



## مطالعه تجربی تنش پسماند در فرایند تراشکاری به کمک پلاسما

محسن خواجهزاده<sup>\*</sup>، محمدرضا رازفر<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۸

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۲/۲۰

### کلمات کلیدی:

تنش پسماند

ماشینکاری به کمک حرارت

پلاسما

نیروهای برش

پراش پرتو ایکس.

**خلاصه:** یکی از چالش‌های ماشینکاری قطعات دقیق، احتمال وقوع تغییر شکل در قطعات پس از ساخت و یا در حین کارکرد آنها در اثر تنش‌های پسماند ماشینکاری است. بزرگی این تنش‌ها از بزرگی تنش‌های حرارتی و مکانیکی در این فرایند تأثیر می‌پذیرد. تنش‌های مکانیکی به نیروهای ماشینکاری وابسته بوده و تنش‌های حرارتی از حرارت تولیدشده در برش ماده متأثر هستند. ماشینکاری به کمک پلاسما فرآیندی است که از یک منبع حرارتی کنترل‌شده پلاسما برای گرم کردن بخشی از قطعه که در آستانه برش قرار دارد، استفاده می‌کند و در نتیجه این امر، مقاومت ماده در برابر برش کاهش یافته، مقادیر کوچک‌تری از نیروها و درجه حرارت برش شده و نهایتاً بزرگی تنش پسماند را کاهش می‌دهد. در این مقاله، تأثیر پارامترهای دمای براده تغییر شکل نیافته، سرعت برش و پیشروی بر تنش پسماند در فرایند برش متعامد به کمک پلاسما مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، دمای براده‌ی تغییرشکل نیافته تأثیرگذارترین پارامتر بر بزرگی تنش‌های پسماند در این فرایند بوده و با افزایش آن در محدوده ۷۵ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، تنش پسماند در سطح قطعه به طور متوسط ۸۵/۳۰ درصد فشاری‌تر شده است.

### ۱- مقدمه

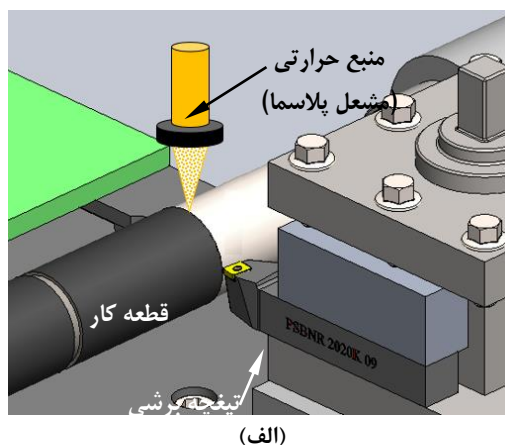
یکی از چالش‌های جدی در زمینه ماشینکاری قطعات دقیق، احتمال وقوع تغییرشکل در قطعات در حین کارکرد و یا پس از نصب آنها در اثر تنش‌های پسماند ماشینکاری است. اصطلاح تنش‌های پسماند به تنش‌هایی اطلاق می‌شود که بدون اینکه بار خارجی به سیستم وارد شده باشد، در قطعه کار وجود دارند. این تنش‌ها در اثر فرایندهای کار سرد و گرم و در حین شکل‌دهی قطعات ممکن است به وجود آیند.

در فرایند ماشینکاری، این تنش‌ها عمدتاً در اثر تغییرشکل پلاستیک قطعه‌کار و در اثر حرارت حاصل از عملیات برش ماده به وجود می‌آیند. به طور معمول تنش‌های پسماند در یک قطعه در

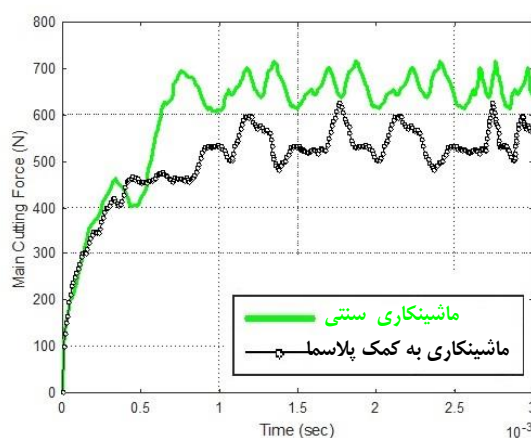
\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mo.khajehzadeh@aut.ac.ir

حالت تعادل بوده و مادامی که حالت تعادل از بین نرفته، وجود این تنش‌ها ملموس نخواهد بود. در عین حال اگر لایه‌های خارجی چنین قطعه‌ای به واسطه عملیات ماشین‌کاری برداشته شوند، این تنش‌ها مجدداً توزیع شده و موجبات واپیچش قطعه‌کار را فراهم خواهند کرد. از طرف دیگر، ممکن است تنش‌های پسماند پس از گذشت چند مدت و یا به دلیل تغییر در درجه حرارت محیط کاری، به صورت تغییر شکل قطعه آزاد شوند. این مسأله در مورد قطعات دقیق از اهمیت بالایی برخوردار است. دلیل این اهمیت از آنجا ناشی می‌شود که تغییر شکل قطعات در اثر تنش‌های پسماند، فقط به فرایند ساخت محدود نبوده و ممکن است در حین کارکرد ماشین و پس از نصب قطعات به وقوع بپیوندد و تبعات جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد. بنابراین مسأله تغییر شکل قطعات ماشینکاری در اثر تنش‌های پسماند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.





(الف)



(ب)

شکل ۱. فرایند تراشکاری به کمک حرارت: (الف) شماتیک فرایند و (ب) مقایسه مؤلفه اصلی نیروی برش با تراشکاری سنتی

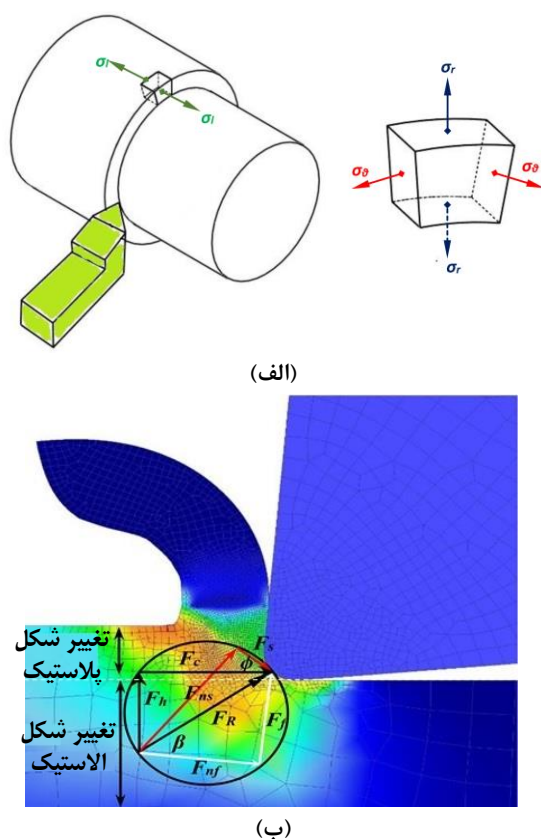
**Fig. 1. Heat Assisted Machining Process: (a) Schematic and (b) Comparison of Main Cutting Force with Conventional Turning.**

استفاده می‌کند. در نتیجه این امر، استحکام تسلیم، سختی و کرنش سختی ماده کاهش یافته و در نتیجه ماده راحت‌تر و با صرف نیروی کمتری ماشینکاری می‌شود، شکل (۱-ب)؛ علاوه بر آن استفاده از روش مذکور باعث کاهش شار حرارتی تولیدشده در فرایند برش فلز شده و سطح تنش‌های حرارتی را کاهش می‌دهد.

در برش فلزات تنش‌های پسماند در سطح قطعات ماشینکاری شده عمدتاً به سه دلیل زیر ایجاد می‌شوند: (۱) در حین عمل برش ماده، سطح خارجی قطعه تحت تأثیر تغییر شکل‌های پلاستیک ناشی از نفوذ ابزار و اصطکاک آن قرار داشته و این در حالی است که لایه‌های داخلی، تحت تأثیر تغییر شکل‌های الاستیک قرار دارند. پس از پایان عملیات ماشینکاری، لایه‌های داخلی تمایل دارند به حالت اولیه برگردند که این مسأله با مقاومت لایه‌های بیرونی که تغییر شکل

بر اساس پژوهش‌های صورت‌گرفته، بزرگی تنش‌های پسماند در فرایند ماشینکاری به شدت از بزرگی تنش‌های حرارتی و مکانیکی در این فرایندها تأثیر می‌پذیرد. تنش‌های مکانیکی به نوبه خود به بزرگی نیروهای ماشینکاری وابسته بوده و تنش‌های حرارتی از بزرگی حرارت تولیدشده در فرایند برش فلزات متأثر هستند. بنابراین انتظار می‌رود که استفاده از فرایندهای ماشینکاری که منجر به تولید سطح پایین‌تری از نیروهای برشی و درجه حرارت در برش فلزات شوند، بزرگی تنش پسماند در فرایندهای ماشینکاری را کاهش دهند. در مقاله حاضر برای حصول به این مقصود از فرایند ماشینکاری به کمک پلاسما استفاده شده است.

ماشینکاری به کمک پلاسما، شکل (۱-الف)، فرآیندی است که از یک منبع حرارت خارجی برای گرم کردن و نرم کردن قطعه‌کار



شکل ۲. فرایند برش متعامد (الف) مؤلفه‌های تنش پسماند و (ب) نواحی تغییر شکل و مؤلفه‌های نیرویی.

**Fig. 2. Orthogonal Metal Cutting (a) residual stress components and (b) deformation regions and cutting forces**

فلزات از سه مؤلفه محیطی ( $\sigma_\theta$ ) (در جهت سرعت برش)، شعاعی ( $\sigma_r$ ) (در راستای شعاع قطعه کار) و طولی ( $\sigma_\phi$ ) (در راستای محور دوران قطعه) تشکیل شده است [۱]، شکل (۲-الف).

در سال ۲۰۱۲ ازل و همکاران<sup>۲</sup> تنش پسماند ناشی از ماشینکاری آلیاژهای پایه تیتانیوم و نیکل را با استفاده از روش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود مطالعه کردند. در این مطالعه اثر پوشش ابزار بر تنش پسماند در فرایند تراشکاری مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، در صورت استفاده از ابزار با پوشش نیتريد تیتانیوم-آلومینیوم<sup>۳</sup>، تنش‌های پسماند کششی‌تر می‌شوند. همچنین بر اساس نتایج این پژوهش، با افزایش سرعت برشی، مقدار مؤلفه محیطی تنش پسماند افزایش می‌یابد [۲].

در سال ۲۰۱۴، آرازولا و همکاران<sup>۴</sup> تنش پسماند ناشی از

پلاستیک داده‌اند، مواجه می‌شود. این مسأله باعث تولید تنش‌های پسماند می‌شود که عمدتاً از نوع فشاری بوده و در سطح قطعه ظاهر می‌شوند. (۲) در اثر عملیات برش سطح قطعه در اثر حرارت تولید شده منبسط شده و پس از اتمام برش، خنک شده و منقبض می‌شود. این در حالی است که لایه‌های داخلی در مقابل این انبساط و انقباض مقاومت کرده تنش‌های پسماندی را در سطح قطعه و لایه‌های زیرسطحی به وجود می‌آورند. (۳) تغییر درجه حرارت در لایه‌های سطحی قطعه، تغییرات متالورژیکی را به دنبال دارد. این تغییرات متالورژیکی سبب تغییر حجم لایه‌های سطحی شده که مقاومت لایه‌های داخلی ماده را به همراه داشته و منجر به پیدایش تنش‌های پسماند در سطح قطعه خواهد شد. بنابراین، تنش پسماند در سطح قطعات ماشینکاری شده دارای ماهیتی سه بعدی می‌باشد.

در سال ۱۹۴۸، هنریکسن<sup>۱</sup> نشان داد که تنش پسماند در برش

2 -Ozel et al.

3 - TiAlN

4 -Arrazola et al.

1 -Henrickson

در سال ۲۰۱۷، جی و همکاران<sup>۳</sup>، با توسعه یک مدل ریاضی آنالیز حساسیت تنش‌های پسماند در شرایط ماشینکاری با روانکاری کمینه را مورد بررسی قرار دادند و چنین نتیجه‌گیری کردند که پارامترهای سرعت برش، پیشروی و عمق به ترتیب بیشترین تأثیر را در تنش‌های پسماند ماشینکاری دارند [۶].

در سال ۲۰۱۸، تائو و همکاران<sup>۴</sup> تنش پسماند ناشی از ماشینکاری تیتانیوم را با استفاده از روش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود مطالعه کردند. در این مطالعه اثر شعاع لبه ابزار بر تنش پسماند در فرایند تراشکاری مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، با افزایش شعاع لبه‌ی برنده، تنش پسماند فشاری تر می‌شود [۷].

بر اساس نتایج تحقیقات فوق می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که هر پارامتری که بتواند تولید حرارت در نواحی برش و یا نیروهای وارد بر قطعه‌کار را تحت تأثیر قرار دهد، می‌تواند بر تنش پسماند هم تأثیرگذار باشد. تاکنون تحقیقات متعددی در رابطه با روش‌های کاهش درجه حرارت و نیروهای ماشینکاری در فرایند برش فلزات صورت گرفته است. یکی از این روش‌ها، استفاده از فرایند ماشینکاری به کمک حرارت است. بر اساس نتایج تحقیقات صورت گرفته، اعمال یک منبع حرارت کنترل شده برای گرم کردن بخشی از قطعه که در آستانه برش قرار دارد، سبب کاهش مقاومت ماده در برابر برش شده و فرایند ماشینکاری منجر به مقادیر کوچک‌تری از نیروهای برشی و درجه حرارت در نواحی برش خواهد شد [۸-۱۱].

در سال ۱۹۹۷، نوواک و همکاران<sup>۵</sup> با استفاده از مجموعه‌ای از آزمایش‌های تجربی، تأثیر اعمال حرارت را بر قابلیت ماشینکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش از پلازما به عنوان منبع حرارتی در فرایند ماشینکاری هیبریدی استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، مؤلفه اصلی نیروی برش در حدود ۲۰ درصد نسبت به ماشینکاری سنتی کاهش یافت و علاوه بر آن صافی سطح قطعه و عمر ابزار برش در مقایسه با ماشینکاری سنتی، به میزان قابل‌ملاحظه بهبود یافته است [۸].

در سال ۲۰۰۱، لشاک و همکاران<sup>۶</sup> فرایند تراشکاری به کمک پلازما در رابطه با جنس اینکونل ۷۱۸ را مورد مطالعه تجربی و

تراشکاری آلیاژ نیکل را با توسعه یک مدل المان محدود سه بعدی مورد مطالعه قرار داده و نتایج را با مجموعه‌ای از آزمایش‌های تجربی مقایسه کردند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، مؤلفه تنش محیطی در مقایسه با مؤلفه‌های شعاعی و طولی، مقدار بزرگ‌تری دارد [۳].

در سال ۲۰۱۴، جعفریان و همکاران، تأثیر پارامترهای ماشینکاری شامل سرعت برش، پیشروی و عمق برش را بر زبری سطح و بزرگی تنش پسماند قطعات تراشکاری شده مطالعه کردند و سپس انتخاب بهینه پارامترهای ماشینکاری را با هدف دستیابی همزمان به مینیمم تنش‌های پسماند و زبری سطح انجام دادند [۴]. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش، دو حالت بهینه از مقادیر پارامترهای ماشینکاری، ارائه شد: (۱) استفاده از سطوح بالای پارامترهای برشی (پیشروی  $mm/rev$  ۰/۲۹، سرعت برش  $m/min$  ۱۱۵ و عمق برش  $mm$  ۰/۳)، که منجر به مقادیر کوچک زبری سطح (در محدوده  $1/5-1/4$   $\mu m$ ) و مقادیر متوسط تنش پسماند کششی (در محدوده  $MPa$  ۲۰۰) خواهد شد. (۲) استفاده از سطوح پائین پارامترهای برشی (پیشروی  $mm/rev$  ۰/۱۵، سرعت برش  $m/min$  ۶۰ و عمق برش  $mm$  ۰/۲۵)، که منجر به مقادیر کوچک‌تر زبری سطح (در محدوده  $3/5-0$   $\mu m$ ) و مقادیر کوچک‌تر تنش پسماند کششی (کوچک‌تر از  $MPa$  ۱۶۰) خواهد شد که سطوح مربوط به حالت (۲)، برای پرداخت کاری مناسب گزارش شده است.

در سال ۲۰۱۶، هانگ و همکاران<sup>۱</sup> به بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری، نوع پوشش‌دهی و شعاع نوک ابزار بر تنش پسماند در فرایند تراشکاری اینکونل ۷۱۸ پرداختند. همچنین در این پژوهش یک مدل المان محدود برای تحلیل عددی تنش پسماند توسعه داده شد. بر اساس نتایج این پژوهش، با افزایش پیشروی، درجه حرارت در ناحیه‌ی برش افزایش یافته و بزرگی تنش‌های پسماند ناشی از حرارت افزایش می‌یابد. همچنین آنها دریافتند که عمق برش تأثیری بر تنش پسماند ندارد. علاوه بر آن نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ابزارهای پوشش‌دهی شده به روش رسوب‌دهی فیزیکی بخار<sup>۲</sup> و با شعاع نوک کوچک‌تر، می‌تواند تنش‌های پسماند با بزرگی بیشتری را در سطح قطعات ایجاد کند و در نتیجه عمر خستگی قطعه ماشینکاری شده را افزایش دهد [۵].

3 - Ji et al.

4 - Tao et al.

5 - Novak et al.

6 - Leshock et al.

1 - Hung et al.

2 - Physical Vapor Deposition (PVD)

از روش طراحی آزمایش تاگوچی، مقادیر بهینه پارامترهای برش در فرایند تراشکاری به کمک لیزر را با هدف دستیابی به کوچک‌ترین صافی سطح مورد مطالعه قرار دادند؛ بر اساس نتایج پژوهش، پیشروی، سرعت برش، درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته و عمق برش به ترتیب مؤثرترین پارامترها بر صافی سطح قطعات ماشینکاری شده بودند. بنابر نتایج پژوهش، استفاده از حرارت در فرایند ماشینکاری علاوه بر دستیابی به زبری سطحی برابر با ماشینکاری سنتی، هم نرخ برداشت ماده را افزایش می‌دهد و هم عمر ابزار برش را ۲/۳۱ برابر افزایش خواهد داد [۱۳].

در سال ۲۰۱۷، بالبا و همکاران<sup>۶</sup> تنش پسماند ناشی از تراشکاری آلیاژ نیکل ۷۱۸ را با توسعه یک مدل شبیه‌سازی هیدرودینامیک ذرات هموارشده<sup>۷</sup> مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، برخلاف ماشینکاری سنتی که تنش پسماند کششی در سطح قطعه ایجاد می‌کند، ماشینکاری به کمک لیزر در محدوده مورد آزمایش، منجر به ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعات می‌شود [۱۴]. در عین حال این محققین هیچ داده تجربی برای صحت‌سنجی ادعای خود مطرح نکردند و همچنین تأثیر بزرگی توان منبع حرارتی بر نوع و اندازه تنش‌های پسماند ماشینکاری را مورد مطالعه قرار ندادند.

در سال ۲۰۱۷، پن و همکاران<sup>۸</sup> با در نظر گرفتن اثرات تبلور مجدد<sup>۹</sup> ناشی از بارگذاری ترمومکانیکی در حین فرایند برش ماده، یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی تنش‌های ماشینکاری در فرایند ماشینکاری متعامد تیتانیوم پیشنهاد کردند و دقت عملکرد مدل پیش‌بینی را با استفاده از نتایج تجربی منتشرشده در مقالات قبلی مورد مطالعه قرار دادند؛ بر این اساس مدل توسعه‌یافته از دقت مناسبی در پیش‌بینی تنش‌های پسماند ماشینکاری برخوردار است [۱۵].

در سال ۲۰۱۸، ون و همکاران<sup>۱۰</sup> در پژوهشی، روش‌های مختلف مدل‌سازی تنش پسماند در فرایند ماشینکاری را مورد بررسی قرار دادند. بر این اساس تاکنون تنش پسماند با استفاده از روش‌های تحلیلی<sup>۱۱</sup>، شبیه‌سازی المان محدود<sup>۱۲</sup> و مدل‌سازی تجربی<sup>۱۳</sup> مورد

عددی قرار دادند. این محققین با استفاده از روش تفاضل محدود، درجه حرارت سطح قطعه‌کار را در فرایند تراشکاری به کمک حرارت مدل‌سازی کردند. علاوه بر آن نتایج مطالعات تجربی این پژوهش نشان می‌داد که ماشینکاری به کمک حرارت، نیروهای برشی را کاهش می‌دهد [۹].

سان و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۵ با مروری بر پژوهش‌های منتشرشده در رابطه با ماشینکاری به کمک حرارت، پیشنهاد می‌کنند که برای ایجاد حرارت مؤثر در فرایند ماشینکاری به کمک حرارت، منبع حرارت باید نقطه‌ای، سریع و قابل کنترل باشد [۱۰]. علاوه بر آن نحوه اعمال حرارت باید به گونه‌ای باشد که باعث بروز تغییرات در ریز ساختار ابزار برش و یا قطعه ماشین‌کاری شده، نشود.

در سال ۲۰۱۴، فرحناکیان و رازفر فرایند تراشکاری به کمک پلاسما را در رابطه با فولاد سخت‌کاری شده ۴۱۴۰ مورد مطالعه تجربی قرار دادند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، چنانچه منبع حرارتی به گونه‌ای کنترل شود که درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته در محدوده ۱۵۰ تا ۳۹۰ درجه سانتیگراد قرار بگیرد، مؤلفه اصلی نیروی برش نسبت به تراشکاری سنتی، به طور متوسط ۲۷ درصد در شرایط آزمایش‌شده، کاهش می‌یابد [۱۱].

کاهش نیرو و درجه حرارت در فرایند ماشینکاری به کمک حرارت، همچنین کاهش فرسایش ابزار را به دنبال دارد. کونگ و همکاران<sup>۲</sup> در پژوهشی در سال ۲۰۱۶، مسأله عمر ابزار و مکانیسم‌های فرسایش ابزار را در ماشینکاری به کمک حرارت مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه‌گیری کردند که سایش مکانیکی<sup>۳</sup>، مکانیسم غالب در فرسایش ابزار تنگستن کاربیدی در هنگام ماشینکاری کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم-سیلیکون کارباید می‌باشد؛ این امر به دلیل کاهش شدید نیروها در اثر اعمال حرارت متمرکز ناشی از لیزر، گزارش شده است. در عین حال این محققین گزارش کردند که اعمال حرارت، مکانیسم‌های سایش چسبندگی<sup>۴</sup> و نفوذ<sup>۵</sup> را تسریع خواهد کرد اما در مجموع در همه شرایط برشی، ابزار مورد استفاده در ماشینکاری به کمک حرارت، نسبت به ابزار ماشینکاری سنتی، طول عمر بیشتری از خود نشان می‌دهد [۱۲]. این محققین در پژوهشی دیگر، با استفاده

6 - Balbaa et al.  
7 - Smoothed-particle hydrodynamics  
8 - Pan et al.  
9 - Recrystallization  
10 - Wan et al.  
11 - Analytical  
12 - Finite Element Simulation  
13 - Empirical Method

1 - Sun et al.  
2 - Kong et al.  
3 - Abrasive Wear  
4 - Adhesive Wear  
5 - Diffusion Wear

جدول ۱. مقادیر ثوابت جانسون کوک برای فولاد ۴۱۴۰ [۱۹].

Table 1. Johnson Cook Constants for AISI 4140 [19].

$T_m$ (°C)	$n$	$m$	$C$	$B$ (MPa)	$A$ (MPa)
۱۴۱۶	۰/۱۸	۱	۰/۰۱۲	۴۷۷	۱۵۳۹

تراشکاری به کمک حرارت، می‌توان انتظار داشت که با کاهش نیروها در این فرایند هیبریدی، ماهیت و بزرگی تنش‌های پسماند موجود در قطعه ماشین‌کاری شده تغییر کنند. این مسأله تاکنون مورد توجه محققین قرار نگرفته است. بنابراین مقاله حاضر به مطالعه تجربی تأثیر پارامترهای ماشینکاری (سرعت و پیشروی) و حرارتی (درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته) بر تنش پسماند در فرایند تراشکاری به کمک پلاسما اختصاص یافته است.

## ۲- ماشینکاری به کمک حرارت

در سال‌های اخیر، تقاضا برای مواد استحکام بالا و مقاوم به حرارت به خصوص در صنایع هوا فضا رو به افزایش است. اما اغلب این مواد به خاطر خواص مکانیکی و فیزیکی آنها به سختی ماشینکاری می‌شوند، زیرا استحکام بالا و ضریب هدایت حرارتی پایین این مواد، منجر به افزایش نیروها و دما شده که منجر به کاهش عمر ابزار و افزایش تنش‌های پسماند قطعات می‌شود.

یکی از مهم‌ترین موضوعات در زمینه مکانیک برش فلزات، مدلسازی صحیح تنش جریان ماده قطعه کار می‌باشد. تنش جریان، تنش تسلیم آنی ماده است که به عنوان تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما بیان می‌شود. تاکنون انواع مختلفی از مدل‌های ریاضی برای توصیف رفتار ماده در شرایط بارگذاری مختلف ارائه شده است. مدل جانسون کوک<sup>۳</sup> یکی از مدل‌هایی است که تاکنون به طور گسترده در مطالعات مرتبط با برش فلزات، مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل نخستین بار در سال ۱۹۸۳ توسط جانسون و کوک و بر اساس تست میله فشار هاپیکسون شکاف‌دار<sup>۴</sup> و بر طیف گسترده‌ای از نرخ کرنش و دما ارائه شد. این مدل با استفاده از رابطه ریاضی زیر بیان

مطالعه قرار گرفته است؛ روش مدلسازی تجربی از دقت مناسبی برخوردار است اما محدوده کاربرد مشخصی داشته و نتایج آن صرفاً در محدوده داده‌های تجربی مورد استفاده در توسعه مدل، معتبر می‌باشد. از طرف دیگر وجود محدودیت‌های اساسی در اعمال شرایط مرزی و مدلسازی رفتار ماده، نتایج مدل‌های تحلیلی را با تردید جدی روبرو کرده است. در عین حال استفاده از مدلسازی المان محدود نیز به دلیل هزینه محاسباتی بالا، با محدودیت‌هایی همراه است. بر اساس نتایج این پژوهش، به نظر می‌رسد توسعه مدل‌های المان محدود و همچنین ارائه تکنیک‌های جدید در اندازه‌گیری تنش پسماند بهترین روش پیش رو برای مدلسازی تنش‌های پسماند ماشینکاری باشد [۱۶].

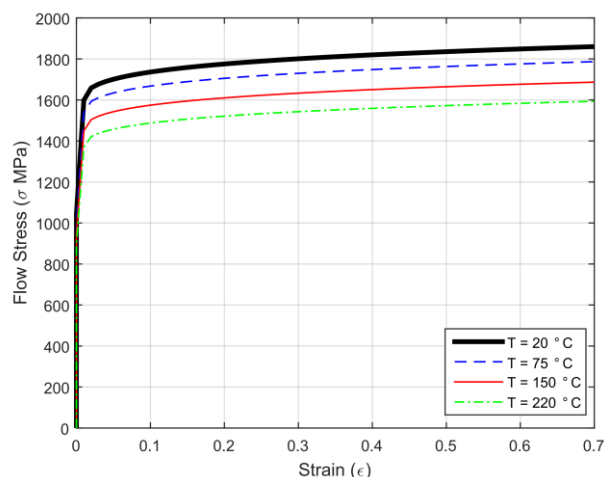
در سال ۲۰۱۹، میکوهی و همکاران<sup>۱</sup> یک روش آنالیز معکوس را در رابطه با تنش‌های پسماند ماشینکاری، ارائه کردند. در این تکنیک با استفاده از یک مدل هیبریدی، مقادیر بهینه پارامترهای ماشینکاری با هدف دستیابی به یک مقدار مشخص از تنش پسماند در سطح قطعات توسعه یافته است. این محققین صحت مدل توسعه یافته را با مجموعه‌ای از آزمون‌های تجربی مورد مطالعه قرار داده و ماکزیمم خطای مدل پیش‌بینی را در حدود ۴/۵ درصد بیان کردند [۱۷].

در سال ۲۰۲۰، کدم و پاواده<sup>۲</sup>، تأثیر اعمال روانکارهای سازگار با محیط زیست را بر تنش‌های پسماند ماشینکاری در فرایند ماشینکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸، مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش، استفاده از بخار آب به عنوان سیال روانکار، بهبود در یکپارچگی سطح قطعه ماشینکاری شده را از منظر افزایش تنش‌های پسماند فشاری به دنبال دارد [۱۸].

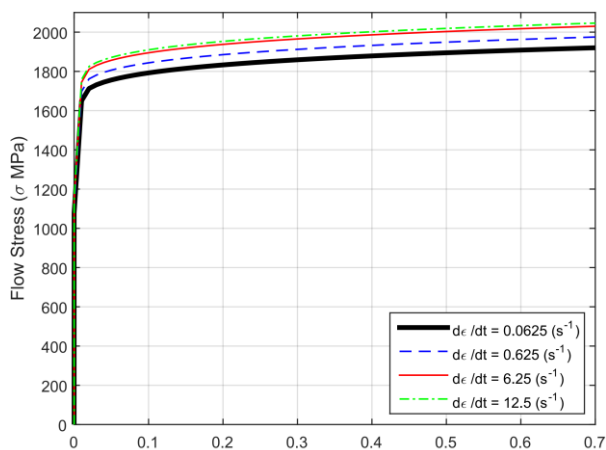
با توجه به نتایج پژوهش‌های انجام شده در رابطه با فرایند

3 -Johnson Cook  
4 - Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)

1 -Mirkoohi et al.  
2 -Kadam and Pawade



(الف)



(ب)

شکل ۳. تغییرات تنش جریان فولاد ۴۱۴۰ (الف) در درجه حرارت‌های مختلف (نرخ کرنش ثابت  $0.0625 \text{ s}^{-1}$ ) و (ب) در نرخ کرنش‌های مختلف (در ۲۰ درجه سانتیگراد) [۱۹].

Fig. 3. Variation of flow stress in AISI 4140 (a) the effect of temperature (at constant strain rate =  $0.0625 \text{ s}^{-1}$ ) (b) the effect of strain rates (at constant temperature =  $20^\circ\text{C}$ ) [19].

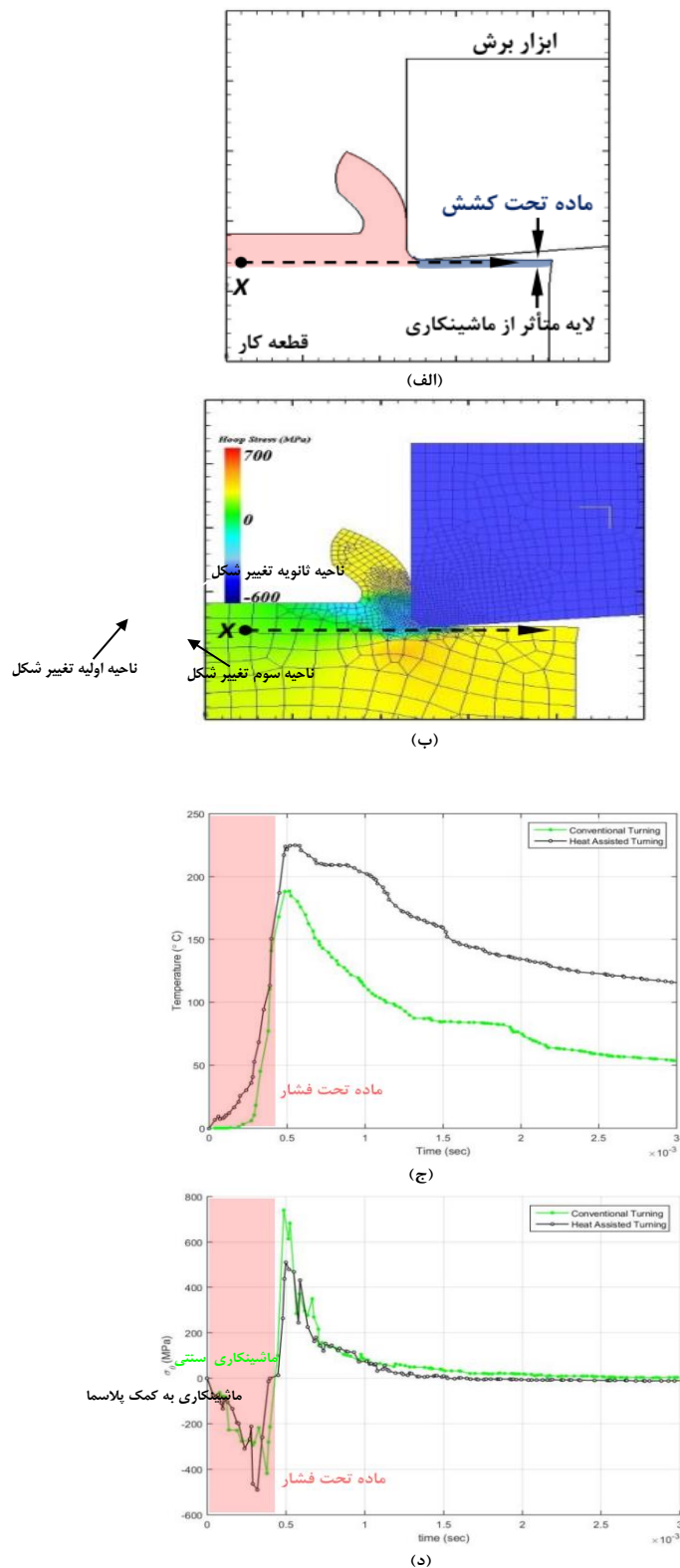
تنش جریان در اثر تغییر در درجه حرارت قطعه کار در حین فرایند تغییر شکل استفاده می‌شود. بنابراین در معادله (۱)، پارامترهای  $A$ ،  $B$ ،  $C$ ،  $m$  و  $n$  ثابت‌های ماده بوده که با توجه به جنس قطعه کار تعیین می‌شوند، درجه حرارت‌های  $T_m$  و  $T_r$  به ترتیب نقطه ذوب قطعه و درجه حرارت محیط هستند و  $\dot{\epsilon}$  نشان دهنده نرخ کرنش می‌باشد. در جدول (۱) مقادیر ثوابت جانسون کوک برای فولاد سخت کاری شده ۴۱۴۰ گردآوری شده است.

با استفاده از تئوری فون میسز، می‌توان معادله (۱) را به جای مؤلفه تنش نرمال، بر اساس تنش برشی بیان نمود [۱۹]:

می‌شود [۱۹]:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (1)$$

در رابطه فوق پیرانتز اول نشان دهنده رفتار الاستیک-پلاستیک ماده قطعه کار بوده و  $n$  توان کرنش سختی است. پیرانتز دوم اصطلاحاً عبارت ویسکوز نامیده می‌شود و برای اعمال اثر نرخ کرنش‌های بالا بر تنش جریان ماده به کار می‌رود. پیرانتز سوم برای اعمال اثر تغییرات



شکل ۴. نمایش نحوه توزیع تنش و درجه حرارت در قطعه کار در فرایندهای تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک حرارت.

Fig. 4. Cutting Stress and Temperature Variation in workpiece during conventional and heat assisted turning.



تنش جریان با افزایش دما کاهش یافته، شکل (۳-الف)، و چگونگی این امر مقدار نیروی مورد نیاز برای برش ماده را کاهش می‌دهد؛ در ماشینکاری به کمک حرارت، از یک منبع حرارت کنترل شده برای گرم کردن بخشی از قطعه که در آستانه برش قرار دارد، استفاده می‌شود. در نتیجه این امر، تنش برشی جریان جنس قطعه کار ( $\tau$ ) کاهش یافته و فرایند ماشینکاری منجر به مقادیر کوچک تری از نیروهای برش و شار حرارتی در نواحی اولیه و ثانویه برش شده و نهایتاً بزرگی تنش پسماند را کاهش می‌دهد.

امروزه عمدتاً از لیزر و پلاسما به عنوان منبع حرارتی در فرایند ماشینکاری به کمک حرارت استفاده می‌شود. لیزر ویژگی‌های مناسبی مانند تمرکز انرژی بالا داشته ولی در مقایسه با پلاسما، هزینه به مراتب بالاتری دارد. پرتو لیزر و پلاسما در مقایسه با دیگر روش‌ها از این مزیت برخوردار هستند که می‌توانند درجه حرارت نقاط واقع در سطح قطعه را به صورت متمرکز و در مدت زمان کوتاهی به مقادیر مورد نیاز افزایش دهند. این ویژگی امکان آن را فراهم می‌کند که فقط بخشی از قطعه کار که در جلوی ابزار برشی و در آستانه برش قرار گرفته، گرم شده و بلافاصله ماشینکاری شود.

مزیت دیگر استفاده از لیزر و پلاسما به عنوان منبع حرارتی به واسطه قابلیت این دو منبع در ایجاد گرادیان حرارتی بالا در عمق قطعه کار است؛ بالا بودن گرادیان حرارتی سبب می‌شود که دمای نقاط واقع بر سطح قطعه، به مراتب بالاتر از دمای لایه‌های زیرین سطح باشد. بنابراین چنانچه اعمال حرارت کنترل شده باشد، می‌توان سطح قطعه را گرم کرد، به راحتی ماشینکاری نمود و در عین حال لایه‌های زیرین سطح قطعه، چندان از اعمال حرارت متأثر نشوند. در مقاله حاضر، از پلاسما به عنوان منبع حرارتی مورد نیاز در فرایند ماشینکاری به کمک حرارت استفاده شده است.

#### ۲-۱ تنش پسماند در ماشینکاری به کمک حرارت

عمل برش فلزات، حاصل حرکت نسبی بین ابزار برش و قطعه کار می‌باشد که در نتیجه آن مقداری از فلز، به عمق برش و به شکل براده، از قطعه کار جدا می‌شود. توزیع مؤلفه تنش محیطی وارد شده به قطعه کار در نواحی اطراف ابزار نشان می‌دهد که تنش‌های وارد شده به نقاط واقع در جلو ابزار فشاری بوده و برای نقاط واقع در پشت ابزار کششی می‌باشد، شکل (۴).

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( A + B \left( \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \right)^n \right) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (2)$$

که در آن  $\tau$ ،  $\gamma$ ،  $\dot{\gamma}$  و  $\dot{\gamma}_0$  به ترتیب تنش برشی جریان بر اساس معیار فون میسز، کرنش برشی پلاستیک معادل، نرخ کرنش برشی و نرخ کرنش برشی مرجع می‌باشند. مدل جانسون کوک، معادلات (۱) و (۲)، فرض می‌کند که کرنش، نرخ کرنش و دما به طور مستقل از یکدیگر تنش جریان ماده را تحت تأثیر قرار می‌دهند، شکل (۳).

حرکت نسبی ابزار و قطعه کار در فرآیند برش فلزات سبب تغییر شکل پلاستیک در منطقه ماشینکاری شده و در نهایت به عملیات براده برداری منجر می‌شود. مقاومتی که یک قطعه در برابر تغییر شکل از خود نشان می‌دهد، به صورت یک نیروی ماشینکاری بر روی ابزار اثر کرده و عکس العمل آن به قطعه وارد می‌شود. بر اساس دایره ارنست و مرچنت، شکل (۲-ب)، در فرایند برش متعامد مؤلفه اصلی نیروی براینده برش ( $F_c$ ) در راستای سرعت برش از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$F_c = \frac{\tau a_c a_p}{\sin \phi_n} \times \frac{\cos(\beta - \alpha_n)}{\cos(\phi_n + \beta - \alpha_n)} \quad (3)$$

همچنین با فرض متعامد بودن فرایند برش فلز، حرارت تولید شده به ازای واحد عمق برش در نواحی اولیه و ثانویه برش، شکل (۴-الف)، به ترتیب با روابط (۴) و (۵) بیان می‌شوند [20]:

$$\dot{Q}_s = \frac{\tau a_c V_c \cos \alpha_n}{\sin \phi_n \cos(\phi_n - \alpha_n)} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_f = \frac{\tau a_c V_c \cos \beta}{\cos(\phi_n + \beta - \alpha_n) \sin(\phi_n - \alpha_n)} \quad (5)$$

در روابط فوق،  $\tau$  تنش برشی جریان جنس قطعه کار،  $a_p$  عمق برش،  $\phi_n$  زاویه صفحه برش،  $V_c$  سرعت برش،  $\beta$  زاویه اصطکاک و  $\alpha_n$  زاویه براده نرمال است. همچنین  $a_c$  ضخامت براده تغییر شکل نیافته است که در برش متعامد با پیشروی ( $a_c = a_f$ ) برابر است. اکنون می‌توان با استفاده از معادلات (۲) تا (۵) توضیح داد که چرا در فرایند ماشینکاری به کمک حرارت مواد سخت ماشینکار،

سطح آزاد ابزار و براده دور می‌شود و درجه حرارت آن تا رسیدن به درجه حرارت محیط کاهش می‌یابد.

همانگونه که در شکل (۴-ج) هم مشاهده می‌شود، روند تغییرات درجه حرارت در قطعه‌کار در فرایند تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک حرارت، تقریباً یکسان است. تنها تفاوتی که وجود دارد آن است که ماکزیمم درجه حرارت در قطعه در تراشکاری به کمک حرارت به واسطه اعمال پیشگرم، در مقایسه با تراشکاری سنتی بزرگ‌تر بوده و سرعت خنک‌شدن قطعه نیز در حالت تراشکاری به کمک حرارت، با نرخ کندتری انجام می‌شود.

تنش‌های موجود در سطح قطعه چه در ماشینکاری سنتی و چه در ماشینکاری به کمک حرارت، با دور شدن از نواحی تغییر شکل، کاهش خواهند یافت.

کاهش در بزرگی مؤلفه‌های تنش با کاهش همزمان در درجه حرارت سطح قطعه‌کار همراه است. نهایتاً درجه حرارت در سطح قطعه به درجه حرارت محیط خواهد رسید و این در حالی است که نقاط واقع بر سطح قطعه کماکان تحت تنش‌های کششی و یا فشاری قرار دارند؛ این مؤلفه‌های تنش باقیمانده در سطح قطعه ماشینکاری شده را تنش‌های پسماند می‌گویند.

تنش‌های موجود در سطح قطعه چه در ماشینکاری سنتی و چه در ماشینکاری به کمک حرارت، با دور شدن از نواحی تغییر شکل، کاهش خواهند یافت. این کاهش در بزرگی مؤلفه‌های تنش با کاهش همزمان در درجه حرارت سطح قطعه‌کار همراه است. نهایتاً درجه حرارت در سطح قطعه به درجه حرارت محیط خواهد رسید و این در حالی است که نقاط واقع بر سطح قطعه کماکان تحت تنش‌های کششی و یا فشاری قرار دارند؛ این مؤلفه‌های تنش باقیمانده در سطح قطعه ماشینکاری شده را تنش‌های پسماند می‌گویند.

مروری بر پژوهش‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که در فرایند ماشینکاری، بارهای حرارتی ناشی از برش فلز عامل ایجاد تنش‌های پسماند کششی بوده و بارهای مکانیکی عامل ایجاد تنش‌های پسماند فشاری هستند [۱-۵]. بنابراین هر پارامتری که بتواند تولید حرارت در نواحی برش و یا نیروهای وارد بر قطعه‌کار را تحت تأثیر قرار دهد، می‌تواند بر مقادیر مؤلفه‌های تنش پسماند هم تأثیرگذار باشد. در نتیجه می‌توان انتظار داشت که با کاهش نیروها در فرایند ماشینکاری به کمک حرارت، بزرگی تنش‌های پسماند موجود در قطعه

توزیع تنش را در فرایند برش متعامد، مطابق شکل (۴-الف و ب) در نظر بگیریم؛ چنانچه برای نقطه دلخواه  $X$  که پس از ماشینکاری در داخل قطعه باقی می‌ماند، مقدار تنش به عنوان تابعی از زمان رسم شود، نموداری مطابق شکل (۴-د) ایجاد خواهد شد. وقتی که ابزار برش رو به جلو حرکت می‌کند، ماده واقع در جلوی ابزار، ناحیه صورتی رنگ در شکل (۴-الف)، تحت فشار قرار می‌گیرد. فشار وارد به نقطه  $X$  تا رسیدن به ناحیه اولیه برش به طور فزاینده افزایش می‌یابد. پس از عبور از ناحیه اولیه برش، تنش‌های فشاری سریعاً از بین رفته و جای خود را به تنش‌های کششی می‌دهند.

همانگونه که در شکل (۴-د) هم مشاهده می‌شود، روند تغییرات تنش در قطعه‌کار در فرایند تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک حرارت، تقریباً یکسان است. تنها تفاوتی که وجود دارد به بزرگی مؤلفه‌های تنش مربوط می‌شود. به دیگر بیان، اعمال حرارت در فرایند تراشکاری به کمک حرارت باعث می‌شود که قطعه‌کار مقاومت کمتری در مقابل برش از خود نشان دهد و در نتیجه بزرگی مؤلفه‌های تنش در قطعه در این فرایند نسبت به ماشینکاری سنتی کوچک‌تر باشد.

مطابق شکل (۴-ب)، در فرایند برش فلزات، سه منبع اصلی تغییر شکل و تولید حرارت وجود دارد؛ ناحیه اول، نواحی اطراف صفحه برش است که در آن بخشی از قطعه‌کار به شکل براده جدا می‌شود. براده جدا شده از قطعه‌کار، تحت فشار بالا بر روی سطح براده ابزار شروع به لغزش می‌کند. این حرکت لغزشی به دلیل اصطکاک بالایی که دارد، به عنوان یک منبع حرارتی ثانویه عمل کرده و ناحیه دوم تغییر شکل نامیده می‌شود. نهایتاً چنانچه نوک ابزار کاملاً تیز نباشد، بخش‌هایی از نوک ابزار واقع در سطح آزاد، با قطعه‌کار ماشین‌کاری شده تماس مالشی پیدا خواهد کرد و منجر به تولید حرارت خواهد شد. این منبع حرارتی اصطکاکی، ناحیه سوم تغییر شکل نامیده می‌شود.

در شکل (۴-ج)، درجه حرارت در نقطه  $X$  از ماده در حین فرایند برش متعامد، به عنوان تابعی از زمان رسم شده است. نقطه  $X$  در حرکت خود به سمت ابزار، به ناحیه تغییر شکل اولیه می‌رسد و از طریق هدایت گرما از ناحیه تغییر شکل اولیه، گرم می‌شود تا مطابق شکل (۴-ج)، درجه حرارت آن شروع به افزایش کند.

نقطه  $X$  در قطعه‌کار باقی مانده و در اثر اصطکاک سطح آزاد ابزار با سطح ماشینکاری شده، درجه حرارت آن مجدداً افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در نهایت نقطه  $X$  از ناحیه اصطکاک

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho_w c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

در رابطه (۶)،  $\rho_w$  دانسیته،  $c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $k$  ضریب هدایت حرارتی و  $T(r, \phi, z, t)$  درجه حرارت لحظه‌ای هر نقطه از قطعه کار است که در دستگاه مختصات استوانه‌ای بیان شده است. شرایط مرزی حاکم بر مسأله انتقال حرارت، معادله (۶)، مطابق شکل (۵-الف) به صورت زیر بیان می‌شود؛ در آغاز فرایند و درست قبل از اعمال منبع حرارتی متمرکز، قطعه کار در درجه حرارت اتاق قرار دارد [۲۱]:

$$T(r, \phi, z, 0) = T_r \quad (7)$$

سطوح انتهائی قطعه کار ( $z = L$  و  $z = 0$ ) انتقال حرارت همرفت طبیعی دارند که می‌توان از اثر آن صرف نظر کرد [۲۱]:

$$k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{z=0,L} = 0 \quad (8)$$

در سطوح جانبی قطعه کار اعمال شار حرارتی در اثر کانال پلاسما ( $q''_{plasma}$ )، انتقال حرارت همرفت اجباری در اثر جت گاز پلاسما ( $q''_{forced-conv.}$ )، انتقال حرارت همرفت طبیعی ( $q''_{natural-conv.}$ ) و انتقال حرارت در اثر تشعشع وجود دارد که می‌توان از اثر تشعشع صرف نظر کرد؛ بنابراین برای سطوح جانبی قطعه کار می‌توان نوشت [۲۱]:

$$k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = q''_{plasma} - q''_{forced-conv.} - q''_{natural-conv.} \quad (9)$$

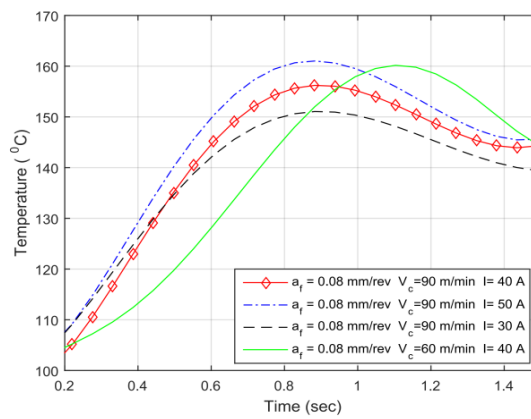
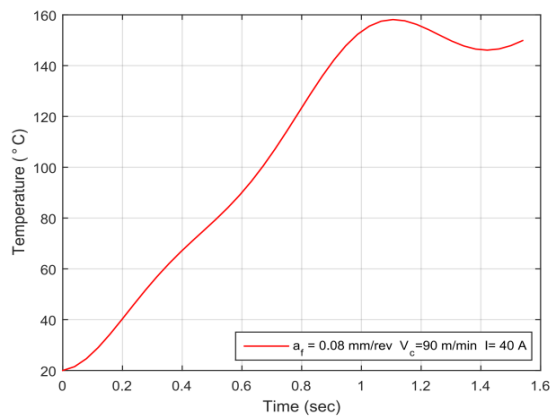
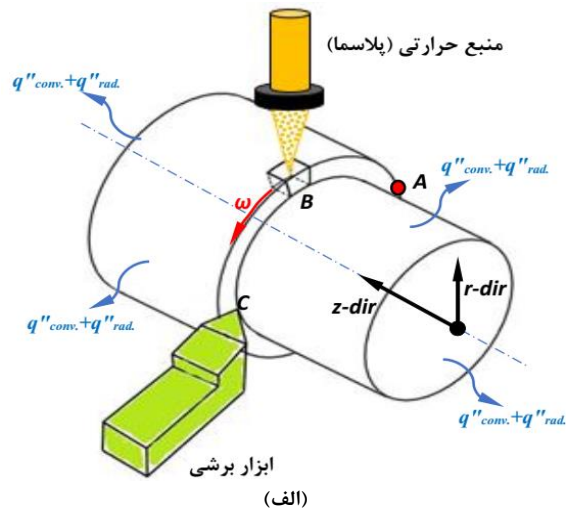
علاوه بر آن برای سهولت در حل معادله انتقال حرارت، تمام سطوح قطعه کار به جز نقطه اعمال منبع حرارتی پلاسما با قطعه کار، به صورت بی دررو در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برای سطوح جانبی قطعه کار می‌توان نوشت [۲۱]:

ماشین کاری شده نیز کاهش یابد. علاوه بر کاهش نیرو، تراشکاری به کمک حرارت از یک مزیت دیگر هم برخوردار است و آن پایین تر بودن سرعت خنک شدن قطعه کار در مقایسه با ماشینکاری سنتی است. در این حالت، کندبودن سرعت خنک کاری قطعه به مانند یک عملیات حرارتی تنش‌گیری<sup>۱</sup> عمل کرده و باعث می‌شود که تنش‌های پسماند کششی در سطح قطعه به صورت کرنش‌های پلاستیک کششی در سطح قطعه آزاد شوند و تنش‌های پسماند فشاری تر شوند.

## ۲-۲- مدل‌سازی دمای براده تغییر شکل نیافته

در شکل (۵-الف)، شماتیک فرایند تراشکاری به کمک حرارت، نشان داده شده است. المانی از قطعه کار را در نظر بگیرید که بر روی سطح خارجی قطعه در موقعیت  $A$  قرار دارد. این المان در اثر دوران قطعه، به سمت منبع حرارتی نزدیک شده و درجه حرارت آن سریعاً افزایش می‌یابد، شکل (۵-ب). وقتی این المان به محل قرارگیری منبع حرارتی (موقعیت  $B$ ) رسید، به ماکزیمم درجه حرارت خود خواهد رسید. با دور شدن از منبع حرارتی، درجه حرارت المان به واسطه انتقال حرارت به محیط اطراف (عمدتاً هدایت حرارتی و همرفت) شروع به کاهش یافتن می‌کند. نهایتاً این المان در نقطه  $C$  در معرض برش ابزار قرار می‌گیرد. مقدار درجه حرارت این المان در آستانه برش را درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته می‌گویند.

کنترل درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در فرایند ماشینکاری به کمک حرارت است؛ چنانچه این مقدار، از یک حد مشخص کمتر باشد، تنش جریان ماده تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت، شکل (۳-الف)، و در نتیجه نمی‌توان انتظار کاهش نیروهای برشی را داشت. از طرف دیگر چنانچه مقدار درجه حرارت بیش از درجه حرارت تبلور مجدد باشد، بروز تغییرات ناخواسته در ریزساختار قطعه ماشین کاری شده، اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. بنابراین برای رسیدن به سطوح دمایی مورد نیاز از براده تغییر شکل نیافته، لازم است که توزیع دما در قطعه کار مشخص باشد تا بتوان جریان الکتریکی منبع پلاسما را با توجه به شرایط ماشینکاری و درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته مورد نیاز تنظیم کرد. معادله حاکم بر انتقال حرارت قطعه کار در فرایند تراشکاری به کمک حرارت، شکل (۵-الف)، در دستگاه مختصات استوانه‌ای مطابق معادله (6) است [21]:



شکل ۵. مدل‌سازی درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته در فرایند تراشکاری به کمک حرارت [۲۱] (الف) شرایط حاکم بر مسأله انتقال حرارت، (ب) تغییرات درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته و (ج) تأثیر پیشروی، سرعت برش و شدت جریان بر درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته

Fig. 5. Modeling of undeformed chip temperature in heat assisted turning [21] (a) heat transfer problem boundary condition, (b) undeformed chip temperature variations and (c) effect of feed, cutting speed and electrical current intensity on undeformed chip temperature.

جدول ۲. مشخصات فنی دستگاه مولد پلاسما.

Table 2. Characteristics of Plasma Source Device

مشخصه	محدوده
منبع تغذیه (ولتاژ)	۳×۳۸۰
ضریب توان	۰/۹۳
ماکزیمم جریان ورودی (آمپر)	۲۳
سیکل کاری	٪ ۶۰
جریان خروجی (آمپر)	۲۲-۱۲۰
ماکزیمم ضخامت برش	۳۵ میلیمتر

صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۲۱]:

$$\Delta T(r, \phi, z, t) = \int_0^t \iiint_{-\infty}^{+\infty} q''_{plasma}(\rho, \varphi, \xi, \tau) G(r - \rho, \phi - \varphi, z - \xi, t - \tau) r d\rho d\varphi dz d\tau \quad (12)$$

به دلیل چرخش قطعه، متغیر دورانی در هر لحظه  $t$  به صورت  $\varphi = \phi_0 - 2\pi nt$  تعریف می‌شود که  $\phi_0$  موقعیت زاویه‌ای اولیه منبع حرارتی پلاسما و  $n$  سرعت دوران قطعه‌کار بر حسب دور بر دقیقه می‌باشند. همچنین به دلیل جابجایی خطی منبع حرارتی ناشی از پلاسما در اثر حرکت پیشروی، متغیر خطی در هر لحظه  $t$  به صورت  $\xi = \xi_0 - na_f t$  تعریف می‌شود که  $\xi_0$  موقعیت محوری اولیه منبع حرارتی پلاسما،  $n$  سرعت دوران قطعه‌کار بر حسب دور بر دقیقه و  $a_f$  مقدار پیشروی بر حسب میلی‌متر بر دور می‌باشند. در شکل (۵-ب)، نتایج عددی حاصل از حل معادله (۱۲) برای یک نقطه دلخواه در سطح قطعه‌کار به عنوان تابعی از زمان نشان داده شده است؛ در این شکل، درجه حرارت متناظر با موقعیت  $C$ ، نشان دهنده درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته است که در آستانه برش قرار دارد. در شکل (۵-ج)، اثر سرعت برش قطعه‌کار و شدت جریان پلاسما بر روی دمای براده تغییر شکل نیافته قابل مشاهده است. در پارامترهای برشی یکسان، با افزایش شدت جریان پلاسما، به دلیل افزایش توان منبع حرارتی پلاسما، دمای براده تغییر شکل نیافته افزایش می‌یابد اما در شدت جریان ثابت، با افزایش سرعت برش یا افزایش پیشروی، به دلیل کاهش مدت زمان انتقال حرارت قطعه‌کار با منبع حرارتی متمرکز، افزایش دمای کمتری نسبت به

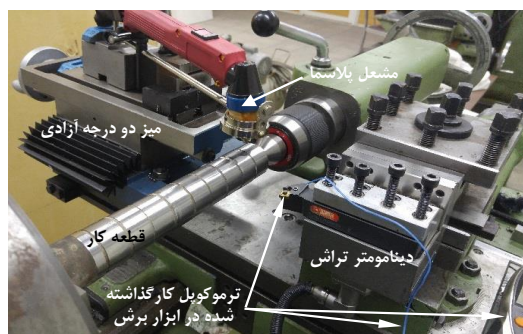
$$k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = q''_{plasma} \quad (10)$$

با توجه به اینکه منبع حرارتی استفاده شده در این پژوهش پلاسما می‌باشد، برای تابع شار حرارتی ناشی از پلاسما (یعنی  $q''_{plasma}$ ) در معادله (۱۰)، می‌توان نوشت [۹]:

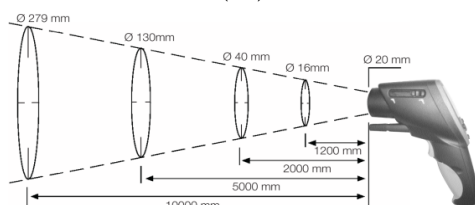
$$q''_{plasma} = \eta \varepsilon U I e^{-\frac{1}{2r_p^2}[(\phi - \phi_0)^2 + (z - z_0)^2]} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، متغیرهای  $\phi_0$  و  $z_0$  به ترتیب نشان‌دهنده موقعیت زاویه‌ای و محوری اولیه منبع حرارتی پلاسما می‌باشند. متغیر  $r_p$  نشان‌دهنده شعاع محدوده اثر پلاسما بوده که این پارامتر مهندسی وابسته به مشخصات دستگاه و نازل پلاسما در محدوده شکل‌گیری کانال پلاسما است. همچنین  $\varepsilon$  ضریب جذب قوس پلاسما، نسبت نرخ حرارت وارد شده توسط قوس پلاسما به قطعه‌کار نسبت به توان الکتریکی پلاسما می‌باشد. نهایتاً  $I$  شدت جریان برقراری کانال پلاسما،  $U$  ولتاژ شکل‌گیری کانال پلاسما و  $\eta$  بازده دستگاه پلاسما می‌باشد.

با توجه به فرض‌های صورت‌گرفته، تمام سطوح قطعه‌کار به جز نقطه اعمال منبع حرارتی پلاسما با قطعه‌کار، به صورت بی‌دررو در نظر گرفته می‌شود و بنابراین برای حل معادله (۶) از توابع گرین استفاده می‌شود. نهایتاً با جایگذاری تابع شار حرارتی ناشی از پلاسما و انتگرال‌گیری بر روی زمان و مکان، میزان افزایش درجه حرارت به



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶. تنظیم تجربی ماشین کاری به کمک حرارت (الف) نحوه چیدمان تجهیزات، (ب) اندازه گیری دمای سطح با استفاده از دوربین حرارتی و (ج) دستگاه فیلیپس مدل PW 3040 برای اندازه تنش های پسماند.

Fig. 6. Experimental setup of heat assisted machining (a) setup arrangement, (b) surface temperature measurement using thermal camera and (c) residual stress measurement using Phillips PW 3040.

و مجموعه بر روی دستگاه تراش نصب شد، شکل (۶-الف). برای اندازه گیری دمای سطح قطعه کار در حین روشن کردن پلاسما (بدون براده برداری)، از دوربین حرارتی مادون قرمز تستو ۸۴۵ استفاده شد، شکل (۶-ب). نقطه ای که دوربین حرارتی اندازه گیری می کند، در فاصله محوری ۲/۵ میلیمتری و زاویه محیطی ۹۰ درجه از مرکز قوس پلاسما تنظیم شد.

یکی از محدودیت های مدل حرارتی توسعه داده شده با معادله (۱۲)، تعیین ثوابت تابع شار حرارتی مربوط به کانال پلاسما و ثوابت آن در معادله (۱۱) یعنی شعاع محدوده اثر پلاسما ( $r_p$ ) و ضریب جذب قوس پلاسما ( $\epsilon$ ) می باشد. برای غلبه بر این محدودیت، تابع شار حرارتی مربوط به کانال پلاسما با استفاده از معادله (۱۳) بیان

مقادیر کوچک تر سرعت برش و پیشروی حاصل خواهد شد.

### ۳- روش مطالعه تجربی

#### ۳-۱ تجهیزات تراشکاری به کمک حرارت

آزمایش ها بر روی دستگاه تراش انیورسال مدل TN50BR انجام شد. تجهیزات پلاسما شامل یک اینورتور و مشعل برشکاری از شرکت صبا الکتریک می باشد. مدل دستگاه مولد استفاده شده، CUT ۱۲۱ می باشد. مشخصات این دستگاه در جدول (۲) ارائه شده است.

نازل مسی دارای قطر ۲ میلیمتر و کاتد تنگستنی با زاویه ۲۰ درجه در مشعل پلاسما قرار داده شد. به منظور تنظیم موقعیت قوس پلاسما، مشعل پلاسما بر روی یک میز دو درجه آزادی قرار داده شد

جدول ۳. مشخصات مکانیکی فولاد ۴۱۴۰ [۱۵].

Table 3. Mechanical Properties of AISI 4140 [15].

مقدار	مشخصه
۴۱۷ MPa	تنش تسلیم
۶۵۵ MPa	تنش نهائی
۷۸۰۰ kg/m <sup>3</sup>	دانسیتة
۲۰۰ GPa	مدول الاستیک
٪ ۲۷/۵	ازدیاد طول
۰/۲۹	ضریب پواسن

جدول ۴. متغیرها و سطوح آنها.

Table 4. Variables and their levels

نام متغیر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
سرعت برش (m/min)	۶۰	۹۰	۱۲۰	---
پیشروی (mm/rev)	۰/۰۸	۰/۱۴	---	---
درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته (°C)	۲۰	۷۵	۱۵۰	۲۰۰

خواهد شد. در نهایت مقدار  $q''_{plasma,i}$  در رابطه  $q''_{plasma,i} = C_0 I_i^\gamma$  مشخص خواهد شد. با ادامه این روند (در مقادیر مختلف جریان)، نهایتاً ۱۹ رابطه به فرم کلی  $q''_{plasma,i} = C_0 I_i^\gamma$  به دست خواهد آمد و سپس با استفاده از روش حداقل مربعات، ثابت  $C$  و  $\gamma$  تعیین خواهند شد. اکنون برای رسیدن به مقادیر درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته مورد نیاز در جدول (۴)، برای هر شرایط برشی، می‌توان مقدار جریان الکتریکی منبع پلاسما را محاسبه کرد و بر روی دستگاه تنظیم نمود.

### ۲-۳ تجهیزات اندازه گیری تنش پسماند

در این پژوهش، اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به کمک پراش پرتو ایکس و به کمک قانون براگ<sup>۲</sup> انجام شد. در این روش لازم است ماده‌ی مورد استفاده دارای شبکه‌ی کریستالی باشد. در نمونه تحت تنش، تغییراتی در ساختار شبکه کریستالی ماده مثل کشیده‌شدن در

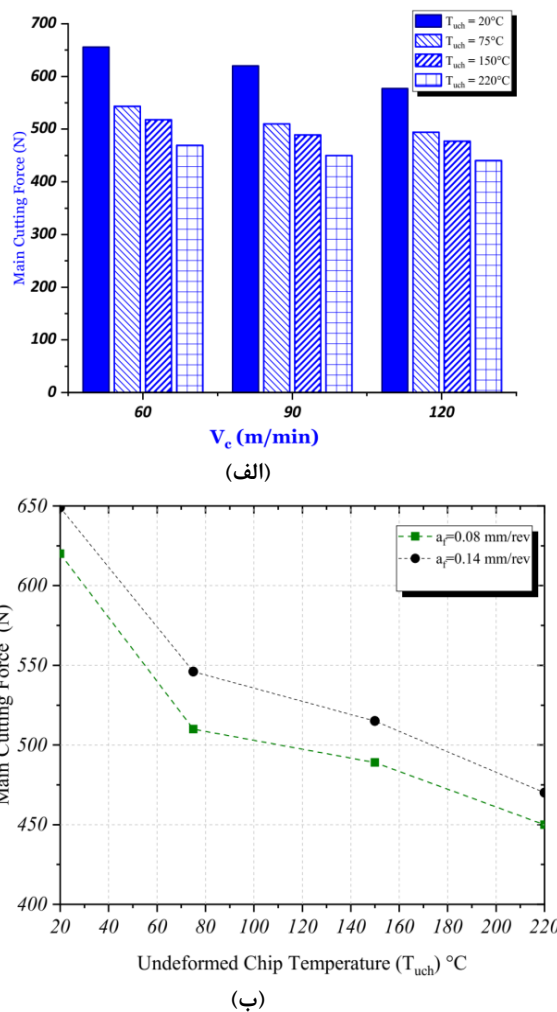
شد:

$$q''_{plasma} = C_0 I_i^\gamma \quad (13)$$

برای تعیین ثابت  $C$  و  $\gamma$  در معادله (۱۳)، از روش معکوس<sup>۱</sup> در حل مسائل انتقال حرارت، استفاده شد؛ بدین ترتیب که مقداری برای جریان پلاسما در محدوده ۲۲ تا ۱۱۲ آمپر انتخاب شد ( $I_i$ ) و سپس درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته با استفاده از دوربین حرارتی، اندازه‌گیری شد ( $T_{uch,exp,i}$ ). سپس مدل حرارتی، معادله (۱۲)، با انتساب یک مقدار اولیه به تابع شار حرارتی پلاسما ( $q''_{plasma}$ )، اجرا شده و مقدار درجه حرارت متناظر با آن با استفاده از روابط تئوری، محاسبه خواهد شد ( $T_{uch,model,i}$ ). چنانچه انطباق مناسبی بین درجه حرارت اندازه‌گیری شده توسط دوربین و مقدار درجه حرارت پیش‌بینی شده توسط مدل وجود نداشته باشد، فرایند حل با تغییر در  $q''_{plasma}$  تا رسیدن به میزان انطباق مناسب ( $T_{uch,exp,i} \approx T_{uch,model,i}$ )، تکرار

2 Bragg's Law

1 -Inverse Method



شکل ۷. تأثیر پارامترهای ماشین کاری و درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته بر مؤلفه اصلی نیروی برش (الف) پیشروی  $0.08$  میلی‌متر بر دور و (ب) سرعت برش  $90$  متر بر دقیقه

Fig. 7. The effect of cutting parameters and undeformed chip temperature on main component of cutting force (a)  $a_f = 0.08$  mm/rev and (b)  $V_c = 90$  m/min.

در این رابطه،  $E$  و  $\nu$  مدول الاستیسیته و ضریب پواسون جنس قطعه کار،  $\psi$  زاویه بین بردار نرمال صفحه پرش و بردار نرمال سطح نمونه است. همچنین  $d_n$  فاصله صفحات به ازای  $\psi = 0$  می‌باشد. در این پژوهش، برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند، ابتدا یک قرص از قطعه کار توسط وایرکات بریده شد تا باعث ایجاد تنش‌های پسماند اضافی در قطعه کار نشود. سپس تنش‌های پسماند موجود در قطعات توسط دستگاه فیلیپس مدل  $PW 3040$  اندازه‌گیری شدند، شکل (۶-ج). این دستگاه مجهز به نرم‌افزار  $X^{\text{Pert Stress}}$  می‌باشد و دارای یک کتابخانه کامل از مواد مختلف است که اطلاعاتی همچون

یک راستا و جمع‌شدن در جهت عمود بر آن ایجاد می‌شود که باعث تغییر در فاصله بین صفحات می‌شود. با اندازه‌گیری دقیق می‌توان میزان تغییر فاصله بین صفحات و در نتیجه تنش‌های ایجاد شده در نمونه را محاسبه نمود. برای این منظور پرتو ایکس تحت زوایای مختلفی به قطعه تابیده می‌شود و سپس مقدار تنش براساس روابط تنش و کرنش و تغییرات فاصله بین صفحات، با استفاده از رابطه (۱۸) بدست می‌آید، [۱]:

$$\sigma_\phi = \frac{E}{(1+\nu)\sin^2\psi} \left( \frac{d_\psi - d_n}{d_n} \right) \quad (14)$$



کلیدی در رابطه با توانایی فرایند تراشکاری به کمک حرارت در کاهش مؤلفه اصلی نیروی برش به حساب می‌آید. با افزایش درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته به واسطه اعمال پلاσμα، درجه حرارت در نواحی برش افزایش پیدا می‌کند. این افزایش درجه حرارت بر اساس معادلات (۲) و (۳)، باعث کاهش تنش‌های برشی در نواحی برش شده و منجر به کاهش نیروها می‌شود. در درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته ۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۰ درجه سانتیگراد، نیروی اصلی برش نسبت به تراشکاری معمولی، به ترتیب بطور متوسط ۱۶/۴۵، ۱۹/۸۳ و ۲۶/۵۶ درصد در شرایط آزمایش شده، کاهش می‌یابد.

در مقادیر ثابت درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته، افزایش سرعت برش منجر به کاهش مؤلفه اصلی نیروی برش می‌شود. دلیل این امر عمدتاً به واسطه کاهش و یا عدم تشکیل لبه انباشته در سرعت‌های برشی بالاتر است. در پژوهش حاضر، با افزایش سرعت برش از ۶۰ به ۱۲۰ متر بر دقیقه، متوسط مؤلفه اصلی نیروی برشی در ماشینکاری سنتی در حدود ۱۲/۰۴ درصد و در ماشینکاری به کمک حرارت به طور متوسط ۷/۷۰ درصد کاهش می‌یابد.

در مقادیر بالای درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته، افزایش سرعت برش سبب کاهش قابل ملاحظه در مقدار مؤلفه متوسط نیروی برش نخواهد شد. به عنوان نمونه در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود که در درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته برابر با ۷۵ درجه سانتیگراد، افزایش سرعت برش از ۶۰ به ۱۲۰ متر بر دقیقه، مؤلفه اصلی نیروی برش را در حدود ۹/۰۲ درصد کاهش می‌دهد اما در درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته برابر با ۱۵۰ درجه سانتیگراد، افزایش سرعت برش از ۶۰ به ۱۲۰ متر بر دقیقه، کاهش ۷/۹۱ درصدی مؤلفه اصلی نیروی برش را به دنبال دارد. به همین ترتیب در درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته برابر با ۲۲۰ درجه سانتیگراد، افزایش سرعت برش از ۶۰ به ۱۲۰ متر بر دقیقه، کاهش ۶/۱۸ درصدی مؤلفه اصلی نیروی برش را به دنبال دارد.

در مقادیر ثابت درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته، هم در ماشینکاری سنتی و هم در ماشینکاری به کمک حرارت با افزایش پیشروی متوسط نیروهای برشی افزایش می‌یابد، شکل (۷-ب). دلیل این امر آن است که با افزایش پیشروی سطح مقطع براده تغییرشکل نیافته افزایش یافته و این امر سبب افزایش نیروی برشی مورد نیاز برای برداشت ماده می‌شود. در پژوهش حاضر، با افزایش

مدول الاستیسیته و ضریب پواسون را برای جنس‌های مختلف در بر دارد. با قرارگیری قطعه‌کار درون دستگاه، نمونه به تدریج و با گام‌های زاویه‌ای مشخصی چرخانده می‌شود تا زاویه  $\psi$  تغییر کند. با مشخص بودن خواص جنس قطعه‌کار و رسم نمودار  $d - \sin^2 \psi$  در زوایای مختلف  $\psi$ ، خط حداقل مربعات از بین نقاط این نمودار عبور داده می‌شود و با تعیین شیب خط حداقل مربعات، تنش‌های پسماند محاسبه می‌شوند.

### ۳-۲ طراحی آزمایش‌ها

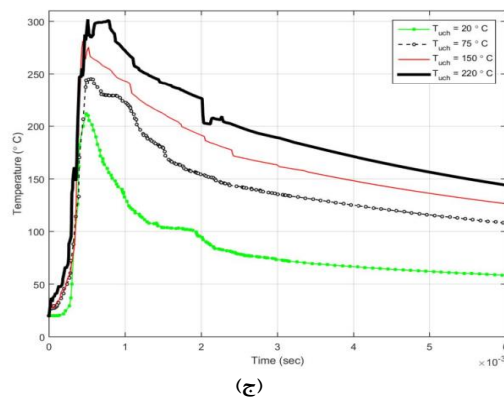
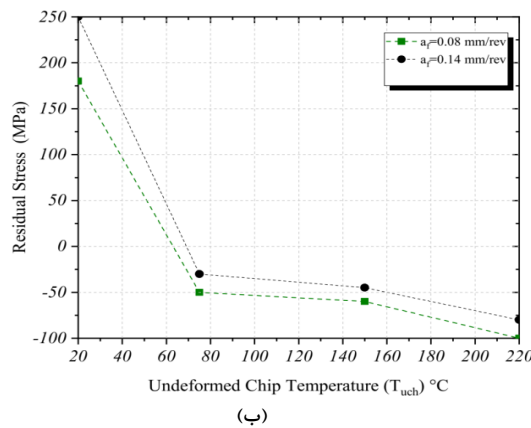
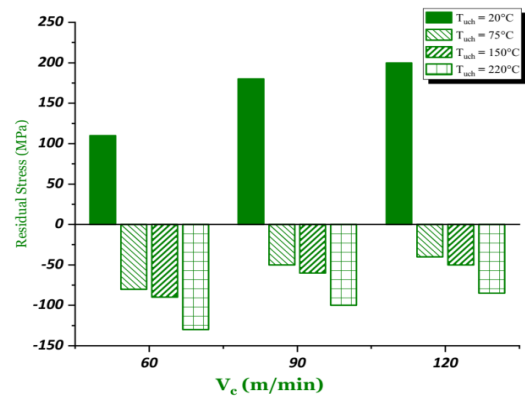
در این کار تحقیقاتی از میلگردهای توپر با قطر ۳۹ میلیمتر از جنس فولاد ۴۱۴۰ استفاده شده است. میلگرد در طول خود با استفاده از شیارهایی به پهنای ۵ میلیمتر، به نمونه‌هایی به طول ۱۰۰ میلی‌متر تقسیم شد. سپس سختی سطح نمونه‌ها با استفاده از عملیات حرارتی به  $48 \pm 1$  راکول سی رسانده شد. خواص مکانیکی این فولاد در جدول (۳) گردآوری شده است. همچنین ابزار مورد استفاده اینسرت روکش‌دار کاربیدی TP۱۵ MF۲-۰۹۰۳۰۸ SNMG و ابزارگیر ۰۹ ۲۰۲۰K PSBNR ساخت شرکت سکوا انتخاب شد که مقاومت به سایب خوب و چقرمگی مناسبی برای پرداخت و خشن‌کاری فولادهای سخت شده دارد.

پارامترهای ورودی شامل سرعت برش، پیشروی و درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته می‌باشد. آزمایش‌ها به صورت کامل و بدون روانکار (ماشینکاری خشک) انجام شدند. سطوح تغییرات پارامترها با در نظر گرفتن قیود تکنولوژیک ماشین‌ابزار، ابزار برش و قطعه‌کار در نظر گرفته شد و محدوده نهایی پس از انجام یک سری آزمون‌های اولیه، در جدول (۴) مشاهده می‌شود. در رابطه با هر نمونه، ابتدا طول ۳۰ میلیمتر اولیه آن تحت ماشینکاری سنتی قرار گرفت و پس از پایدار شدن فرایند برش، حرارت پلاσμα در ماشینکاری طول ۳۰ میلیمتر بعدی هر نمونه اعمال شد. بدین ترتیب، ناحیه متأثر از حرارت در وسط نمونه‌ها قرار گرفته، حداقل ۳۰ میلیمتر از هر طرف با نمونه‌های مجاور فاصله دارد و آنها را متأثر نخواهد کرد.

### ۴- نتایج و بحث

#### ۴-۱- نیروهای برشی

کاهش تنش جریان ماده در اثر افزایش درجه حرارت، نکته



ماشینکاری به کمک پلاسما

ماشینکاری سنتی

شکل ۸. نمایش تأثیر پارامترهای ماشین کاری و درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته بر تنش پسماند: (الف) پیشروی ۰/۸ میلیمتر بر دور، (ب) سرعت برش ۹۰ متر بر دقیقه و (ج) سرعت برش ۹۰ متر بر دقیقه و پیشروی ۰/۸ میلیمتر بر دور.

Fig. 8. The effect of cutting parameters and undeformed chip temperature on residual stress (a)  $a_f = 0.08$  mm/rev, (b)  $V_c = 90$  m/min and (c)  $a_f = 0.08$  mm/rev and  $V_c = 90$  m/min.

حرارت براده تغییر شکل نیافته برابر با ۷۵ درجه سانتیگراد، افزایش پیشروی از ۰/۸ به ۰/۱۴ میلیمتر بر دور، مؤلفه اصلی نیروی برش را در حدود ۷/۰۵ درصد افزایش می‌دهد اما در درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته برابر با ۱۵۰ درجه سانتیگراد، افزایش پیشروی از ۰/۸ به ۰/۱۴ میلیمتر بر دور، افزایش ۵/۳۱ درصدی مؤلفه اصلی نیروی برش را به دنبال دارد. به همین ترتیب در درجه حرارت براده

پیشروی از ۰/۸ به ۰/۱۴ میلی‌متر بر دور، متوسط مؤلفه اصلی نیروی برشی در ماشینکاری سنتی در حدود ۶/۱۸ درصد و در ماشینکاری به کمک حرارت به طور متوسط ۵/۶۰ درصد افزایش می‌یابد. در مقادیر بالای درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته، افزایش پیشروی سبب افزایش قابل ملاحظه در مقدار مؤلفه متوسط نیروی برش نخواهد شد. به عنوان نمونه در شکل (ب-۷) مشاهده می‌شود که در درجه

حرارت براده تغییرشکل نیافته کاهش می‌یابد. این گنبد بودن سرعت خنک‌کاری نقاط واقع بر سطح قطعه به مانند یک عملیات حرارتی تنش‌گیری عمل کرده و باعث می‌شود که تنش‌های پسماند کششی واقع در سطح قطعه به صورت کرنش پلاستیک کششی آزاد شوند و در نتیجه بزرگی تنش‌های پسماند کششی در سطح قطعه را کاهش داده و آنها را فشاری‌تر می‌کند. به عنوان نمونه در پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور و سرعت برش ۹۰ متر بر دقیقه، با افزایش درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته از ۷۵ به ۱۵۰ درجه سانتیگراد، سرعت خنک‌شدن نقاط واقع در سطح قطعه در حدود ۱/۱ برابر کاهش یافته و تنش پسماند، ۲۰/۰۰ درصد فشاری‌تر می‌شود.

در پژوهش حاضر، با افزایش درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته از ۷۵ به ۲۲۰ درجه سانتیگراد، به دلیل کاهش تنش جریان ماده در اثر افزایش درجه حرارت ایجاد شده به واسطه منبع حرارتی متمرکز و همچنین کم‌تربودن سرعت خنک‌کاری قطعه پس از انجام عملیات ماشینکاری، بزرگی تنش‌های پسماند فشاری در سطح قطعه به طور متوسط ۸۵/۳۰ درصد افزایش یافته است، شکل (۸-الف). در مقادیر ثابت درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته، افزایش سرعت برش منجر به کششی‌تر شدن تنش پسماند می‌شود، شکل (۸-الف). دلیل این امر عمدتاً به واسطه آن است که با افزایش سرعت برش بر اساس معادلات (۴) و (۵) افزایش شار حرارتی در نواحی برش را به دنبال دارد. تولید حرارت بیشتر منجر به افزایش تنش‌های پسماند حرارتی شده و از بزرگی تنش‌های پسماند فشاری می‌کاهد. در پژوهش حاضر، با افزایش سرعت برش از ۶۰ به ۱۲۰ متر بر دقیقه، تنش پسماند در ماشینکاری سنتی کششی بوده و ۸۲ درصد افزایش می‌یابد و در ماشینکاری به کمک حرارت که فشاری است به طور متوسط ۴۱/۶۷ درصد از بزرگی آن کاسته می‌شود. در مقادیر بالای درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته، میزان کاهش در بزرگی تنش پسماند با افزایش سرعت برش کاهش پیدا می‌کند. به عنوان نمونه در شکل (۸-الف) مشاهده می‌شود که در درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته برابر با ۷۵ درجه سانتیگراد، افزایش سرعت برش از ۶۰ به ۱۲۰ متر بر دقیقه، بزرگی تنش پسماند را ۵۰/۰۰ درصد کاهش می‌دهد اما در درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته برابر با ۱۵۰ درجه سانتیگراد، افزایش سرعت برش از ۶۰ به ۱۲۰ متر بر دقیقه، بزرگی تنش پسماند را ۴۴/۴۴ درصد کاهش می‌دهد. به همین ترتیب در درجه حرارت

تغییرشکل نیافته برابر با ۲۲۰ درجه سانتیگراد، افزایش پیشروی از ۰/۰۸ به ۰/۱۴ میلی‌متر بر دور، افزایش ۴/۴۴ درصدی مؤلفه اصلی نیروی برش را به دنبال دارد.

#### ۴-۲ تنش‌های پسماند

نتایج حاصله از اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح قطعه ماشینکاری شده با استفاده از فرایند تراشکاری به کمک حرارت نشان می‌دهد که با افزایش دمای براده تغییرشکل نیافته، بزرگی تنش پسماند که کششی است، کاهش یافته و فشاری‌تر می‌شود، شکل (۸-الف). کاهش تنش جریان ماده در اثر افزایش درجه حرارت ایجاد شده به واسطه منبع حرارتی متمرکز و کم‌تربودن سرعت خنک‌کاری قطعه پس از انجام عملیات ماشینکاری نسبت به ماشینکاری سنتی، نکات کلیدی در رابطه با توانایی فرایند تراشکاری به کمک حرارت در فشاری‌تر کردن تنش پسماند در سطح قطعات به حساب می‌آید.

با افزایش درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته به واسطه اعمال منبع حرارتی متمرکز، تنش جریان ماده کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در تنش جریان ماده سبب کاهش تنش‌های فشاری ایجاد شده در ناحیه واقع در جلوی ابزار برشی شده، شکل (۴-ه)، و بزرگی تنش‌های کششی ایجاد شده در نواحی واقع در پشت ابزار را افزایش می‌دهد؛ بدین ترتیب کرنش‌های پلاستیک کششی بزرگ‌تری در سطح قطعه ماشینکاری شده، ایجاد خواهند شد. ایجاد کرنش‌های پلاستیک کششی، بزرگی تنش‌های پسماند کششی را در سطح قطعه کاهش داده و آنها را فشاری‌تر می‌کند. به عنوان نمونه در پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور و سرعت برش ۶۰ متر بر دقیقه، با تغییر درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته از ۲۰ به ۷۵ درجه سانتیگراد، تنش پسماند از ۱۱۰+ به ۸۰- مگاپاسکال تغییر می‌کند. یعنی با افزایش درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته، تنش پسماند از حالت کششی به فشاری تغییر وضعیت داده و بزرگی آن ۲۷/۳۰ درصد، کاهش یافته است.

با افزایش درجه حرارت براده تغییرشکل نیافته، علاوه بر کاهش نیرو، فرایند از یک مزیت دیگر هم برخوردار می‌شود و آن پایین آمدن سرعت خنک‌شدن قطعه‌کار در مقایسه با ماشینکاری سنتی است. همانگونه که در شکل (۸-ج) نشان داده شده، سرعت خنک‌شدن نقاط واقع بر سطح قطعه ماشینکاری شده با افزایش مقدار درجه

براده تغییرشکل نیافته برابر با ۲۲۰ درجه سانتیگراد، افزایش سرعت برش از ۶۰ به ۱۲۰ متر بر دقیقه، بزرگی تنش پسماند را  $34/62$  درصد کاهش می‌دهد.

توانمندی تکنیک تراشکاری به کمک حرارت برای فشاری‌تر کردن تنش پسماند با افزایش درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته تقویت می‌شود. به عنوان نمونه مطابق شکل (۸-الف)، در پیشروی  $0/08$  میلی‌متر بر دور، مقدار فشاری‌تر شدن تنش پسماند در درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته ۲۲۰ درجه سانتیگراد نسبت به درجه حرارت ۷۵ درجه سانتیگراد،  $1/22$  برابر می‌باشد. این امر عمدتاً به واسطه آن است که با افزایش درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته، تنش جریان ماده با افت بیشتری روبرو شده و همچنین پس از اتمام ماشینکاری، نقاط واقع بر سطح قطعه با سرعت آهسته‌تری خنک‌کاری می‌شوند. بنابراین با افزایش دمای براده تغییر شکل نیافته، نیروهای برشی کاهش یافته و تنش‌های پسماند فشاری‌تر می‌شوند ولی باید در نظر داشت که اگر درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته از یک حدی بالاتر رود، باعث خرابی زبری سطح و تغییر در ریزساختار ماده می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود در فرایند پرداختکاری قطعات دقیق از دمای براده تغییر شکل نیافته بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتیگراد استفاده نشود.

در مقادیر ثابت درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته، هم در ماشینکاری سنتی و هم در ماشینکاری به کمک حرارت با افزایش پیشروی، تنش پسماند کششی‌تر می‌شود، شکل (۸-ب). دلیل این امر آن است که افزایش پیشروی بر اساس معادلات (۴) و (۵) افزایش شار حرارتی در نواحی برش را به دنبال دارد. تولید حرارت بیشتر منجر به افزایش تنش‌های پسماند حرارتی شده و از بزرگی تنش‌های پسماند فشاری می‌کاهد. در پژوهش حاضر، با افزایش پیشروی از  $0/08$  به  $0/14$  میلی‌متر بر دور، تنش پسماند در ماشینکاری سنتی که کششی است در حدود  $38/90$  درصد کششی‌تر شده و در ماشینکاری به کمک حرارت به طور متوسط  $28/34$  درصد کششی‌تر می‌شود.

در مقادیر بالای درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته، میزان کششی‌تر شدن تنش پسماند با افزایش پیشروی کاهش پیدا می‌کند. به عنوان نمونه در شکل (۸-ب) مشاهده می‌شود که در درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته برابر با ۷۵ درجه سانتیگراد، افزایش پیشروی از  $0/08$  به  $0/14$  میلی‌متر بر دقیقه، تنش پسماند را در حدود  $40/00$  درصد کششی‌تر می‌کند اما در درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته

برابر با ۱۵۰ درجه سانتیگراد، افزایش پیشروی از  $0/08$  به  $0/14$  میلی‌متر بر دقیقه، تنش پسماند را در حدود  $25/00$  درصد کششی‌تر می‌کند. به همین ترتیب در درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته برابر با ۲۲۰ درجه سانتیگراد، افزایش پیشروی از  $0/08$  به  $0/14$  میلی‌متر بر دقیقه، تنش پسماند را در حدود  $20/00$  درصد کششی‌تر می‌کند.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مطالعه تجربی تنش پسماند در سطح قطعات در فرایند تراشکاری به کمک حرارت مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، مجموعه‌ای از آزمایش‌های تجربی انجام شد تا تأثیر سرعت برش، پیشروی و درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته بر مقدار تنش پسماند در فرایند تراشکاری به کمک حرارت فولاد سخت‌کاری شده ۴۱۴۰ بررسی گردد. نتایج زیر از این تحقیق قابل حصول است:

(الف) با افزایش درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته، تنش پسماند فشاری‌تر می‌شود. در پژوهش حاضر، با افزایش درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته در محدوده ۷۵ تا ۲۲۰ درجه سانتیگراد، به دلیل کاهش تنش جریان ماده در اثر افزایش درجه حرارت ایجاد شده به واسطه منبع حرارتی متمرکز و همچنین کم‌تر بودن سرعت خنک‌کاری قطعه پس از انجام عملیات ماشینکاری، بزرگی تنش‌های پسماند فشاری در سطح قطعه به طور متوسط  $85/30$  درصد افزایش یافته است.

(ب) در مقادیر ثابت درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته، افزایش سرعت برش منجر به کششی‌تر شدن تنش پسماند می‌شود. با افزایش سرعت برش در محدود ۶۰ تا ۱۲۰ متر بر دقیقه، تنش پسماند در ماشینکاری سنتی در حدود ۸۲ درصد و در ماشینکاری به کمک حرارت به طور متوسط  $41/67$  درصد کششی‌تر شده است.

(ج) در مقادیر بالای درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته، میزان کششی‌تر شدن تنش پسماند با افزایش سرعت برش کاهش پیدا می‌کند. در مقادیر درجه حرارت براده تغییر شکل نیافته ۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۰ سانتیگراد، میزان کششی‌تر شدن تنش پسماند با افزایش سرعت برش در محدود ۶۰ تا ۱۲۰ متر بر دقیقه به ترتیب به طور متوسط  $50/00$  و  $44/44$  و  $34/62$  خواهد بود.

(د) توانمندی تکنیک تراشکاری به کمک حرارت برای فشاری‌تر کردن تنش پسماند با افزایش درجه حرارت براده

تغییر شکل نیافته تقویت می‌شود.

### منابع و مراجع

- ture with plasma heating and experimental results, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41 (2001) 877-897.
- [10] S. Sun, M. Brandt, M.S. Dargusch, Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials-A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 50 (2010) 663-680.
- [11] M. Frahnakian, M.R. Razfar, Experimental Study on Hybrid Ultrasonic and Plasma Aided Turning of Hardened Steel AISI 4140, Materials and Manufacturing Processes, 29 (2014) 550-556.
- [12] X. Kong, H. Zhang, L. Yang, G. Chi, Y. Wang, Carbide tool wear mechanisms in laser-assisted machining of metal matrix composites, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 85 (2016) 365-379.
- [13] X. Kong, L. Yang, H. Zhang, G. Chi, Y. Wang, Optimization of surface roughness in laser-assisted machining of metal matrix composites using Taguchi method, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 89 (2016) 529-542.
- [14] M.A. Balbaa, M.N.A. Nasr, H.A. Elgamal, Sensitivity Analysis on the Effect of Laser Power on Residual Stresses when Laser-Assisted Machining AISI 4340, Procedia CIRP, 58 (2017) 31-36.
- [15] Z. Pan, D.S. Shih, H. Garmestani, S.Y. Liang, Residual stress prediction for turning of Ti-6Al-4V considering the microstructure evolution, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part: B Journal of Engineering Manufacturing, 233 (2017) 109-117.
- [16] M. Wan, X.Y. Ye, D.Y. Wen, W.H. Zhang, Modeling of machining-induced residual stresses, Journal of Materials Science, 54 (2018) 1-35.
- [17] E. Mirkoohi, P. Bocchini, S.Y. Liang, Inverse analysis of residual stress in orthogonal cutting, Journal of Manufacturing Processes, 38 (2019) 462-471.
- [18] G.S. Kadam, R.S. Pawade, Machining Induced Residual Stresses in Green Machining of Inconel 718, Techno-Societal, 1 (2020) 573-580.
- [19] F.J. Zerilli, R.W. Armstrong, Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calcu-
- [1] H. Sutanto, J. Madl, Residual Stress Development in Hard Machining: A Review, Material Science and Engineering, 420 (2018) 1-8.
- [2] T. Ozel, D. Ulutan, Prediction of machining induced residual stresses in turning of titanium and nickel based alloys with experiments and finite element simulations, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 61 (2012) 547-550.
- [3] P.J. Arrazola, A. Kortabarria, A. Madariaga, On the machining induced residual stresses in IN718 nickel-based alloy: Experiments and predictions with finite element simulation, Simulation Modelling Practice and Theory, 41 (2014) 87-103.
- [4] F. Jafarian, H. Amirabadi, J. Sadri, H.R. Banooie, H.R., Simultaneous optimizing residual stress and surface roughness in turning of Inconel 718 super alloy, Materials and Manufacturing Processes, 29 (2014) 337-343.
- [5] Z. Hung, S. He, Z. Kejia, X. Zhang, H. Ding, An analysis of cutting parameters, coated materials and nose radii on residual stresses when turning Inconel 718, Procedia CIRP, 46 (2016) 368 - 371.
- [6] X. Ji, S.Y. Liang, Model-Based Sensitivity Analysis of Machining-Induced Residual Stress under Minimum Quantity Lubrication, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part: B Journal of Engineering Manufacturing, 231 (2017) 1528-1541.
- [7] L. Tao, H. Chen, A. Liu, Finite element analysis of the effect of tool edge radius on residual stresses when orthogonal cutting Ti6Al4V, Material and Science and Engineering, 382 (2018) 1-6.
- [8] J.W. Novak, Y.C. Shin, Assessment of Plasma Enhanced Machining for Improved Machinability of Inconel 718, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 119 (1997) 125-129.
- [9] C.E. Leshock, J.N. Kim, Y.C. Shin, Plasma enhanced machining of Inconel 718: modeling of workpiece tempera-

- nology, 75 (2014)1163–1175.
- [21] M.M. Kashani, M.R. Movahhedy, M.T. Ahmadian, R.S. Razavi, In-process Determination of Laser Beam Absorption Coefficient for Laser-Assisted Turning Processes, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92 (2017) 2929-2938.
- lations, Journal of Applied Physics, 61 (1987) 1816-1825.
- [20] M. Khajehzadeh, M. Akhlaghi, M.R. Razfar, Finite Element Simulation and Experimental Investigation of Tool Temperature during Ultrasonically Assisted Turning of Aerospace Aluminum using Multicoated Carbide Inserts, International Journal of Advanced Manufacturing Tech-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Khajehzadeh, M.R. Razfar, Experimental study of machining residual stresses in plasma-assisted turning process, AmirKabir J. Mech Eng., 53(4) (2021) 2385-2406.*

DOI: [10.22060/mej.2020.17565.6619](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17565.6619)

