



مطالعه تجربی و شبیه‌سازی المان محدود توزیع درجه حرارت در ابزار برش در فرایند ماشینکاری به کمک لیزر

سید محمد نیکوئی، محمدرضا رازفر، محسن خواجه‌زاده*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴

کلمات کلیدی:

ماشینکاری به کمک لیزر
درجه حرارت برش
المان محدود
لیزر پیوسته

خلاصه: پژوهش حاضر به بررسی تجربی و شبیه‌سازی المان محدود توزیع درجه حرارت ابزار برش در فرایند ماشینکاری به کمک لیزر اختصاص یافته است. رویه در نظر گرفته شده مشتمل بر ایجاد یک مدل المان محدود و صحنه‌گذاری نتایج آن با آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری نیرو و درجه حرارت برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ است. در این ارتباط، در مرحله نخست شبیه‌سازی فرایند تراشکاری به کمک لیزر مورد مطالعه قرار گرفت. سپس طراحی و ساخت تجهیزات لازم برای انجام فرایند تراشکاری به کمک لیزر انجام شد و در نهایت مجموعه‌ای از آزمایش‌های تجربی با هدف اندازه‌گیری نیرو و درجه حرارت صورت گرفت و محدوده‌ای مناسب برای پارامترها، استخراج گردید. در ادامه از نتایج بدست آمده به منظور صحنه‌گذاری نتایج شبیه‌سازی استفاده شد. تأثیر توان لیزر، سرعت برش و پیشروی بر توزیع درجه حرارت در ابزار برش مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مدل المان محدود با نتایج تجربی صحنه‌سنجی شد. بر اساس نتایج حاصل، استفاده از لیزر پیوسته در محدوده‌ای که منجر به تغییر ساختار کریستالی نشود، ضمن کاهش ۲۵ درصدی در مولفه‌ی نیروی اصلی برش، کاهش دمای ابزار برشی را به دنبال داشت. متوسط درجه‌ی حرارت ابزار در تراشکاری به کمک لیزر در حدود ۸۰ درصد مقادیر نظیر در تراشکاری سنتی است.

۱- مقدمه

عمل برش فلزات حاصل حرکت نسبی بین ابزار برش و قطعه‌کار است که در نتیجه‌ی آن مقداری از فلز، به عمق برش و به شکل براده از قطعه‌کار جدا می‌شود. در ماشینکاری، حرارت زیادی در سطح مشترک ابزار و براده ایجاد می‌شود. تغییر شکل در ناحیه‌ی بسیار کوچکی اتفاق افتاده و حرارت تولید شده، هم ابزار و هم قطعه‌کار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش دما می‌تواند روی فرسایش و عمر ابزار، سلامت سطحی و دقت ابعادی قطعه‌کار اثرگذار باشد. از طرف دیگر اندازه‌گیری و پیش‌بینی دما به خاطر نازک بودن صفحه‌ی برش، مانع شدن براده و ماهیت شرایط تماسی آن (که در آن دو جسم با هم در تماس بوده و یکی از آن‌ها متحرک است)، بسیار سخت و پیچیده است.

در حال حاضر پیش‌بینی درجه حرارت فرایندهای ماشینکاری، به خاطر تأثیری که بر فرسایش ابزار و محدودیت‌های بهره‌وری سامانه ماشینکاری دارد، به موضوعی با اهمیت تبدیل شده است. به‌عنوان نمونه نرخ فرسایش

ابزار به‌شدت به درجه‌ی حرارت سطح تماس براده و ابزار بستگی دارد از این‌رو درجه حرارت، پس از چتر، یکی از ملاحظات اساسی بوده و احتمالاً مهم‌ترین محدودیت در انتخاب پارامترهای ماشینکاری نظیر سرعت برش و پیشروی در ماشینکاری بعضی از مواد از قبیل تیتانیوم و آلیاژهای پایه نیکل از قبیل اینکونل ۷۱۸ به حساب می‌آید. در این مواد به خاطر هدایت حرارتی کم، قسمت عمده‌ای از حرارت تولید شده در حین فرایند ماشینکاری به ابزار برشی جریان یافته و بنابراین علاوه بر تنش‌های مکانیکی، ابزارهای برشی متحمل تنش‌های حرارتی قابل‌توجهی نیز خواهند شد [۱].

تنش‌های حرارتی سبب تسریع در خستگی و فرسایش ابزار می‌شوند. علاوه بر آن، چنانچه درجه حرارت ابزار از یک حد معین بیش‌تر شود، ابزار به خاطر فقدان نیروی اتصال کافی بین بلوره‌های ساختار آن، به‌سرعت دچار فرسایش می‌شود [۲].

در کاربردهای مرسوم مواد صنعتی، افزایش دمای قطعه‌کار سبب کاهش تنش تسلیم شده لذا، ماشینکاری به کمک منبع حرارتی یکی از راهکارهای ماشینکاری مواد سخت است. در این روش پس از این که قطعه‌کار به کمک

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mo.khajezadeh@aut.ac.ir



عددی و تجربی به بررسی اثر استفاده از لیزر در تراشکاری قطعه کار سرامیکی مولیتی^۳ پرداختند، آن‌ها به دنبال این بودند اثر لیزر را با استفاده از شبیه‌سازی عددی در آزمون‌های تجربی به نحوی پیاده کنند که هیچگونه ترکی در ماشینکاری قطعه کار مولیتی رخ ندهد و در نهایت با توسعه مدل عددی و اعمال بازه‌ی پارامترهای آن در آزمون‌های تجربی، محدوده توان لیزر پیوسته بین ۱۷۰ تا ۱۹۰ وات، شرایطی را برای آزمون آنها ایجاد کرد که علاوه بر تأمین عدم آسیب به قطعه کار، ماشینکاری بدون ترک قطعه کار با کم‌ترین میزان سایش ابزار محقق شد.

سامانتا و همکاران^۴ [۷] در پژوهشی به بررسی تجربی و المان محدود تنش پسماند در فرآیند میکرو ماشینکاری به کمک لیزر بر روی اینکونل ۶۲۵ پرداختند. آن‌ها در این مطالعه، ضمن ارائه‌ی روشی جدید در نرم‌افزار دی‌فرم سه‌بعدی، اثر حرارتی لیزر بر روی قطعه کار را مدل‌سازی المان محدود کردند. در این پژوهش استفاده از لیزر ضمن کاهش ۲۵ درصدی نیروی برشی، تنش پسماند فشاری حاکم بر سطح قطعه کار را به میزان ۵۰ درصد نسبت به حالت سنتی را موجب شده بود.

کاشانی و همکاران^۵ [۸] به منظور حصول مدلی تمام تحلیلی قطعه‌ی کار متأثر از لیزر در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر به نحوی که بتوان رفتار حرارتی لایه‌های زیرین سطح قطعه کار را نیز دنبال کرد، پژوهشی را انجام داده و نهایتاً با بررسی اثر پارامترهای برشی و پارامترهای لیزر از قبیل هندسه‌ی نوک کلگی لیزر و ضریب جذب آن، تطابق مطالعات تحلیلی خود با نتایج تجربی را مورد بررسی قرار دادند. با مدل توسعه یافته در این پژوهش می‌توان دمای نقاط روی سطح قطعه‌ی کار و نقاط داخلی قطعه کار متأثر از تشعشع تفنگ لیزر را به دست آورد. در این مطالعه با بهره‌گیری از مدل المان محدود مناسب، نتایج شبیه‌سازی المان محدود و آزمون‌های تجربی به صورت میانگین تطابق ۹۰ درصدی داشته‌اند.

کسلوریس و همکاران^۶ [۹] در مطالعه‌ای مبتنی بر مدل‌سازی المان محدود، به بررسی اثر پارامتر توان لیزر بر روی نیروی برش در فرآیند تراشکاری قطعه فولادی ایچ ۱۳ پرداخته‌اند. نهایتاً پژوهش آنها گویای این مورد است که با به کارگیری لیزر پیوسته، حداکثر کاهش ۱۵ درصدی در نیروی برش رخ خواهد داد و از این طریق شرایط ماشینکاری قطعه‌ی فولادی ایچ ۱۳ بهبود پیدا می‌کند.

منبع حرارتی گرم می‌شود، بالطبع با نرم شدن قطعه کار، تنش تسلیم ماده و سختی آن کاهش می‌یابد و منجر به برش راحت‌تر ماده و کاهش نیروهای ماشینکاری و بهبود شرایط ماشینکاری خواهد شد [۳].

یکی از راهکارهای ماشینکاری قطعات سخت، استفاده از حرارت در فرآیند ماشینکاری است. لیزر و پلاسما به‌عنوان منبع حرارتی برای ماشینکاری به کمک حرارت به کار می‌روند. لیزر ویژگی‌های مناسب‌تری نظیر تمرکز انرژی بالا برای نقطه‌ای به قطر کم‌تر از سه میلی‌متر و کنترل‌پذیری قابل توجه دارد [۴].

رُزی و همکاران^۱ [۵] برای اولین بار ضمن ارائه‌ی مدلی سه‌بعدی عددی برای تراشکاری به کمک لیزر توانستند اثر حرارتی لیزر بر روی قطعه کار را به صورت عددی و تجربی رفتارشناسی نمایند و اثر پارامترهایی نظیر توان لیزر، گپ بین کلگی لیزر و قطعه کار و سرعت انتقالی بین لیزر و قطعه کار و عمق برشی بر روی میدان حرارتی ایجادشده بر روی قطعه کار را به صورت گذرا و متغیر با زمان بررسی نمایند و میزان اثرگذاری هریک از این پارامترها بر روی میدان دمایی قطعه کار را به صورت مجزا بررسی کنند. آن‌ها در این پژوهش دریافتند که ماکزیمم دمای قطعه کار متأثر از اشعه‌ی لیزر در محل اندازه‌گیری با افزایش سرعت دورانی قطعه کار به دلیل افزایش امکان انتقال حرارت همرفت افزایش می‌یابد. میزان جذب انرژی براده تغییر شکل نیافته با کاهش توان لیزر کاهش می‌یابد و از سوی دیگر کاهش فاصله گپ بین لیزر و قطعه کار یا افزایش سرعت انتقالی بین قطعه کار و کلگی لیزر منجر به کاهش دمای براده‌ی تغییرشکل نیافته می‌شود. شار حرارتی ماکزیمم لیزر و به دنبال آن دمای سطح قطعه کار با افزایش شعاع اشعه‌ی لیزر، کاهش می‌یابد. افزایش عمق برش اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی توزیع دمایی محل درگیری ابزار و قطعه کار در این فرآیند نداشته است.

به دلیل تنظیم نادرست پارامترهای ابزار و ماشینکاری، معمولاً اتلاف هزینه سبب عدم بهینه بودن فرآیند ماشینکاری می‌شود. حال با ورود منبع حرارتی متمرکز، انتخاب نامناسب پارامترهای تأثیرگذار بر منبع حرارتی، علاوه بر اتلاف هزینه، احتمالاً منجر به بروز آسیب در ساختارهای بلوره‌ای خواهد شد و اساس فرآیند را به زیر سؤال می‌برد. برای تنظیم تجربی پارامترهای منبع حرارتی متمرکز معمولاً مجموعه‌ای از فرایندهای سعی و خطا برای رسیدن به مقادیر مطلوب پارامترهایی از قبیل توان لیزر، شعاع مناسب محل اثر منبع حرارتی و محل قرارگیری آن به منظور رسیدن به نقطه‌ی نرم شدگی مطلوب ماده‌ی مورد استفاده مورد نیاز است. ربرا و همکاران^۲ [۶] در پژوهشی

3 Mullite
4 Samanta et al.
5 Kashani et al.
6 Kaselouris et al.

1 Rozzi et al.
2 Rebro et al.

به کمک لیزر روی سرامیک سیلیس ریخته‌گری شده^۳ را با انجام تحلیل عددی و بصورت تجربی بررسی کرده‌اند. یک تحلیل انتقال حرارت گذرای سه بعدی ناشی از گرمایش لیزر با استفاده از روش المان محدود انجام گرفته و توزیع دما در قطعات استوانه‌ای بدست آمده و در نرم‌افزار آباکوس شبیه سازی شده است. همپوشانی پالس، یک پارامتر مهم بوده که خواص سطحی که پالس‌های لیزر به آن برخورد می‌کند را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، تأثیر همپوشانی پرتوی لیزر در توزیع دما و جذب‌پذیری قطعه‌ی کار سیلیس ریخته‌گری شده بررسی شده که این بررسی و فرمول‌بندی آن برای نخستین بار انجام گرفته است. در این پژوهش بهترین شرایط عملیاتی برای تراشکاری به کمک لیزر زمانی حاصل می‌شود که نرخ پارامترهای همپوشانی و توان لیزر بالاترین حد خود را داشته باشند. نتایج حاصل از مدل تحلیلی گرمایش لیزر تحت شرایط مختلف، با تست‌های آزمایشی مقایسه شده‌اند. مدل انتقال حرارتی که از تحلیل‌های عددی بدست آمد و از طریق آزمایش‌ها با تطابق بیش از ۹۰ درصد تأیید شده، ابزاری برای بررسی تأثیر پارامترهای لیزر و شرایط برش در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر را در اختیار قرار می‌دهد تا بتوان پارامترهای این فرآیند را بهینه کرد.

ماشین کاری سیلیس گرما دیده بصورت مرسوم و در دمای عادی، بخاطر سختی و شکنندگی آن مشکل است. سونگ و همکاران^۴ [۱۳] در پژوهشی، دقت و بهبود قابلیت ماشین کاری سیلیس گرما دیده با گرمایش ناشی از پرتوی لیزر را نسبت به ماشین کاری معمولی بصورت تجربی نشان داده و ارزیابی کردند. با انجام تست‌ها مشخص گردید که در شرایط یکسان، سایش متوسط ابزار در ماشین کاری لیزری حدود ۳۸/۷۹ درصد نسبت به ماشین کاری معمولی بهبود یافته است. نیروی برش در ابزار برش نیز ۶/۲ تا ۵۳/۶۱ درصد کاهش یافته است. همچنین، بخاطر سایش کمتر و در نتیجه نوسان پایین‌تر در برش، زبری سطح ماشین شده تا حداکثر ۶۵/۸۶ درصد کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهند که نسبت دوره‌ی پالس لیزر، فاکتور اصلی برای دستیابی به حداقل زبری است. درصد مشارکت فاکتورهای نسبت دوره‌ی پالس، سرعت برش، پیشروی و عمق برش برای رسیدن به حداقل زبری به ترتیب ۳۴/۴۴، ۲۸/۸۹، ۲۴/۴۴ و ۱۲/۲۲ درصد است. همچنین مقادیر بهینه این فاکتورها برای انجام ماشین کاری لیزری به صورت نسبت دوره‌ی پالس ۵۰ درصد، سرعت دورانی ۵۴۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۰/۱۵ میلی‌متر بر دور و عمق برش ۸ میکرومتر گزارش شده است.

همانگونه که اشاره شد، عمر ابزار به عنوان یک عامل بسیار مهم

کاشانی و همکاران [۱۰] در پژوهشی تجربی دیگر به منظور تخمین دقیق ضریب جذب سطحی اشعه‌ی لیزر بر روی قطعه‌کار فولاد ۳۰۴ در حال تراشکاری، فرآیند ماشینکاری به کمک لیزر را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش مشخص شده است که پارامترهای ماشینکاری یعنی پیشروی و سرعت برشی بر روی ضریب جذب اثرگذار هستند. بنابراین در هنگام گزارش ضریب جذب باید اطلاعات سینماتیک فرآیند و همچنین اطلاعات مربوط به مواد، وضعیت سطح، طول موج لیزر و زاویه‌ی تابش نیز بیان شوند. کاربرد این پژوهش زمانی اهمیت می‌یابد که برای مطالعه‌ی حرارتی رفتار قطعه‌کار متأثر از اشعه‌ی لیزر، اثر انتقال حرارتی تشعشعی نیز مورد تأکید قرار می‌گیرد. داشتن درک روشنی از رفتار حرارتی قطعه‌ی کاری که تحت تابش لیزر قرار گرفته برای توسعه‌ی اصول سیستماتیک تعیین سطوح لازم پیش گرمایش حائز اهمیت است و متغیرهای برش در ماشین کاری به کمک لیزر را بهینه می‌کند. برای دستیابی به این هدف، بخاطر محدودیت‌های ابزاری و روش‌های اندازه‌گیری غیرتهاجمی، روش‌های آزمایشی عمدتاً غیر عملی هستند. در مقابل، روش‌های عددی گزینه‌های تحلیلی دقیق، منعطف و مقرون به صرفه‌ای هستند که می‌توانند درک خوبی نسبت به اثر حرارتی گذرای پیش گرمایش لیزر در قطعه‌ی چرخان را دهد. برای همین منظور، ندیم و همکاران^۱ [۱۱] به شبیه‌سازی و بررسی تحلیلی پیش گرمایش و رفتار حرارتی یک قطعه‌ی استوانه‌ای چرخان در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر پرداخته‌اند. به منظور پوشش محدودیت‌های تحلیلی قبلی، مدل این پژوهش فرآیندهای حرارتی پیچیده مرتبط به جذب گرما در ناحیه برخورد لیزر، توزیع حرارتی در قطعه‌ی کار و خنک شدن سطح استوانه بخاطر چرخش را نیز در نظر گرفته شده است. در این پژوهش یک شبیه‌سازی عددی مبتنی بر حجم محدود انجام شده که رفتار حرارتی ناشی از پیش گرمایش لیزر در سطح یک استوانه‌ی چرخان را بررسی و تحلیل می‌کند. این مدل از نظر دقت بالای پیش‌بینی اعتبار سنجی شده و می‌تواند در شرایط عملیاتی مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان یک نتیجه‌ی مهم، این مدل شبیه‌سازی داده‌هایی را برای تعیین قدرت و سرعت انتشار لیزر، سرعت دوران قطعه‌کار و مواد ماشین کاری جهت دستیابی به توزیع حرارتی مناسب، در اختیار قرار می‌دهد. با انجام تحلیل‌های پارامتری کامل و داده‌های حاصله، یک پیش‌بینی کننده‌ی پارامتری پیش گرمایش در این فرآیند به دست آمد.

روستایی و همکاران^۲ [۱۲] تأثیر گرمایش لیزر در فرآیند تراشکاری

3 SCFC

4 Song et al.

1 Nadim et al.

2 Roostai et al.

به دلیل اینکه در شبیه‌سازی دو بعدی المان محدود قطاعی کوچک از محیط قطعه‌کار استوانه‌ای مورد مطالعه می‌گیرد و هم‌چنین اشعه‌ی لیزر به صورت متمرکز به قطعه‌کار تابانده می‌شود، می‌توان فرض کرد در اثر ورود شار حرارتی لیزر به قطعه‌کار، سطح بالایی قطعه‌کار متأثر از یک دمای ثابت به صورت پیشگرم است، لذا با توجه به فرمولاسیون ریاضی معرفی شده در پژوهش کاشانی و همکاران [۸]، جهت تعیین دمای نقاط مختلف قطعه‌کار در حال تراشکاری در معرض اشعه‌ی لیزر، متناسب با هم نشینی پارامترهای توان لیزر، سرعت برشی و نرخ پیشروی، دمای سطح براده‌ی تغییر شکل نیافته محاسبه می‌شود و به عنوان شرایط مرزی حاکم بر سطح قطعه‌کار در مدل المان محدود مطابق با شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود.

به منظور صحت‌گذاری مدل المان محدود ارائه شده، دمای ابزار در حالت تجربی و شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. برای این منظور نقطه‌ای مشخص به مختصات (۴/۳، ۰/۹۷) بر روی سطح برادر در نظر گرفته می‌شود و ترموکوپل در نقطه مذکور جانمایی می‌شود و تاریخچه‌ی زمانی درجه حرارت در این نقطه با استفاده از روش تجربی و المان محدود با یکدیگر مقایسه می‌شود.

در شبیه‌سازی برش فلزات، مدل اصطکاک ثابت کولمب، ضریب اصطکاک را در کل منطقه‌ی تماس براده و ابزار ثابت فرض می‌کند. مدل کولمب عمدتاً در شرایطی استفاده می‌شود که در آن مقدار نیروی عمودی کوچک بوده و لذا به واسطه‌ی مقادیر کوچک تنش، ماده تسلیم نخواهد شد. بنابراین این مدل به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\tau = \mu \sigma_n \quad (1)$$

که در آن τ تنش اصطکاکی، σ_n تنش نرمال μ ضریب اصطکاک است. در ماشینکاری در پیشروی‌ها و سرعت‌های برشی پایین، ضریب اصطکاک متأثر از پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی خواهد بود.

با توجه به اینکه ابزار و تأثیر ماشینکاری بر روی میدان دمایی حاکم بر آن، حائز اهمیت است، در این شبیه‌سازی ابزار تنگستن کار باید به صورت صلب مدل‌سازی شده است. خواص فیزیکی تنگستن کاربرد تاکنون موضوع مطالعه‌ی پژوهش‌های مختلفی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، این خواص از نتایج مرجع [۱۴] استخراج شده و در جدول ۱ گردآوری شده است. ماده مورد مطالعه در این پژوهش سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ است. رفتار الاستو-پلاستیک قطعه‌کار از مدل جانسون-کوک تبعیت می‌کند خواص

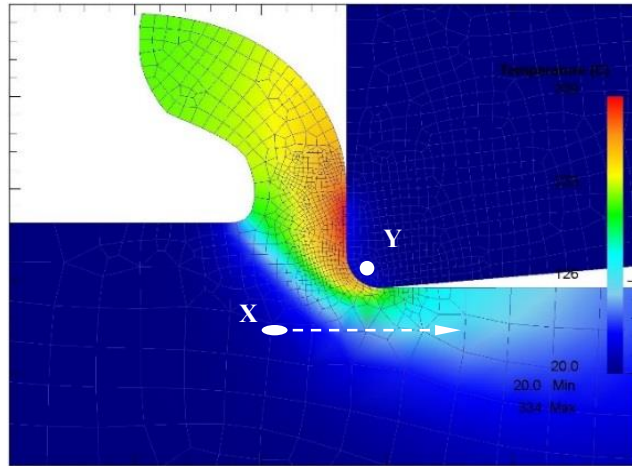
در بهره‌وری فرآیند ماشینکاری همواره مورد توجه بوده، لذا تعقیب رفتار پارامترهای اثرگذار بر روی این متغیر بسیار حائز اهمیت بوده و یکی از این پارامترهای مهم تأثیرگذار بر عمر ابزار که نقش تعیین‌کننده دارد، دمای ابزار است. این متغیر به صورت خاص خود را در ماشینکاری مواد سخت نشان خواهد داد. بنابر پژوهش‌های مورد مطالعه فوق، جنبه‌های مکانیکی فرآیند تراشکاری به کمک لیزر پیوسته و هم‌چنین جنبه‌های حرارتی حاکم بر قطعه‌کار در پژوهش‌های مختلف به صورت نظری، عددی و تجربی صورت گرفته است اما مطالعه‌ی نظری و تجربی بر روی دمای ابزار در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر پیوسته کمتر انجام شده، لذا با تأکید بر این وجه از فرآیند مذکور، جوانب مختلف دمای حاکم بر ابزار در فرآیند تراشکاری به کمک منبع حرارتی، در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- شبیه‌سازی المان محدود فرآیند تراشکاری به کمک لیزر

در این پژوهش، یک مدل حرارتی- مکانیکی کوپل شده با استفاده از نرم افزار دیفرم^۱ برای آنالیز فرآیند تراشکاری به کمک لیزر توسعه داده شده است، شکل ۱.

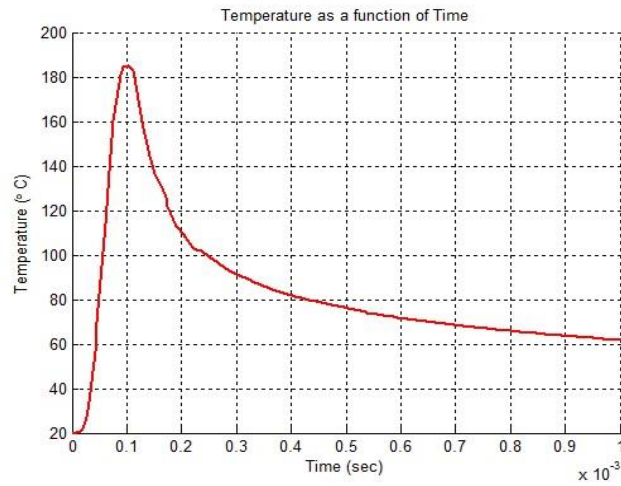
در شکل ۱ (ب)، درجه حرارت در نقطه X از ماده در حین فرآیند برش متعامد، به عنوان تابعی از زمان رسم شده است. نقطه X در حرکت خود به سمت ابزار، به منطقه تغییر شکل اولیه می‌رسد و از طریق هدایت گرما از ناحیه تغییر شکل اولیه گرم می‌شود تا مطابق شکل ۱ (ب)، درجه حرارت آن شروع به افزایش کند. سپس نقطه X در قطعه‌کار 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 سطح آزاد ابزار و براده دور می‌شود و درجه حرارت آن تا رسیدن به درجه حرارت محیط کاهش می‌یابد.

در شکل ۱ (ج)، درجه حرارت در نقطه‌ای از ابزار برش، واقع بر سطح براده، به عنوان تابعی از زمان رسم شده است. حرارت تولید شده در سطح مشترک ابزار- براده از نقطه نظر عمر ابزار (گودال فرسایش) اهمیت زیادی داشته و در بسیاری از مراجع، با مدل اصطکاکی توصیف می‌شود. در نتیجه با فرض پایدار بودن فرآیند برش، منبع حرارتی اصطکاکی در سطح تماس براده و ابزار، با گذر زمان به یک انتقال حرارت حالت پایدار میل می‌کند و مجانب منحنی درجه حرارت زمان، معیاری از درجه حرارت در نقطه مورد مطالعه است.



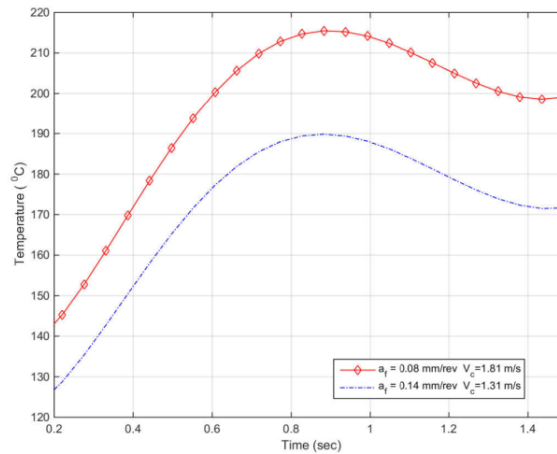
(الف) مدل المان محدود

(a) Finite Element Model



(ب) تغییرات زمانی درجه حرارت در نقطه X از قطعه کار

(b) Time history plot of workpiece temperature at point X

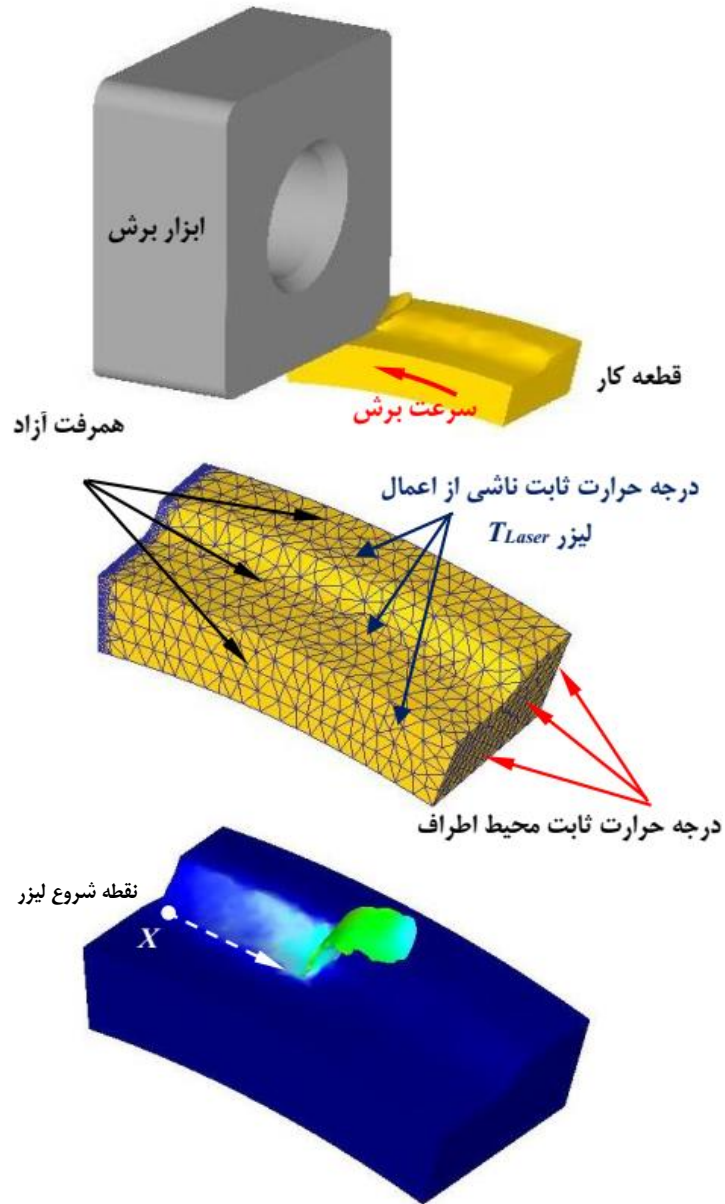


(ج) تغییرات زمانی درجه حرارت در نقطه Y از ابزار

(c) Time history plot of tool temperature at point Y

شکل ۱. مدل المان محدود تراش متعامد.

Fig. 1. Finite Element Model of Orthogonal Cutting.



شکل ۲. نحوه اعمال شرایط مرزی و نحوه اعمال اثر منبع حرارتی بر قطعه در مدل المان محدود.

Fig. 2. Applying boundary conditions and heat source in finite element model.

جدول ۱. خواص فیزیکی تنگستن کارباید [۱۴].

Table 1. Physical Properties of WC [14].

جرم حجمی	ضریب پوآسن	مدول الاستیک
kg/m^3		GPa
۱۴۵۰۰	۰/۲۲	۵۸۰
گرمانی ویژه	هدایت حرارتی	انبساط حرارتی
$\text{N/mm}^2\text{ }^\circ\text{C}$	$\text{W/m}^\circ\text{C}$	$\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
۲۲۰	۳۰	۵/۴

جدول ۲. خواص فیزیکی قطعه کار [۱۵].

Table 2. Physical Properties of workpiece [15].

جرم حجمی	استحکام کششی	مدول الاستیک
kg/m^3	MPa	GPa
۸۲۲۰	۶۵۵	۱۷۷
ضریب پوآسن	دمای ذوب	ظرفیت گرمایی ویژه
۰/۲۷۳	۱۵۹۳ K	۵۲۰ J/kgK

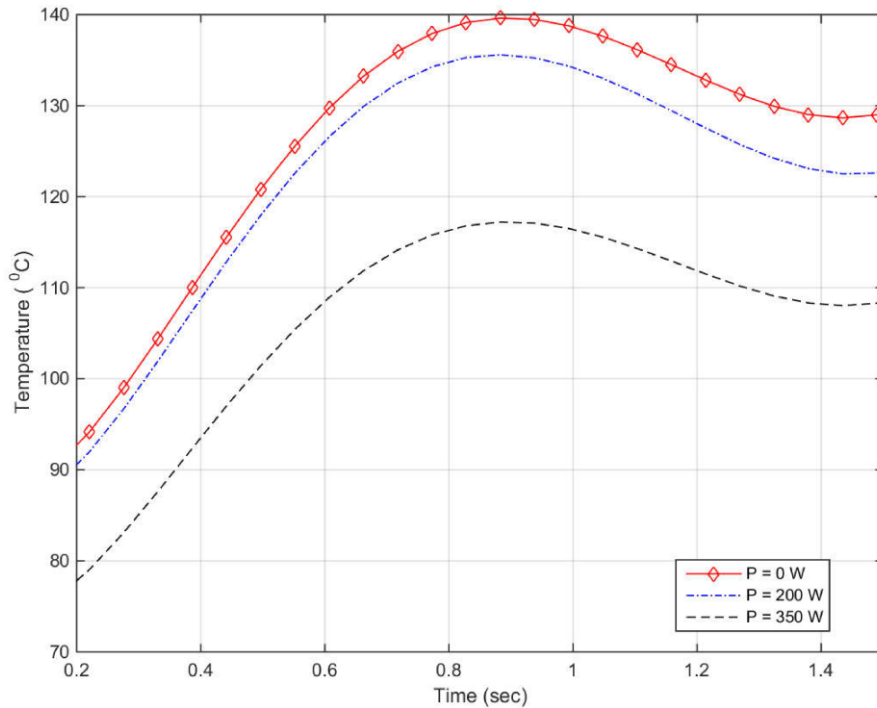
جدول ۳. مقادیر ثوابت جانسون کوک برای قطعه کار [۱۵].

Table 3. Johnson Cook Constants of Workpiece [15].

T_m ($^\circ\text{C}$)	n	m	C	B (MPa)	A (MPa)
۱۵۹۳	۰/۵۱۸۹	۱/۲۸۶۱	۰/۰۰۸۵	۶۹۹	۱۱۰۸

نظر گرفته می‌شود و شرایط مرزی انتهای ابزار با دمای ثابت در نظر گرفته می‌شود. همچنین انتقال حرارت همرفت آزاد با محیط برای سطح قطعه کار و سطح گذرا در قطعه کار در نظر گرفته می‌شود. دمای انتهای قطعه کار متصل به اسپیندل نیز برابر با محیط اطراف تعریف می‌شود. انتهای قطعه کار از نظر سینماتیکی ثابت در نظر گرفته می‌شود و حرکت نسبی ابزار و قطعه کار در شبیه‌سازی المان محدود، به ابزار نسبت داده می‌شود. نکته‌ی قابل توجه در شبیه‌سازی حرارتی المان محدود فرآیند این است که اثر انتقال حرارت تشعشعی از قطعه کار در نظر گرفته نمی‌شود. از سوی دیگر انتقال حرارت همرفت بین گاز محافظ استفاده شده در کلگی لیزر با قطعه کار در شبیه‌سازی

فیزیکی جنس قطعه کار از پژوهش جانسون و کوک [۱۵] استخراج شده است که در جدول‌های ۲ و ۳ مقادیر آنها گزارش شده است. پارامترهای A ، B ، C ، m و n ثابت‌های ماده بوده که با توجه به جنس قطعه کار تعیین می‌شوند. همچنین درجه حرارت T_m نقطه ذوب قطعه می‌باشد. شرایط مرزی حاکم بر مسئله، نقش قابل توجهی در مطالعه‌ی درجه حرارت ابزار در شبیه‌سازی المان محدود فرآیند تراشکاری به کمک لیزر را دارد؛ لذا صورت‌بندی صحیح شرایط مرزی حاکم بر شبیه‌سازی در رسیدن به فیزیک واقعی فرآیند حائز اهمیت است همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، انتقال حرارت همرفت لبه برش اصلی و سطح آزاد ابزار با محیط در



شکل ۳. مقایسه نتایج المان محدود درجه حرارت ابزار در نقطه‌ای به مختصات $(4/3, 0/97)$ در دو حالت تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر با مشخصات توان لیزر ۲۰۰ وات، سرعت برشی $1/31$ متر بر ثانیه و پیشروی $0/08$ میلی‌متر بر دور.

Fig. 3. Comparison of cutting tool temperature profile extracted from finite element model for point (4.3,0.97) in conventional turning and laser assisted turning (Power 200 and 300W) ($V_c=1.31$ m/s and $a_f=0.08$ mm/rev).

شبیه‌سازی‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. نهایتاً مش با اندازه‌ی نسبی $0/0056$ در ناحیه‌ی درگیری ابزار و قطعه کار، متناسب با 65% تراکم در سطح واحد درگیری انتخاب شده است.

۳- روش مطالعه تجربی

۳-۱- تجهیزات تراشکاری به کمک لیزر

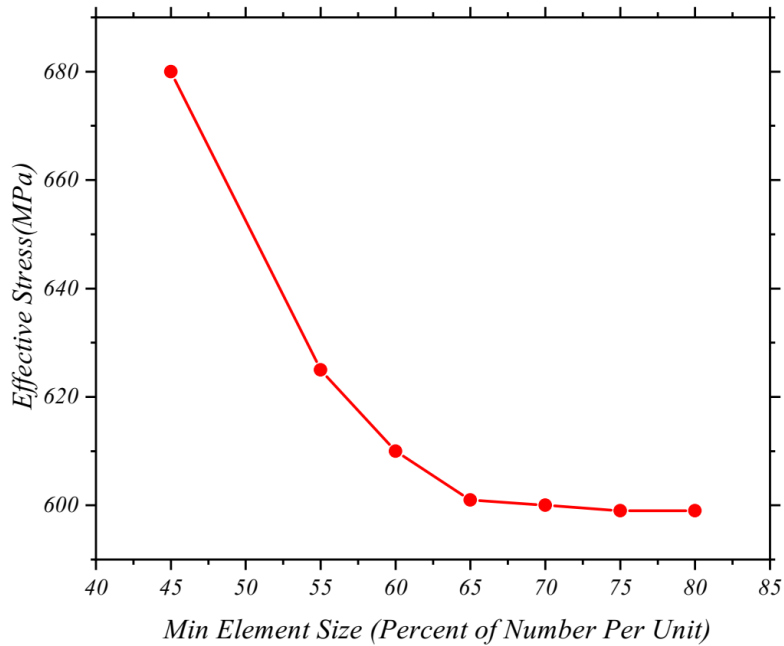
برای انجام آزمایش‌های تجربی از دستگاه تراش و منبع لیزر موجود در آزمایشگاه تحقیقات ماشینکاری دانشگاه صنعتی شریف استفاده شده است. توان موتور الکتریکی این دستگاه $5/5$ کیلووات و حداکثر دور اسپیندل آن برابر با 2000 دور بر دقیقه است. سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به‌عنوان قطعه کار در این پژوهش انتخاب شده است. این سوپر آلیاژ با توجه به کاربرد در صنایع توربین‌سازی و حتی صنایع هوافضا، یکی از مواد با استحکام بالا است. با توجه به آزمایش‌های مقدماتی صورت گرفته، ابزارهای اینسرتی از جنس تنگستن کاربید انتخاب شدند. ابزار با گرید $SCMT120412-F1$ از شرکت سکو تهیه شد.

به‌منظور حرارت دادن قطعه کار از دستگاه لیزر 600 وات پیوسته از نوع

مورد مطالعه قرار نگرفته است که این موارد خود از منابع بروز خطا در شبیه‌سازی المان محدود خواهند بود.

دمای ابزار به صورت استخراج دمای مختصات نقطه‌ای از ابزار که متناظر با محل قرارگیری نوک ترموکوپل در آزمایش‌های تجربی است، انجام می‌گیرد، بنابراین می‌توان رفتار دمایی هر نقطه‌ی دلخواه از ابزار را به صورت تابعی از زمان دنبال کرد. در شکل ۳ نمودار دمای نقطه‌ای از ابزار به مختصات $(4/3, 0/97)$ برحسب زمان، در دو حالت تراشکاری سنتی و تراشکاری به لیزر با توان 200 وات و پارامترهای برشی، سرعت برشی $1/31$ متر بر ثانیه و پیشروی $0/08$ میلی‌متر بر دور نشان داده شده است.

برای مش‌بندی صحیح قطعه کار، تأثیر اندازه‌ی المان‌ها بر دقت شبیه‌سازی بررسی می‌شود. برای این منظور، به ازای پارامترهای حرارتی و برش ثابت تعدادی شبیه‌سازی المان محدود با اندازه‌ی المان مختلف انجام شد و تنش مؤثر نقطه‌ی معینی از قطعه کار در زمان ثابت (نقطه‌ای به مختصات $(3/55, 0/98)$ در زمان $0/001$ ثانیه از شروع شبیه‌سازی) در شبیه‌سازی‌ها استخراج می‌شود. نتایج بررسی تأثیر اندازه‌ی المان‌ها بر دقت



شکل ۴. تأثیر اندازه‌ی المان‌ها بر دقت شبیه‌سازی المان محدود.

Fig. 4. The effect of element size on the accuracy of finite element model.

جدول ۴. مشخصات فنی ترموکوپل اندازه‌گیری دما.

Table 4. Technical characteristics of thermocouples used in temperature measurement.

مشخصه	محدوده
محدوده اندازه‌گیری درجه حرارت	۲۰۰- الی ۱۳۷۰ درجه سانتیگراد
دقت	±۰/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد
رزولوشن	±۰/۱ درجه‌ی سانتی‌گراد
پاسخ زمانی	یک ثانیه
نوع ترموکوپل	k-type(NiCr_Ni)

فایبر ساخت شرکت مرکز علوم و فنون ملی لیزر استفاده شده است.

برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های نیرویی، از دستگاه دینامومتر ساخت کیستلر به مدل ۹۱۲۱ استفاده شده است. آمپلی‌فایر ۵۰۷۰ کیستلر به همراه کارت داده‌برداری A۵۶۹۷ کیستلر در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. سیگنال حاصل از اندازه‌گیری به یک ولتاژ الکتریکی تبدیل می‌شود. اندازه این ولتاژ دقیقاً متناسب با نیروی وارده به قطعه کار است. سیگنال آنالوگ آمپلی‌فایر به کارت داده‌برداری منتقل شده و نهایتاً از طریق اتصال کارت داده‌برداری به یک کامپیوتر و با استفاده از نرم‌افزار داینو ویر^۱ نیروهای

ماشینکاری قابل ثبت کردن است.

در این پژوهش درجه حرارت ابزار با استفاده از دستگاه تستو ۲-۷۳۵ در حالتی که پروب آن در ابزار برشی کار گذاشته شده، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. خروجی دستگاه در نرم‌افزار کامفورت^۲ X۳۵ مورد تجربه و تحلیل قرار می‌گیرد. مشخصات عملکردی این دستگاه در جدول ۴ آمده است. چیدمان ستاپ تجربی این پژوهش و شماتیک آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

2 Comfort X35

1 Dynoware

دینامومتر با جرم‌هایی با وزن مختلف بررسی شود. مقادیر ضریب اصطکاک پس از اندازه‌گیری مؤلفه‌های برشی و پیشروی نیرو (گزارش شده در جدول ۵) از رابطه‌ی (۲) تعیین می‌شود:

$$\mu = \frac{F_t + F_C \tan(\alpha_n)}{F_C - F_t \tan(\alpha_n)} \quad (2)$$

۳-۳- طراحی آزمایش‌ها

در هنگام مطالعه‌ی نیمه تجربی درجه‌ی حرارت در تراشکاری به کمک لیزر، تأثیر پارامترهای توان لیزر پیوسته، سرعت برشی و پیشروی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این مطالعه برای هر یک از پارامترهای مذکور سه سطح در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب با طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل در مجموع ۲۷ آزمایش انجام و در هر آزمایش درجه حرارت اینسرت برشی در نقطه‌ی نصب ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود. عمق برشی ثابت و برابر با یک میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. سطوح پارامترهای مورد مطالعه در جدول ۶ آمده است.

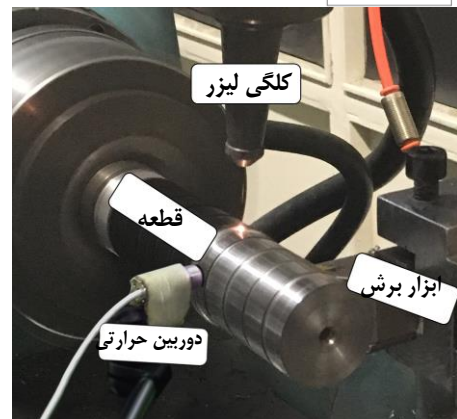
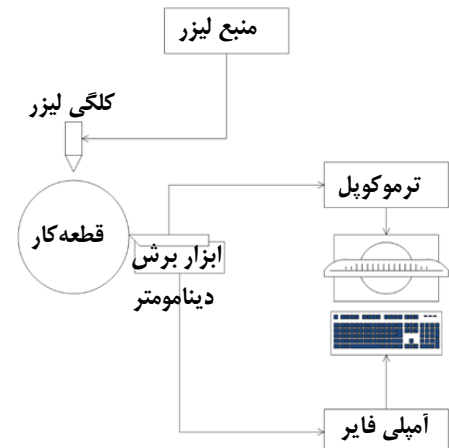
۴- نتایج و بحث

۴-۱- نیروهای برشی

در شکل ۶ نتایج حاصل از مطالعه‌ی تجربی و المان محدود مؤلفه‌ی اصلی نیروی برش نشان داده شده است.

هدف از مطالعه‌ی مؤلفه نیروی اصلی برش، بررسی صحت مطالعات تجربی و المان محدود است. بر اساس نتایج حاصل شده، شبیه‌سازی المان محدود نیرو در انطباقی مناسب با نتایج مطالعه‌ی تجربی قرار دارد و درصد انطباق ۸۵ درصدی بین نتایج مطالعات المان محدود و مطالعات تجربی برقرار بوده است.

همان‌طور که در شکل ۶ پیداست استفاده از توان لیزر ۳۵۰ وات موجب کاهش ۱۱/۵ درصدی نیروهای برش نسبت به حالت تراشکاری سنتی شده و با افزایش توان لیزر پیوسته به ۵۰۰ وات، این کاهش نیرو به ۲۳ درصد، نسبت به تراشکاری سنتی رسیده است. این کاهش در اثر کاهش تنش جریان ماده با افزایش دما، توجیه می‌شود. افزایش توان لیزر پیوسته بالطبع افزایش دمای لایه‌ی مرزی سطحی قطعه‌کار متأثر از منبع حرارت را ایجاد می‌کند، لذا با افزایش دمای بیش‌تر لایه‌ی مرزی سطحی قطعه‌کار، کاهش تنش جریان در اثر افزایش حرارت در ماده بیشتر بوده و منجر به کاهش بیشتر استحکام برشی ماده خواهد شد. البته باید در نظر داشت که افزایش



شکل ۵. چیدمان تجهیزات تراشکاری به کمک لیزر.

Fig. 5. Setup for laser assisted machining.

۳-۲- آزمایش‌های تجربی مدل‌سازی ضریب اصطکاک

طراحی آزمایش در این بخش از پژوهش، مشتمل بر سه سطح برای هر یک از متغیرهای سرعت برش و پیشروی است. مقادیر مربوط به این دو متغیر مستقل به همراه مقادیر نیروهای اندازه‌گیری شده و همچنین ضرایب اصطکاک متناظر برای این ۵ آزمایش در جدول ۵ گزارش شده است.

برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های نیرویی و قبل از انجام آزمایش‌های ماشینکاری نیاز است، صحت و دقت دستگاه اندازه‌گیری نیروی وارده بر

جدول ۵. پارامترهای تجربی مدل‌سازی ضریب اصطکاک.

Table 5. Experimental parameters for modeling friction coefficient.

ضریب اصطکاک (μ)	مؤلفه پیشروی (F_f)	مؤلفه اصلی (F_c)	سرعت برش (V_c)	پیشروی (a_f)
	N	N	m/s	mm/rev
۰/۵۰	۸۰/۵	۱۶۱	۱/۳۱	۰/۰۸
۰/۴۶	۶۵/۳	۱۴۲	۲/۶۱	۰/۰۸
۰/۵۹	۱۱۹	۲۰۱	۱/۳۱	۰/۱۴
۰/۴۸	۸۵/۲	۱۷۷	۲/۶۱	۰/۱۴
۰/۵۷	۱۳۲	۲۳۱	۱/۸۶	۰/۲۰

جدول ۶. متغیرها و سطوح آنها.

Table 6. Variables and their levels.

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
توان لیزر (W)	۲۰۰	۳۵۰	۵۰۰
سرعت برش (m/s)	۱/۳۰	۱/۸۶	۲/۶۱
پیشروی (mm/rev)	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۲۰

لیزر، افزایش پیشروی سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته را افزایش خواهد داد و در نتیجه چون نیروی برش به‌عنوان ضریبی از سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته است، مقدار نیروی برش به‌صورت تقریباً خطی افزایش خواهد یافت.

۴-۲- درجه حرارت برش

نتایج حاصل از مطالعه ماکزیمم دمای ابزار برش در فرآیند تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک لیزر به همراه تأثیر پارامترهای توان لیزر، سرعت برشی و پیشروی در شکل ۸ نمایش داده شده است.

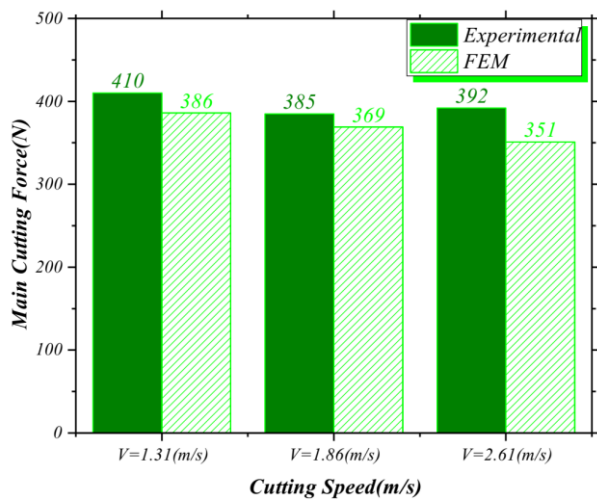
در یک روند عمومی با افزایش توان لیزر، دمای ابزار کاهش پیدا می‌کند [۸ و ۱۰]. این کاهش در اثر کاهش تنش جریان ماده با افزایش دما و نهایتاً کاهش دما در ناحیه‌ی اول برش توجیه می‌شود. افزایش توان لیزر بالطبع افزایش دمای لایه‌ی مرزی سطحی قطعه کار متأثر از منبع حرارت را ایجاد می‌کند، لذا با افزایش دمای بیش‌تر لایه‌ی مرزی سطحی قطعه کار، کاهش تنش جریان در اثر افزایش حرارت در ماده بیشتر بوده و ضمن کاهش بیشتر استحکام برشی ماده با کاهش دمای صفحه‌ی برش منجر به کاهش دمای

توان لیزر در فرآیند تراشکاری به کمک لیزر تا حدی مجاز است که منجر به تغییرات ریزساختاری در سطح قطعه کار نشود و اساساً ساختار بلوره‌ای ماده را عوض ننماید، از این‌رو این محدودیت متالورژیکی سبب محدودیت در افزایش توان لیزر پیوسته خواهد شد.

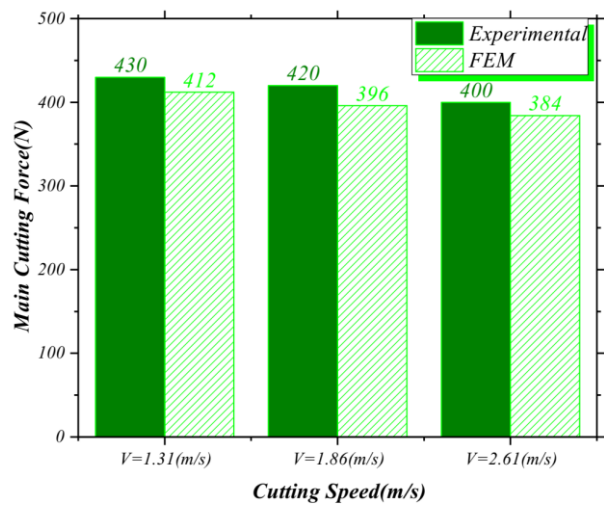
طبق بررسی صورت گرفته تا درجه حرارت ۶۲۰ درجه سانتیگراد، آلیاژ اینکونل ۷۱۸ دچار تغییرات ریزساختاری نخواهد شد و لذا باتوجه به نحوه‌ی انتخاب پارامترهای برشی و لیزر و بر اساس ارزیابی تئوری دمای براده‌ی تغییر شکل نیافته در این پژوهش ماکزیمم ۳۰۰ درجه‌ی سانتیگراد است.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، علاوه بر تأثیر توان لیزر، که افزایش آن موجب کاهش نیروی برش می‌شود، همانند تراشکاری سنتی، در یک روند عمومی با افزایش سرعت برشی، مؤلفه‌ی اصلی نیروی ماشینکاری کاهش می‌یابد. این رفتار را می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که با افزایش سرعت برش، مقدار حرارتی که به براده وارد می‌شود، بیشتر می‌شود و سهم ابزار کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش دمای براده‌ی تغییر شکل نیافته، نیروهای برشی کاهش می‌یابند.

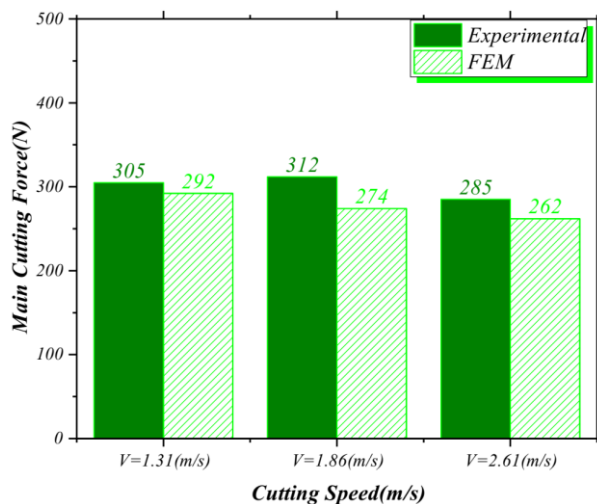
مطابق شکل ۷ هر دو فرآیندهای تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک



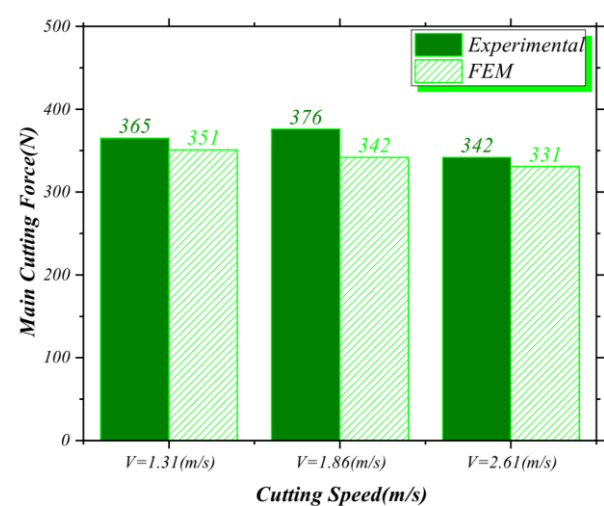
(ب) توان لیزر ۲۰۰ وات
(b) Laser Power = 200 W



(الف) تراشکاری سنتی
(a) Conventional Turning



(د) توان لیزر ۵۰۰ وات
(d) Laser Power = 500 W



(ج) توان لیزر ۳۵۰ وات
(c) Laser Power = 350 W

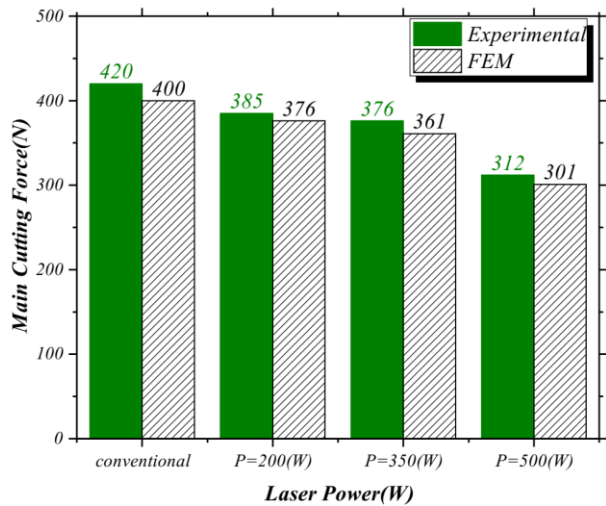
شکل ۶. تأثیر سرعت برش و توان لیزر بر مؤلفه اصلی نیروی برش در پیشروی ۰/۱۴ میلی‌متر بر دور.

Fig. 6. The effect of cutting speed and laser power on main component of cutting force ($a_f = 0.14$ mm/rev).

است. k_{ch} و k_t به ترتیب ضریب هدایت حرارتی ابزار و براده هستند. Pe عدد پکلت نامگذاری شده که در کسر معرفی شده‌ی آن، V_c سرعت برش، a نصف قطر بزرگ بیضی در تقریب ناحیه تماس براده و ابزار است. همچنین ξ عدد نفوذ حرارتی براده است که برابر با ضریب هدایت حرارتی براده تقسیم بر حاصلضرب چگالی در ظرفیت گرمایی ویژه می‌باشد.

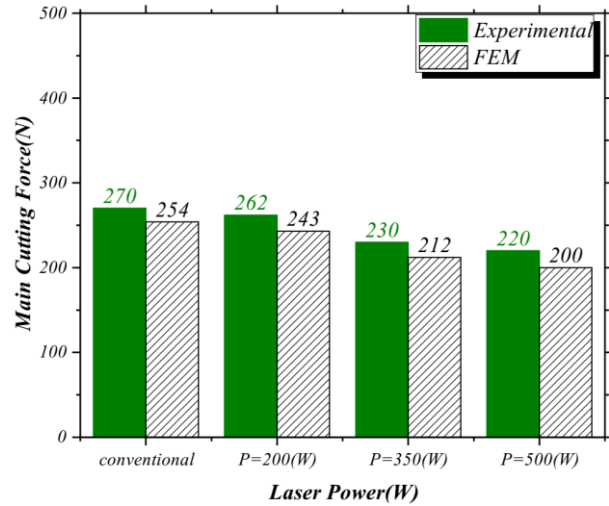
ابزار خواهد شد.

طبق رابطه‌ی (۳) که در فرآیند برش متعام برقرار است [۱۶] با افزایش سرعت برش، عدد پکلت بزرگ‌تر می‌شود و $1/\sqrt{\xi}$ کاهش می‌یابد. یعنی در سرعت‌های برشی بالا، قسمت عمده‌ی حرارت توسط براده حمل می‌شود. در این رابطه $1/\sqrt{\xi}$ به صورت مستقیم متناسب با شار حرارتی منتقل شده به ابزار



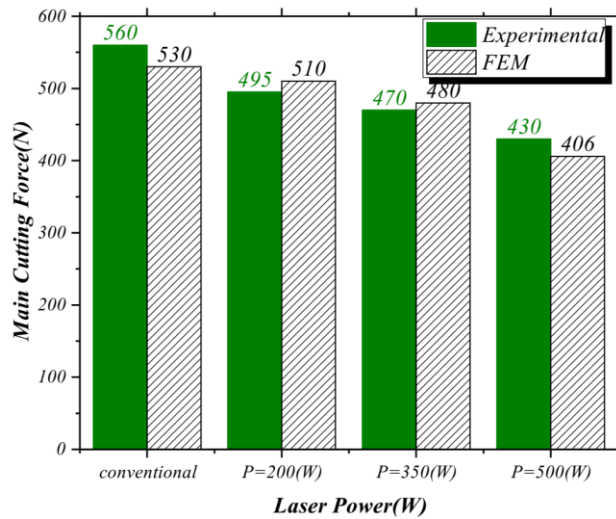
(ب) پیشروی ۰/۱۴ میلی‌متر بر دور

(b) feed = 0.14 mm/rev



(الف) پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور

(a) feed = 0.08 mm/rev



(ج) پیشروی ۰/۲۰ میلی‌متر بر دور

(c) feed = 0.20 mm/rev

شکل ۷. نتایج شبیه‌سازی المان محدود و آزمون‌های تجربی تأثیر توان لیزر و پیشروی بر نیروی برش در سرعت برشی ۱/۸۶ متر بر ثانیه.

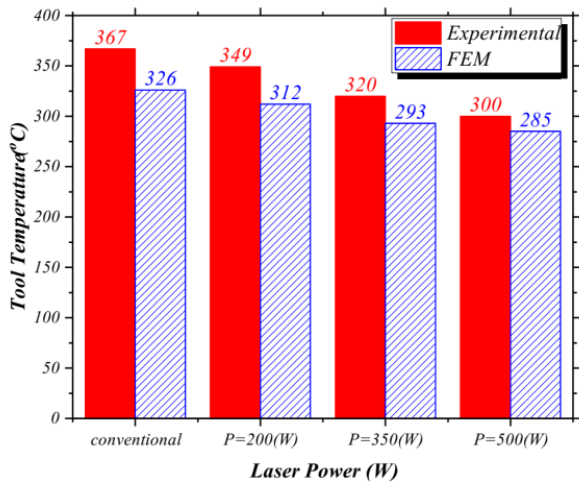
Fig. 7. The results of Finite Element Method (FEM) model and experimental tests for the effects of laser power and feed on main component of cutting force ($V_c=1.86$ m/s).

کاهش دمای ابزار با افزایش توان لیزر در سرعت برشی بالاتر نسبت به سرعت برشی پایین‌تر (به عنوان مثال در سرعت ۱/۸۶ متر بر ثانیه نسبت به سرعت ۱/۳۱ متر بر ثانیه) بیش‌تر است. این بیش‌تر بودن مقدار کاهش دما را می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که با افزایش سرعت برشی، دمای لایه‌ی مرزی سطح قطعه کار متأثر لیزر نسبت به سرعت پایین‌تر، افزایش دمای

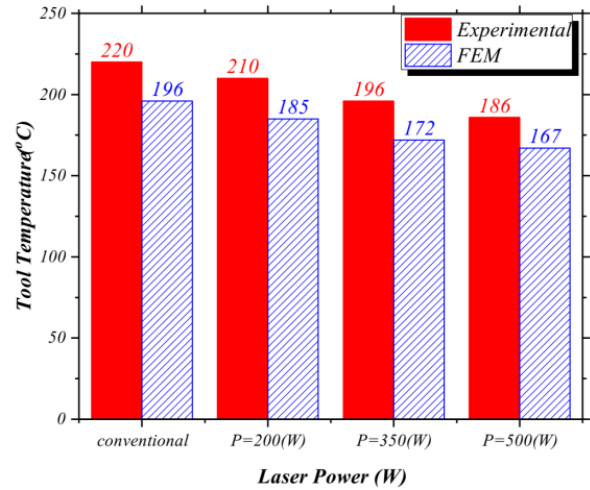
$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{k_{ch}}{k_t} \sqrt{1 + Pe}} \quad (3)$$

$$Pe = \frac{V_c a}{2\zeta}$$

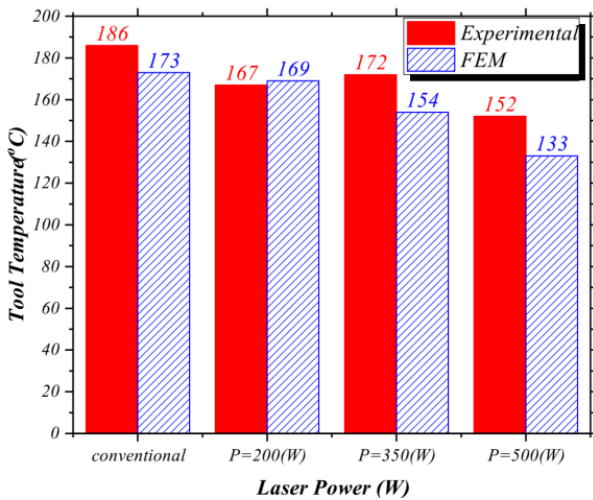
$$a = 0.5l_{cn}$$



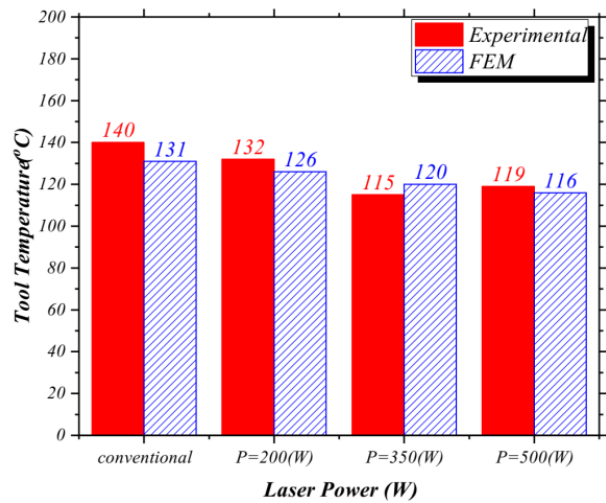
(ب) پیشروی ۰/۱۴ میلی‌متر بر دور و سرعت ۱/۸۶ متر بر ثانیه
(b) feed = 0.14 mm/rev and cutting speed = 1.86 m/s



(الف) پیشروی ۰/۱۴ میلی‌متر بر دور و سرعت ۱/۳۱ متر بر ثانیه
(a) feed = 0.14 mm/rev and cutting speed = 1.31 m/s



(د) پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور و سرعت ۱/۸۶ متر بر ثانیه
(d) feed = 0.08 mm/rev and cutting speed = 1.86 m/s



(ج) پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور و سرعت ۱/۳۱ متر بر ثانیه
(c) feed = 0.08 mm/rev and cutting speed = 1.31 m/s

شکل ۸. تأثیر توان لیزر، سرعت برش و پیشروی بر ماکزیمم درجه حرارت ابزار برش.

Fig. 8. The effect of laser power, cutting speed and feed on the maximum of cutting tool temperature.

(۳) افزایش یافته و این خود سبب کاهش سهم ابزار در ناحیه‌ی ثانویه برش خواهد بود. بنابراین درست است که با افزایش سرعت برشی، دمای ابزار افزایش می‌یابد، اما به دلیل آنچه پیش‌تر توضیح داده شد، کاهش دمای ابزار در اثر افزایش توان لیزر پیوسته در سرعت برشی بالاتر بیشتر بوده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بدینوسیله کمال تشکر و سپاسگزاری خود را از مسئولین آزمایشگاه تحقیقات ماشینکاری دانشگاه صنعتی شریف آقایان دکتر موحدی و دکتر اکبری جهت در اختیار گذاشتن تجهیزات انجام آزمون‌های تجربی را به عمل می‌آورند.

منابع

- [1] G. Punugupati, K.K. Kandi, P.S. Bose, C.S. Rao, Laser assisted machining: a state of art review, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 149 (2016), 012014.
- [2] S.M. Hashemi, M.A. Akhavan-Behabadi, An empirical study on heat transfer and pressure drop characteristics of CuO-base oil nanofluid flow in a horizontal helically coiled tube under constant heat flux, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39(1) (2012) 144-151.
- [3] 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(8), (2010) 663-680.
- [4] L.N. Lopez de Lacalle, J.A. Sanchez, A. Lamikiz, A. Celaya, Plasma assisted milling of heat-resistant superalloys, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126(2), (2004) 274-85.
- [5] J.C. Rozzi, F.E. Pfefferkorn, F.P. Incropera, Y.C. Shin, Transient, three-dimensional heat transfer model for the laser assisted machining of silicon nitride: I. Comparison of predictions with measured surface temperature histories, International journal of heat and mass transfer, 43(8), (2000) 1409-1424.
- [6] P.A. Rebro, Y.C. Shin, F.P. Incropera, Design of operating conditions for crackfree laser-assisted machining of

کم‌تری دارد؛ این امر منجر به افزایش دمای کمتری در ناحیه‌ی اول برش در سرعت برشی بالاتر شده است. از سوی دیگر با افزایش سرعت برشی، عدد پکلت معرفی شده در رابطه‌ی (۳) افزایش یافته و این خود سبب کاهش سهم ابزار در ناحیه‌ی ثانویه برش خواهد بود. بنابراین درست است که با افزایش سرعت برشی، دمای ابزار افزایش می‌یابد، اما به دلیل آنچه پیش‌تر توضیح داده شد، کاهش دمای ابزار در اثر افزایش توان لیزر پیوسته در سرعت برشی بالاتر بیشتر می‌باشد [۸ و ۱۵-۱۴]. همچنین با افزایش پیشروی شار حرارتی ورودی به ابزار افزایش یافته و در نتیجه حرارت برش در هر دو فرآیندهای تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک منبع حرارتی افزایش خواهد یافت.

۵- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به مطالعه‌ی المان محدود و تجربی دمای ابزار در فرآیند تراشکاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به کمک لیزر پیوسته و مقایسه‌ی آن با حالت تراشکاری سنتی پرداخت. عمده‌ی نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

(الف) استفاده از لیزر پیوسته به نحوی که تغییرات دمایی در قطعه کار موجب تغییر ساختارهای بلورهای جنس قطعه کار نشود، ضمن کاهش نیروهای ماشینکاری در فرآیند، موجب کاهش دمای ابزار خواهد شد که این مورد خود سبب افزایش طول عمر ابزار می‌شود.

(ب) استفاده از لیزر پیوسته از طریق تغییر در تنش جریان ماده‌ی قطعه کار و مشخصات فیزیکی-حرارتی جنس قطعه کار، سبب کاهش افزایش دمای صفحه‌ی برش شده و از طریق این سازوکار، منجر به کاهش دمای ابزار خواهد شد. استفاده از لیزر پیوسته ماکزیمم، کاهش به میزان ۱۹٪ (سرعت برشی ۱/۸۶ متر بر ثانیه، پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور و توان ۵۰۰ وات) در دمای ابزار، نسبت به حالت تراشکاری سنتی داشته است.

(ج) کاهش دمای ابزار با افزایش توان لیزر پیوسته در سرعت برشی بالاتر نسبت به سرعت برشی پایین‌تر، بیش‌تر است. به‌عنوان مثال در پیشروی ثابت ۰/۱۴ میلی‌متر بر دور کاهش دمای ابزار در سرعت برشی ۱/۸۶ متر بر ثانیه ۱۹٪ بوده که این مقدار در سرعت ۱/۳۱ متر بر ثانیه به ۱۳٪ رسیده است. این بیش‌تر بودن مقدار کاهش دما را می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که با افزایش سرعت برشی، دمای لایه‌ی مرزی سطح قطعه کار متأثر از منبع حرارت نسبت به سرعت پایین‌تر، افزایش دمای کم‌تری دارد؛ این امر منجر به افزایش دمای کمتری در ناحیه‌ی اول برش در سرعت برشی بالاتر شده. از سوی دیگر با افزایش سرعت برشی، عدد پکلت معرفی شده در رابطه‌ی

- 234(3) (2020) 559-70.
- [12] H. Roostai, M.R. Movahhedy, R. Shoja Razavi, Experimental and numerical study of low frequency pulsed Nd: YAG laser heating of slip cast fused silica ceramics for laser assisted turning process considering laser beam overlapping, *Scientia Iranica*, 26(1) (2019) 394-407.
- [13] H. Song, J. Dan, X. Chen, J. Xiao, J. Xu, Experimental investigation of machinability in laser-assisted machining of fused silica, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1-4) (2018) 267-78.
- [14] 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, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(5-8) (2014) 1163-75.
- [15] H.K. Farahani, M. Ketabchi, S. Zangeneh, Determination of Johnson–Cook plasticity model parameters for Inconel718, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(11) (2017) 5284-5293.
- [16] M. Khajehzadeh, M.R. Razfar, Theoretical modeling of tool mean temperature during ultrasonically assisted turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(4) (2016) 675-93
- mullite, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(7-8), (2004) 677-694.
- [7] A. Samanta, M. Teli, R. Singh, Experimental characterization and finite element modeling of the residual stresses in laser-assisted mechanical micromachining of Inconel 625, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. Journal of Engineering Manufacture*, 231(10), (2017) 735-1751.
- [8] M.M. Kashani, M.R. Movahhedy, M.T. Ahmadian, R.S. Razavi, Analytical prediction of the temperature field in laser assisted machining, *Procedia CIRP*, 46 (2016) 575-578.
- [9] E. Kaselouris, A. Baroutsos, T. Papadoulis, N.A. Papadogiannis, M. Tatarakis, V. Dimitriou, A Study on the Influence of Laser Parameters on Laser-Assisted Machining of Aisi H-13 Steel, *Key Engineering Materials*, 827 (2020) 92-97.
- [10] 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, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5-8) (2017) 2929-38.
- [11] N. Nadim, O.A. Shams, T.T. Chandratilleke, A. Pramanik, Preheating and thermal behaviour of a rotating cylindrical workpiece in laser-assisted machining, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. M. Nikouei, M. R. Razfar, M. Khajehzadeh, *Experimental Study and Finite Element Simulation of Cutting Tool Temperature in Laser Assisted Machining, Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(6) (2022) 1341-1356.

DOI: 10.22060/mej.2022.20462.7234

