و ر) دمای اندازه‌گیری شده در قطعه از بیرون قطعه به داخل سوراخ

با افزایش سرعت دورانی تنش و کرنش افزایش داشته است. برای حالت تأثیر پیشروی نیز از قطعات با ضخامت ۲/۵ میلی‌متری و سرعت دورانی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه مقایسه شد. نرخ پیشروی ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه بررسی شد که افزایش نرخ پیشروی نیز باعث افزایش تنش و کرنش شده است. در اثر سرعت دورانی و نرخ پیشروی روی تنش فون میسز نیز شکل‌های ۹ و ۱۰ تفاوت را نشان داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی تنش افزایش داشته، ولی در نرخ پیشروی تأثیر چندانی را نشان نداده است. تنش در ناحیه ترمومکانیکی بیشترین مقدار خود را نشان داده است [۳۰]. کرنش در سوراخ که محل تغییر شکل پلاستیک افزایش داشته است [۳۱].



شکل ۹ تأثیر نرخ پیشروی روی کرنش پلاستیک مؤثر، الف) پیشروی ۴۰ و ب) پیشروی ۶۰ میلی متر بر دقیقه و تأثیر نرخ پیشروی روی تنش فون میسر، ج) پیشروی ۴۰ و د) پیشروی ۶۰ میلی متر بر دقیقه و همچنین، توزیع دمای برای شرایط، ذ) پیشروی ۶۰ و ر) پیشروی ۴۰ میلی متر بر دقیقه سرعت ثابت ۱۲۰۰ میلی متر بر دور در ضخامت ثابت ۲/۵ میلی متری



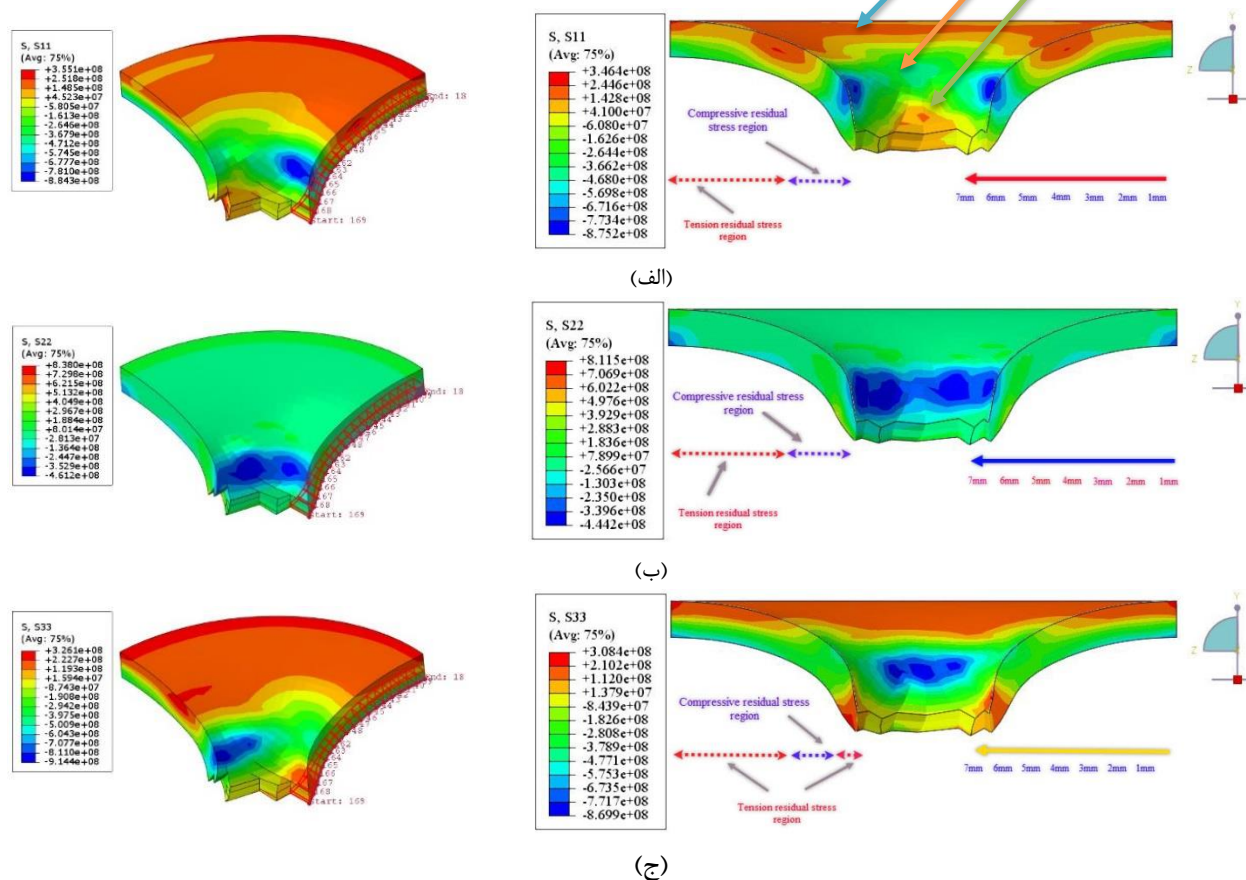
شکل ۱۰ تأثیر سرعت دورانی روی کرنش پلاستیک مؤثر، الف) سرعت دورانی ۶۰۰ و ب) سرعت دورانی ۱۸۰۰ و همچنین، تأثیر سرعت دورانی روی تنش فون میسر، ج) سرعت دورانی ۶۰۰ و د) سرعت دورانی ۱۸۰۰ میلی متر بر دور در سرعت دورانی و همچنین توزیع دما، ذ) سرعت دورانی ۱۸۰۰ و ر) سرعت دورانی ۶۰۰ میلی متر بر دور شرایط در نرخ پیشروی ۲۰ میلی متر بر دقیقه در ضخامت ثابت ۲/۵ میلی متری

از آنجا که تنش پسماند برگرفته از کرنش‌های غیریکنواخت در قطعات به وسیله اعمال بارهای مکانیکی و حرارتی هستند، اثر کرنش و تنش بررسی شده و نیز حرارت ایجاد شده در قطعات که در تصاویر مشخص شد، با اهمیت است [۵]. در این فرایند که برگرفته از کار مکانیکی به همراه اثرات حرارت است، اثر حرارت ایجاد شده در قطعه بسیار از کار مکانیکی با اهمیت تر است. همانطور که در تحقیقات گذشته بررسی حرارت را کاملاً نشان دادند [۱۱].

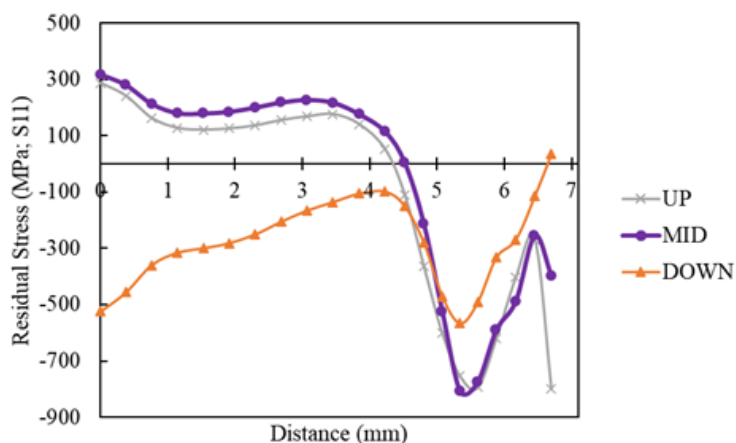
در این فرایند کاهش نیرو برگرفته از حرارت ایجاد شده توسط اصطکاک سطحی بین ابزار و قطعه بوده است. بنابراین، این اثرات روی تنش پسماند وارد شده در قطعه اثر دارد. علاوه بر این، بررسی تنش‌های پسماند در این فرایند که برای اتصال بین قطعات نیاز به بررسی دارد، زیرا که فرایند بعد از این روش رزوه کاری است که به تغییرات و توزیع تنش حساسیت دارد.

با توجه به این که در هر راستا تنش متفاوت است، پس باید تنش‌ها را در هر راستا بررسی کرد. همان‌طور که در پیشینه تحقیق مشخص شد، به دلیل نزدیکی این فرایند با روش جوشکاری اصطکاکی و اغتشاشی می‌توان از پژوهش‌های برگرفته در این زمینه بررسی و مقایسه کرد، به این دلیل که هر دو فرایند از اصطکاک و یک ابزار زاویه دار برای انجام فرایند روی قطعه استفاده می‌شود و در فرایند اصطکاک تبدیل به حرارت می‌شود [۵، ۱۱].

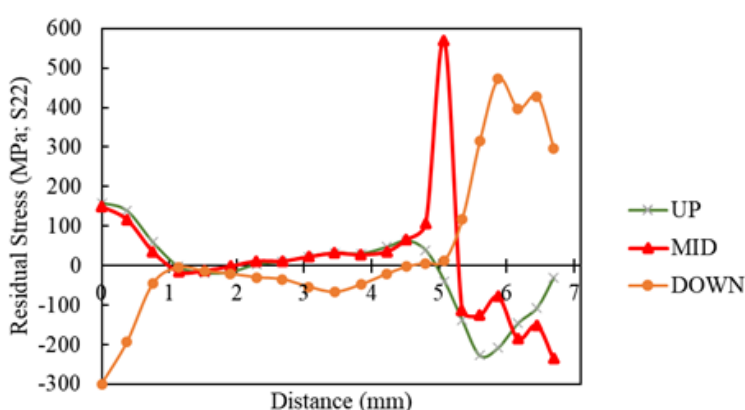
نتایج تنش پسماند در مسیر تعریف شده از سمت گیربندی به سمت سوراخ در قطعه، در شکل ۱۱ نشان ارائه شد. همچنین، در شکل ۱۲ توزیع تنش در راستاهای مختلف ارائه شده است. در شکل ۱۱ و ۱۲ قسمت الف توزیع تنش در راستای ۱ مشخص شده در اطراف قطعه کششی و هر چه به سمت سوراخ حرکت شود، تنش پسماند فشاری خواهد شد. مقدار این تنش پسماند فشاری در راستای ۱ حدود ۷۵۰ مگاپاسکال مشخص شد. همچنین در شکل ۱۱ و ۱۲ قسمت ب در راستای ۷ نیز به همین صورت است و تنش در کناره‌های گیربندی کششی و در نزدیکی سوراخ تنش کششی خواهد بود. میزان تنش فشاری در نزدیک سوراخ برای راستای ۲ حدود ۲۵۰ مگاپاسکال نشان داده است. این خصوصیت نشان می‌دهد نحوه گیربندی و شرایط مرزی تأثیر به‌سزایی روی تنش ایجاد شده دارد [۶].



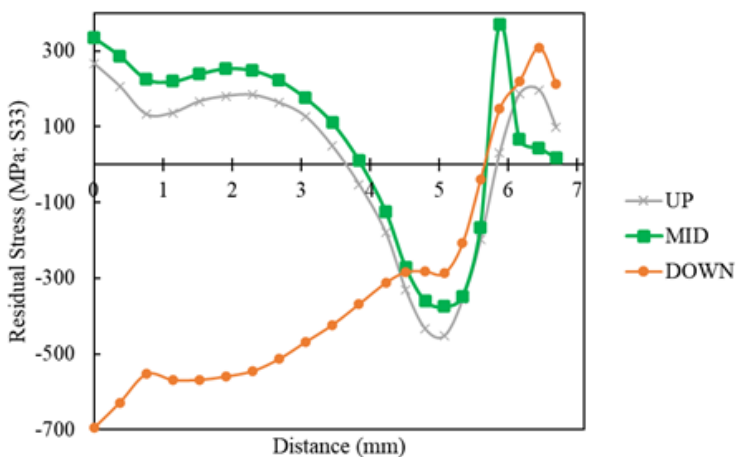
شکل ۱۱ مسیر مشخص شده برای تعیین تنش پسماند در قطعه در شرایط بهینه این آزمایش، الف) تنش پسماند راستای ۱، ب) تنش پسماند راستای ۲ و ج) تنش پسماند راستای ۳، در مسیر تعیین شده از سمت گیربندی به سمت سوراخ در قطعه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۲ توزیع تنش پسماند (الف) راستای ۱، (ب) راستای ۲ و (ج) راستای ۳، در مسیر تعیین شده از سمت گیره‌بندی به سمت سوراخ در قطعه در بالا، وسط و زیر ورق

در راستای ۳ تنش در نزدیکی سوراخ کششی و در فاصله کوتاهی فشاری شده و در ادامه قطعه کششی شده و هر چقدر به گیره‌بندی نزدیک شود تنش پسماند کششی افزایش می‌یابد (شکل ۱۱-الف و شکل ۱۲-الف). میزان تنش پسماند فشاری در این راستا و نزدیک سوراخ ایجاد شده حدود ۳۵۰ مگاپاسکال مشخص شد. تأثیر ابزار و حرکت ابزار روی تنش مشهود است؛ زیرا تنش‌های کششی و فشاری روی خواص مکانیکی و متالورژیکی قطعه تأثیر می‌گذارند. در تمام جهتها و در نزدیک گیره‌بندی تنش به صورت کششی قرار دارد. باتوجه به منابع ذکر شده، اثرات تغییرات ریزساختاری را مؤثر از منطقه تحت اثر حرارت برای توزیع تنش نشان می‌دهد.

علاوه بر این، حرارت ایجاد شده در مناطق مشخص شده، بنابر منابع ذکر شده در پیشینه تحقیق نشان می‌دهند که این منطقه تحت اثر حرارت، ریزساختار کوچک شده که منجر به ایجاد تنش میکرو در آن ناحیه شده است. لذا، تنش‌های ماکرو و میکرو که تحت اثر ریزساختار در قطعات ایجاد می‌شوند، تحت اثر ریز ساختار ماده و حرکت نابه‌جایی‌ها و فازهای سخت در قطعه ایجاد می‌شوند که این برگرفته از افزایش کرنش موثر در قطعه و طبق شکل‌های ۹ و ۱۰ مشخص شده است. بر طبق منابع متالورژیکی و تغییر شکل فلزات، تنش و کرنش با روابطی مانند رابطه هال-پچ، سختی و ریزساختار قطعه را به هم مرتبط می‌کنند [۳۲]. آنچه از تفاوت تنش در توزیع تنش پسماند در بالای قطعه، وسط ورق و زیر ورق در راستای طول قطعه مشخص شد، طبق شکل ۱۲ این توزیع و بنابر گیربندی متفاوت خواهد بود. در بالا و وسط ورق و رفتار یکسان است؛ ولی در پایین ورق بعد از برداشتن ابزار از قطعه و خنک کاری رفتار تنش متفاوت خواهد شد. آنچه از شکل ۱۱ مشخص است در داخل فلنج تنش پسماند فشاری وارد شد، اما در خارج از فلنج و داخل قطعه متناسب با نوع گیربندی این توزیع تنش پسماند متفاوت خواهد بود. در اینجا با توجه به گیربندی که به صورت دور تا دور قطعه بود؛ از این رو، توزیع تنش در زیر ورق و بالای آن مقادیر متفاوتی را نشان می‌دهد. بنابراین، اثر نحوه گیربندی بر تنش در این فرایند نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، برای توسعه روش سوراخ کاری اصطکاکی با روش بهینه‌سازی آزمایش‌هایی با کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس صورت گرفته است. با توجه به اینکه اهمیت تنش پسماند در قطعات نقش زیادی را ایفا می‌کند، در این تحقیق به توزیع تنش پسماند در قطعاتی که با فرایند سوراخ کاری اصطکاکی ایجاد شده‌اند، پرداخته شده است. ضمن اینکه توزیع دمایی، تنش، کرنش و نیروی عکس‌العمل وارد شده به ابزار نیز مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل داده‌ها با روش سطح پاسخ با کمک نرم افزار دیزاین اکسپرت روی نیروی ماشین کاری نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت نیرو افزایش خواهد یافت. همچنین، در این فرایند حالت بهینه نشان داد تا با قرار دادن پارامترهای ضخامت کمتر، نرخ پیشروی کمتر و نیز سرعت دورانی بالاتر، نیرو وارد به ابزار را کاهش خواهد داد. همچنین، در این آزمایش با افزایش ضخامت قطعه دما افزایش خواهد یافت، بنابراین با افزایش سرعت دورانی تنش و کرنش افزایش داشته است. با افزایش نرخ پیشروی کرنش نیز افزایش داشته، ولی مقدار تنش تأثیر چندانی را در نمونه‌های با شرایط یکسان فرایند نداشته است. نتایج شبیه‌سازی با نتایج قطعات سوراخ کاری اصطکاکی دمیر و همکاران با افزایش ضخامت قطعه و سرعت و پیشروی روی دما تأثیر مشابهی را نشان داده است. در ادامه، تنش پسماند برای نمونه بهینه با نتایج مشخص شده از طریق طراحی آزمایش گرفته شد. نتایج در راستاهای اصلی برای تنش‌های مختلف گرفته شد و در تمام راستا تنش در لبه قطعه و نزدیک سوراخ به صورت فشاری نشان داده شده است. تنش پسماند در راستاهای مختلف گرفته شد و توزیع آن در مسیر طول ورق تا سوراخ بررسی شد. همچنین، توزیع تنش‌ها در بالای ورق، وسط و پایین ورق مشخص شد. بنابراین نتایج نشان داد، نحوه گیربندی قطعات در این فرایند روی توزیع تنش پسماند اثر دارد و این تنش‌ها در بالای و وسط قطعه رفتار مشابه دارند، ولی در زیر قطعه رفتاری متفاوت تعیین شد. علاوه بر این، تنش پسماند در نزدیک سوراخ ایجاد شده فشاری و درون ورق اغلب کششی اندازه‌گیری شد.

References

- [1] Zolfaghari M, Ghoreishi M, Tahmasbi V. An investigation and optimization of effective parameters on thrust force in drilling cortical bone process using response surface methodology. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2016;3(2):54-61. [In Persian]
- [2] El-Bahloul SA, El-Shourbagy HE, El-Midany TT. Optimization of thermal friction drilling process based on Taguchi method and fuzzy logic technique. Int. J. Sci. Eng. Appl. 2015;4(2):55-9. doi: 10.7753/IJSEA0402.1006
- [3] El-Bahloul SA, El-Shourbagy HE, El-Bahloul AM, El-Midany TT. Experimental and thermo-mechanical modeling optimization of thermal friction drilling for AISI 304 stainless steel. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2018 Jan 1;20:84-92. doi: 10.1016/j.cirpj.2017.10.001
- [4] Urbikain G, Perez JM, López de Lacalle LN, Andueza A. Combination of friction drilling and form tapping processes on dissimilar materials for making nutless joints. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2018 May;232(6):1007-20. doi: 10.1177/0954405416661002
- [5] Alinaghian I, Amini S, Honarpisheh M. Residual stress, tensile strength, and macrostructure investigations on ultrasonic assisted friction stir welding of AA 6061-T6. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design.

- 2018 Oct;53(7):494-503. doi: [10.1177/0309324718789768](https://doi.org/10.1177/0309324718789768)
- [6] Alinaghian I, Honarpisheh M, Amini S. The influence of bending mode ultrasonic-assisted friction stir welding of Al-6061-T6 alloy on residual stress, welding force and macrostructure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018 Mar;95:2757-66. doi: [10.1007/s00170-017-1431-6](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1431-6)
- [7] Bustillo A, Urbikain G, Perez JM, Pereira OM, de Lacalle LN. Smart optimization of a friction-drilling process based on boosting ensembles. *Journal of manufacturing systems*. 2018 Jul 1;48:108-21. doi: [10.1016/j.jmsy.2018.06.004](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.06.004)
- [8] El-Bahloul SA. Friction drilling of cast aluminum alloy A380 without significant petal formation and radial fracture. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019 Jan 15;20:45-52. doi: [10.1007/s12541-019-00039-7](https://doi.org/10.1007/s12541-019-00039-7)
- [9] Somasundaram G, Rajendra Boopathy S, Palanikumar K. Modeling and analysis of roundness error in friction drilling of aluminum silicon carbide metal matrix composite. *Journal of composite materials*. 2012 Jan;46(2):169-81. doi: [10.1177/0021998311410493](https://doi.org/10.1177/0021998311410493)
- [10] Somasundaram G, Boopathy SR. Fabrication and friction drilling of aluminum silicon carbide metal matrix composite. In *Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering-2010* 2010 Nov 25 (pp. 21-26). IEEE. doi: [10.1109/FAME.2010.5714793](https://doi.org/10.1109/FAME.2010.5714793)
- [11] Eliseev AA, Fortuna SV, Kolubaev EA, Kalashnikova TA. Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction drilling. *Materials Science and Engineering: A*. 2017 Apr 13;691:121-5. doi: [10.1016/j.msea.2017.03.040](https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.040)
- [12] Lee SM, Chow HM, Yan BH. Friction drilling of IN-713LC cast superalloy. *Materials and Manufacturing Processes*. 2007 Sep 21;22(7-8):893-7. doi: [10.1080/10426910701451697](https://doi.org/10.1080/10426910701451697)
- [13] Lee SM, Chow HM, Huang FY, Yan BH. Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN-and TiAlN-coated tungsten carbide tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009 Jan 1;49(1):81-8. doi: [10.1016/j.ijmachtools.2008.07.012](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.07.012)
- [14] Dehghan S, Ismail MI, Ariffin MK, Baharudin BT, Sulaiman S. Numerical simulation on friction drilling of aluminum alloy: numerische simulation des reibbohrens von aluminiumlegierungen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2017 Apr;48(3-4):241-8. doi: [10.1002/mawe.201600768](https://doi.org/10.1002/mawe.201600768)
- [15] Krasauskas P, Kilikevičius S, Česnavičius R, Pačenga D. Experimental analysis and numerical simulation of the stainless AISI 304 steel friction drilling process. *Mechanika*. 2014;20(6):590-5. doi: [10.5755/j01.mech.20.6.8664](https://doi.org/10.5755/j01.mech.20.6.8664)
- [16] Krasauskas P. Experimental and statistical investigation of thermo-mechanical friction drilling process. *Mechanics*. 2011 Dec 27;17(6):681-6. doi: [10.5755/j01.mech.17.6.1014](https://doi.org/10.5755/j01.mech.17.6.1014)
- [17] Milner JL, Gnäupel-Herold T, Skovron JD. Residual stresses in flow drill screwdriving of aluminum alloy sheets. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference 2016* Jun 27 (Vol. 49897, p. V001T02A012). American Society of Mechanical Engineers. doi: [10.1115/MSEC2016-8823](https://doi.org/10.1115/MSEC2016-8823)
- [18] Demir Z. An Experimental Investigation of the Effect of Depth and Diameter of Pre-drilling on Friction Drilling of A7075-T651. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*. 2016 May 31;1(2):46-56. doi: [10.29187/jscmt.2017.5](https://doi.org/10.29187/jscmt.2017.5)
- [19] Pereira O, Urbikain G, Rodríguez A, Calleja A, Ayesta I, de Lacalle LL. Process performance and life cycle assessment of friction drilling on dual-phase steel. *Journal of Cleaner Production*. 2019 Mar 10;213:1147-56. doi: [10.1016/j.jclepro.2018.12.250](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.250)
- [20] Qu J, Blau PJ. A new model to calculate friction coefficients and shear stresses in thermal drilling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2008 Feb;130(1). doi: [10.1115/1.2815341](https://doi.org/10.1115/1.2815341)
- [21] Miller SF, Shih AJ. Friction drilling: a chipless hole-making process. In *International manufacturing science and engineering conference 2006* Jan 1 (Vol. 47624, pp. 911-918). doi: [10.1115/MSEC2006-21106](https://doi.org/10.1115/MSEC2006-21106)
- [22] Hosford WF, Caddell RM. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge university press; 2011. doi: [10.1017/CBO9780511976940](https://doi.org/10.1017/CBO9780511976940)
- [23] Brar NS, Joshi VS, Harris BW. Constitutive model constants for Al7075 - t651 and Al7075 - t6. In *Aip conference proceedings 2009* Dec 28 (Vol. 1195, No. 1, pp. 945-948). American Institute of Physics. doi: [10.1063/1.3295300](https://doi.org/10.1063/1.3295300)
- [24] Teimouri R, Amini S, Bami AB. Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6. *Measurement*. 2018 Feb 1;116:129-39. doi: [10.1016/j.measurement.2017.11.001](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.001)
- [25] Miller SF, Shih AJ. Thermo-mechanical finite element modeling of the friction drilling process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007 Jun;129(3):531-8. doi: [10.1115/1.2716719](https://doi.org/10.1115/1.2716719)
- [26] Baraheni M, Bami AB, Alaei A, Amini S. Ultrasonic-assisted friction drilling process of aerospace aluminum alloy (AA7075): FEA and experimental study. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2021 Sep 1;4(3):315-22. doi: [10.1016/j.ijlmm.2021.03.001](https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.03.001)
- [27] Khisheh S, Amirabadi H, Seyedkashi SM. Experimental investigation and simulation of the effects of friction

- drilling parameters on length of bush in stainless steel AISI304 sheet. Modares Mechanical Engineering. 2016 Feb 10;15(12):295-302. doi: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.26.4 [In Persian]
- [28] Demir Z, Özek C. Investigate the effect of pre-drilling in friction drilling of A7075-T651. Materials and Manufacturing Processes. 2014 May 4;29(5):593-9. doi: 10.1080/10426914.2014.892986
- [29] Demir Z, Özek C, Bal M. An experimental investigation on bushing geometrical properties and density in thermal frictional drilling. Applied Sciences. 2018 Dec 18;8(12):2658. doi: 10.3390/app8122658
- [30] Ozler L, Dogru N. An experimental investigation of hole geometry in friction drilling. Materials and Manufacturing Processes. 2013 Apr 1;28(4):470-5. doi: 10.1080/10426914.2012.746699
- [31] Shalamov PV, Kulygina IA, Yaroslavova EN. ANSYS software-based study of thermal drilling process. Procedia Engineering. 2016 Jan 1;150:746-52. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.098
- [32] Shalvandi M, Aghaei A. Investigation of the effect of ultrasonic vibration on the microstructure and mechanical properties of carbon steel in friction drilling process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021 Sep 23;8(7):1-9. [In Persian]