

## بررسی قابلیت ماشین کاری آلیاژ تیتانیم در فرایند تراشکاری به کمک لیزر

کامران پولادساز<sup>۱\*</sup>، رضا شجاع‌رضوی<sup>۲</sup>، مهدی تاجداری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۲۸ تیر ۹۲ تاریخ پذیرش: ۲۲ مهر ۹۲

### چکیده

به‌علت خواص ذاتی تیتانیم و آلیاژهای آن، کاربرد این گروه از مواد در صنایع مختلف افزایش یافته است. آلیاژهای تیتانیم به‌علت استحکام فراوان و نرخ انتقال حرارت کم، دارای قابلیت ماشین کاری ضعیفی هستند. روش ماشین کاری، به کمک لیزر می‌تواند قابلیت ماشین کاری مواد با استحکام بسیار را از جنبه‌های مختلف بهبود بخشد. در فرایند ماشین کاری به کمک لیزر، تابش پرتو لیزر بر سطح قطعه‌کار در جلوی ابزار برش و هم‌زمان با عملیات براده‌برداری، باعث گرمایش موضعی در قطعه‌کار و کاهش استحکام برشی آن می‌شود. کاهش استحکام قطعه‌کار، در ناحیه براده‌برداری، تغییر رفتار ماده و بهبود وضعیت ماشین کاری را باعث می‌شود. در تحقیق حاضر، میزان تاثیر فرایند ماشین کاری به کمک لیزر با تغییر متغیرهای فرایند نظیر سرعت برشی، نرخ پیشروی، توان لیزر و دمای ناحیه براده‌برداری بر قابلیت ماشین کاری آلیاژ Ti6Al4V، از آلیاژهای پرکاربرد تیتانیم از نظر معیار انرژی مخصوص تراش و زبری سطح و شکل براده نسبت به ماشین کاری سنتی بررسی شده است. نتایج ماشین کاری به کمک لیزر، بیانگر کاهش ۳۰ درصدی انرژی مخصوص تراش و بهبود زبری سطح، در مقایسه با ماشین کاری سنتی است.

**واژگان کلیدی:** ماشین کاری به کمک لیزر، قابلیت ماشین کاری، آلیاژ تیتانیم، عملیات تراشکاری.

### ۱. مقدمه

آلیاژهای تیتانیم به‌علت استحکام فراوان و نرخ انتقال حرارت کم و واکنش‌پذیری بسیار، دارای قابلیت ماشین کاری ضعیفی هستند. به‌طور کلی، ماشین کاری سنتی آلیاژهای تیتانیم فرایندی با بهره‌وری کم، به‌همراه هزینه هنگفت ابزار و ماده خنک‌کار است [۱و۲]. هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر فرایند ماشین کاری به کمک لیزر<sup>۱</sup> بر قابلیت ماشین کاری آلیاژ تیتانیم Ti6Al4V از نظر معیارهای انرژی مخصوص تراش و زبری سطح و شکل براده در مقایسه با ماشین کاری سنتی<sup>۲</sup> است.

تئوری ماشین کاری به کمک افزایش حرارت، براساس کاهش نرخ کرنش سختی و استحکام مواد با افزایش دما، به‌علت پدیده نرم‌شدگی حرارتی است. شکل ۱ رابطه کاهش استحکام کششی

کاربرد تیتانیم و آلیاژهای آن، به‌علت خواص ذاتی این گروه از مواد، در صنایع مختلف افزایش یافته است. از ویژگی‌های مهم این مواد می‌توان به چگالی کم، استحکام بسیار، مقاوم‌بودن در برابر خوردگی در کنار دارابودن چقرمگی و سازگاری زیستی اشاره کرد. در صنایع هوا و فضا، این دسته از آلیاژها کاربرد گسترده‌ای در کمپرسور و پره‌های توربین موتورها دارند. از دسته‌ای دیگر در تجهیزات بیوپزشکی، مانند ایمپلنت‌های پزشکی و ایمپلنت‌های استخوانی استفاده کرده‌اند. با افزایش تقاضای تیتانیم و آلیاژهای آن، سرعت ماشین کاری و نرخ براده‌برداری ضروری برای این نوع آلیاژ نیز افزایش یافته است.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه kamranpooladsaz@yahoo.com

۲. دانشیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر.

۳. استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات اراک.

تغییر رفتار تشکیل براده، به سمت افزایش شکست متناوب آن شده است و در نتیجه، یکنواختی کمتری در سطح ماشین‌کاری شده ایجاد می‌کند [۳].

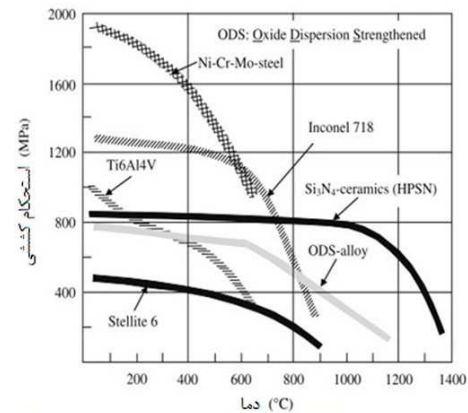
تراشکاری به کمک لیزر، در حالت پرداخت بر سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸<sup>۳</sup> با ابزار سرامیکی بررسی شده است که در مقایسه با ماشین‌کاری سنتی، نرخ براده‌برداری ۸ برابر شده و صافی سطح ۲۵ درصد بهبود یافته است. در موقعیت بهینه، عمر ابزار بیشتر شده و نیز هیچ‌گونه تغییر ریزساختاری، در لایه زیرین سطح ماشین‌کاری گزارش نشده است [۴].

به منظور بهبود قابلیت ماشین‌کاری فولاد بلبرینگی<sup>۴</sup> و آلیاژ تیتانیوم<sup>۵</sup>، ماشین‌کاری به کمک لیزر آن‌ها انجام شده است. نتایج برای فولاد، بیانگر کاهش نیروهای ماشین‌کاری در توان‌های مختلف لیزر، در مقایسه با ماشین‌کاری سنتی است. همچنین زبری سطح تقریباً ثابت بوده و تنش پسماند، بیشتر به تنش کششی گرایش یافته و عمق نفوذ آن در مقایسه با ماشین‌کاری سنتی کاهش یافته است. برای آلیاژ تیتانیوم نیروها به میزان محسوسی کاهش یافته‌اند و زبری سطح تغییر محسوسی نداشته است. در این ماده نیز تنش پسماند تحت‌تاثیر لیزر، به سمت کششی گرایش یافته و بنابراین عمر خستگی آن، به علت تشکیل ریزساختار سوزنی شکل در سطح، کاهش یافته است [۵].

نتایج بررسی تراشکاری به کمک لیزر سرامیک مالیت<sup>۶</sup> با استفاده از لیزر دی‌اکسیدکربن بیانگر کاهش انرژی مخصوص تراش در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد است. همچنین بهبود درخور توجه زبری سطح، در مقایسه با ماشین‌کاری معمولی است. به طوری که زبری سطح، در توان لیزر ۲۱۰ وات حدود ۵۰ درصد کاهش یافته و مقادیر زبری سطح ماشین‌کاری شده بسیار نزدیک به سطح سنگ‌زده شده است. در ماشین‌کاری به کمک لیزر، در مقایسه با ماشین‌کاری سنتی، عمر ابزار نیز بهبود درخور توجهی یافته است [۶].

نتایج تحقیقی دیگر، در فرایند تراشکاری به کمک لیزر فولاد سخت‌کاری‌شده، بیانگر کاهش زبری سطح ماشین‌کاری‌شده در مقایسه با ماشین‌کاری سنتی، به طور میانگین تا ۱۵ درصد است.

با افزایش دما را برای چندین ماده نشان می‌دهد. کاهش استحکام، برای مواد گوناگون در محدوده دمایی مختلفی رخ می‌دهد [۲].



شکل (۱): نمودار تغییرات استحکام کششی مواد با افزایش دما [۲].

ماشین‌کاری به کمک لیزر ترکیبی از تکنولوژی لیزر با فرایندهای ماشین‌کاری، مانند تراشکاری یا فرزکاری است که بر طبق اصول ماشین‌کاری، به کمک افزایش حرارت، از پرتو لیزر به عنوان یک منبع گرمایی استفاده می‌کند. در این روش، قطعه‌کار را پرتو متمرکز لیزر به طور موضعی، در جلوی ابزار برش گرم می‌کند تا استحکام آن کاهش یابد و هم‌زمان با عملیات براده‌برداری توسط ابزار برش برداشته می‌شود. افزایش دما در ناحیه براده‌برداری، ماده را نرم می‌کند و تسهیل فرایند ماشین‌کاری مواد سخت و با استحکام بسیار را باعث می‌شود؛ در نتیجه بهبود قابلیت ماشین‌کاری از جنبه‌های مختلف را در پی دارد [۲].

ماشین‌کاری به کمک لیزر، باعث بهبود قابلیت ماشین‌کاری مواد با استحکام بسیار و مقاوم به حرارت شده است. به علت خواص مکانیکی و فیزیکی، از جمله استحکام بسیار و نرخ انتقال حرارت پایین، قابلیت ماشین‌کاری این دسته از مواد ضعیف است. این خواص ایجاد نیروهای فراوان ماشین‌کاری و دمای اضافی در ناحیه برش را موجب می‌شود که کوتاه‌شدن عمر ابزار را به همراه دارد [۲].

چدن سفید کروم‌دار، استحکام و مقاومت بسیاری به سایش دارد. ویژگی‌های آن باعث شده است تا قابلیت ماشین‌کاری این ماده ضعیف باشد. ماشین‌کاری به کمک لیزر این ماده، بیانگر کاهش نیروی برشی تا ۲۴ درصد و بهبود عمر ابزار بوده است. لیزر سبب

همزمانی حرکت پرتو لیزر با ابزار برش، مکانیزمی طراحی و ساخته شد. با نصب نازل لیزر بر روی این مکانیزم، امکان تنظیم پرتو در راستای طولی و زاویه ای، درمقایسه با ابزار برش و همچنین حرکت همزمان پرتو لیزر با ابزار برش ایجاد شده است.

در فرایند ماشینکاری به کمک لیزر از یک گاز محافظ برای محافظت مجموعه اپتیک، در مقابل حرارت و براده‌های فرایند و نیز خنک کردن آن استفاده می‌شود. به علت واکنش‌پذیری بسیار این آلیاژ، انتخاب گاز محافظ مناسب در این فرایند، برای جلوگیری از تغییرات شیمیایی و ساختاری در قطعه‌کار دارای اهمیت است. با دمش گاز محافظ، در ناحیه تابش لیزر امکان تحت‌تاثیر قرارگرفتن ناحیه ماشینکاری نیز وجود دارد. به همین علت برای جلوگیری از اثرات نامطلوب تغییر ساختار قطعه‌کار ماشینکاری‌شده، از گاز آرگون که گازی خنثی است، به‌عنوان گاز محافظ در تمامی آزمایش‌ها استفاده شد. یکی از مزایای این روش ماشینکاری، براده‌برداری در حالت خشک و بدون استفاده از ماده روانکار است. در تمام آزمایش‌ها از روانکار استفاده نشد.

در آزمایش‌های تراشکاری از ابزار کاربایدی بدون پوشش استفاده شد. مشخصات ابزار در جدول ۲ ارائه شده است. این ابزار برای ماشینکاری سوپرآلیاژها و به‌ویژه آلیاژهای تیتانیوم توسط سازنده پیشنهاد شده است.

جدول (۲): مشخصات ابزار برش و ابزارگیر.

|                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| Tool material   | Sandvik H13A-WC/CO |
| Tool geometry   | SNMG120408-QM      |
| Tool holder     | MSBNR 2020         |
| Rake angle(°)   | -6                 |
| Relief angle(°) | 5                  |

برای اندازه‌گیری دمای سطح قطعه‌کار در حالت پیشگرم با پرتو لیزر بدون عملیات براده‌برداری، از ترمومتر غیرتماسی مدل ST-8869 استفاده شد. از دستگاه زبری‌سنج مدل TR110 ساخت شرکت TIME نیز برای اندازه‌گیری زبری سطح ماشینکاری‌شده استفاده شده است.

همچنین با انتخاب پارامترهای بهینه، زبری سطح، در مقایسه با ماشینکاری سنتی تا ۲۲ درصد بهبود یافته است. شکل براده در ماشینکاری به کمک لیزر پیوسته است و در مقایسه با ماشینکاری سنتی، تغییر فرم یکنواختی داشته است. تولید براده پیوسته، باعث بهبود وضعیت دینامیکی دستگاه تراش شده و اثر مستقیمی بر بهبود زبری سطح ماشینکاری داشته است [۷].

در این تحقیق، به بررسی قابلیت ماشینکاری آلیاژ تیتانیوم در فرایند تراشکاری، به کمک لیزر پالسی پرداخته شد. بدین‌منظور، با طراحی و ساخت مکانیزمی پرتو لیزر با فرایند تراشکاری، به‌نحوی یکپارچه شد که همزمان با عملیات ماشینکاری با فاصله‌ای مشخص در جلوی لبه ابزار برشی تابانده شود. در این مقاله، به بررسی اثر گرمایش توسط پرتو لیزر به‌همراه ترکیبی از متغیرهای فرایند تراشکاری بر انرژی مخصوص تراش و زبری سطح ماشینکاری شده به‌همراه تغییرات ماکروسکوپی شکل براده پرداخته شد.

#### ۱. تجهیزات آزمایش

ماده قطعه‌کار بررسی‌شده در این پژوهش، آلیاژ Ti6Al4V است که ترکیب شیمیایی آن را به روش اسپکترومتری نشری تعیین و در جدول ۱ ارائه کرده‌ایم. ساختار این آلیاژ تیتانیوم، ساختاری دو فازی از آلفا و بتا<sup>۷</sup> است. این آلیاژ در حدود ۵۰ درصد از تولید انواع آلیاژهای تیتانیوم را به خود اختصاص داده است. آلومینیم<sup>۸</sup> پایدارکننده فاز آلفاست و باعث استحکام آلیاژ می‌شود. وانادیم<sup>۹</sup> پایدارکننده فاز بتاست و شکل‌پذیری گرم آلیاژ را تقویت می‌کند [۵].

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V.

| Elements | %        | Elements | %        |
|----------|----------|----------|----------|
| Al       | 6.6      | V        | 4.0      |
| Fe       | 0.05     | Mn       | 0.02     |
| Si       | 0.02     | Cr       | 0.01     |
| Ti       | Balanced | Hardness | 350±20HV |

در این تحقیق لیزر Nd:YAG پالسی مدل IQL-20 با دستگاه تراش مدل CO630A یکپارچه شده است. به‌منظور یکپارچگی و

موقعیت پرتو لیزر را در راستای شعاعی و طولی قطعه کار در مقایسه با لبه ابزار برش نشان می دهد. پرتو لیزر توسط فیبر نوری از محفظه تولید لیزر به نازل لیزر انتقال می یابد. فاصله محیطی محل تابش پرتو لیزر در مقایسه با لبه ابزار برش، در تمام آزمایش ها ۱۱ میلی متر در نظر گرفته شد. ارتفاع نازل لیزر از سطح قطعه کار ۱۸ میلی متر و قطر پرتو بر روی سطح قطعه کار ۳/۲ میلی متر بوده است.

جدول (۴): متغیرهای آزمایش و مقادیر آنها.

| شماره آزمایش | سرعت برشی (m/min) | نرخ پیشروی (mm/rev) | توان لیزر (w) | دمای ناحیه برش (Tmr) |
|--------------|-------------------|---------------------|---------------|----------------------|
| ۱            | ۴۵                | ۰/۰۸۷               | ۰             | ۲۷                   |
| ۲            | ۴۵                | ۰/۰۸۷               | ۴۵۰           | ۲۲۰                  |
| ۳            | ۴۵                | ۰/۰۸۷               | ۵۲۰           | ۲۸۰                  |
| ۴            | ۴۵                | ۰/۱۷۴               | ۰             | ۲۷                   |
| ۵            | ۴۵                | ۰/۱۷۴               | ۴۵۰           | ۱۸۰                  |
| ۶            | ۴۵                | ۰/۱۷۴               | ۵۲۰           | ۲۲۸                  |
| ۷            | ۸۰                | ۰/۱۷۴               | ۰             | ۲۷                   |
| ۸            | ۸۰                | ۰/۱۷۴               | ۴۵۰           | ۱۶۰                  |
| ۹            | ۸۰                | ۰/۱۷۴               | ۵۲۰           | ۲۰۰                  |
| ۱۰           | ۸۰                | ۰/۰۸۷               | ۰             | ۲۷                   |
| ۱۱           | ۸۰                | ۰/۰۸۷               | ۴۵۰           | ۱۹۵                  |
| ۱۲           | ۸۰                | ۰/۰۸۷               | ۵۲۰           | ۲۴۰                  |

در این پژوهش از کرنش سنج های مقاومتی، برای اندازه گیری نیروهای برشی استفاده شد. کرنش سنج ها، کرنش الاستیک ناشی از نیروهای برشی در عملیات ماشین کاری را اندازه گیری می کنند. بدین منظور، می بایست آن ها را بر روی ابزارگیر نصب کرد. مشخصات کرنش سنج های استفاده شده در جدول ۳ ارائه شده است.

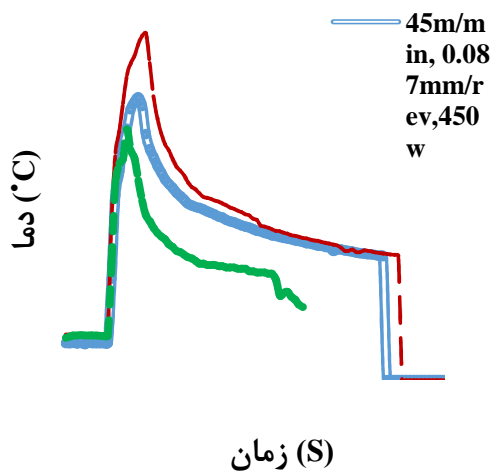
جدول (۳): مشخصات کرنش سنج ها.

| Type             | TML - FLA-5-11 |
|------------------|----------------|
| Gauge Length     | 5 mm           |
| Test condition   | 23°C 50%RH     |
| Gauge factor     | 2.11 ±1%       |
| Gauge resistance | 120±0.3        |

در این تحقیق از روش فول فاکتوریل<sup>۱۱</sup> برای طراحی آزمایش ها استفاده شده است. جدول ۴، متغیرها و سطوح انتخابی آن ها را نشان می دهد. مقادیر انتخابی فاکتورها، براساس آزمایش های اولیه در نظر گرفته شده است. سرعت برشی و نرخ پیشروی هر کدام، در دو سطح و توان لیزر، در سه سطح انتخاب شد. آزمایش های ماشین کاری سنتی، بدون حضور لیزر نیز انجام شده است تا با ماشین کاری به کمک لیزر مقایسه شود. در فرایند ماشین کاری به کمک لیزر، دما نقش مهمی دارد. با افزایش دما، استحکام ماده با توجه به تئوری ماشین کاری به کمک افزایش حرارت کاهش می یابد. برای بررسی تاثیر دما، دمای سطح در فرایند پیشگرم توسط پرتو لیزر، بدون عملیات براده برداری، در ناحیه براده برداری اندازه گیری شد و مقادیر آن، در جدول ۴ ارائه شده است. عمق براده برداری در عملیات ماشین کاری ثابت بوده و هرآزمایش نیز دو مرتبه تکرار شده است.

### ۱. نتایج حاصل از آزمایش

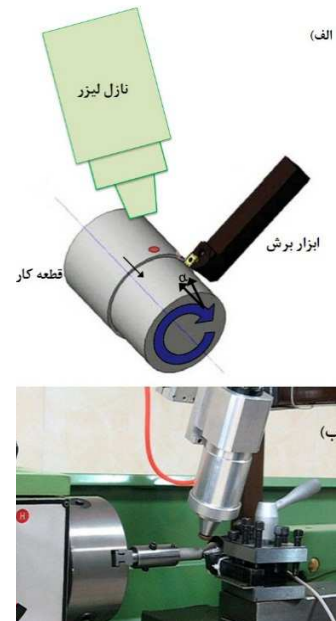
هدف از انجام آزمایش ها مقایسه قابلیت ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم، در روش ماشین کاری به کمک لیزر در مقایسه با ماشین کاری سنتی از نظر انرژی مخصوص تراش و زبری سطح و شکل براده است. بنابراین، ترکیبی از متغیرهای ماشین کاری در دمای محیط و دماهای بیشتر، در اثر اعمال پرتو لیزر در نظر گرفته شد. شکل ۲



شکل (۳): نمودار دمای سطح ناحیه براده برداری در عملیات پیشگرم توسط لیزر در وضعیت مختلف.

### ۳.۱. انرژی مخصوص تراش

کاهش نیروی برشی، به علت افزایش دما و نرم شدن قسمتی از قطعه کار در ناحیه براده برداری، از نتایج ماشین کاری به کمک لیزر است. همچنین گزارش شده است که گرمایش توسط لیزر باعث کاهش یافتن و محدود شدن دامنه نوسانات نیروهای برشی، در مقایسه با ماشین کاری سنتی شده است [۸ و ۹]. به منظور بررسی تغییرات نیروی برش، در این پژوهش انرژی مخصوص تراش بررسی شد. انرژی مخصوص تراش عبارت است از انرژی لازم، برای برداشت حجم واحد از قطعه کار که از تقسیم نیروی برش بر سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته محاسبه شد. در شکل (۴) نمودارهای سه بعدی، تاثیر پارامترهای مختلف بر انرژی مخصوص تراش، برای آزمایش های جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به شکل های (۴.الف) و (۴.ب)، انرژی مخصوص تراش در ماشین کاری به کمک لیزر، به میزان درخور توجهی در مقایسه با ماشین کاری سنتی کاهش یافت. در اثر گرمایش حاصل از برهم کنش پرتو لیزر با سطح قطعه کار، استحکام ماده کاهش یافت و براده برداری با نیروی برشی کمتری انجام شد. همچنین، افزایش توان لیزر که با افزایش دمای ناحیه براده برداری همراه است سبب کاهش انرژی مخصوص تراش در ماشین کاری به کمک لیزر شد.



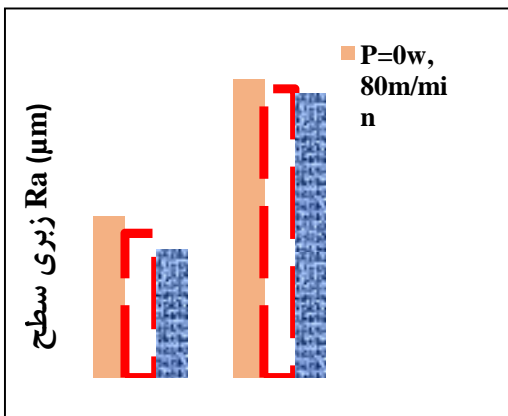
شکل (۲): الف. موقعیت ابزار برشی در مقایسه با پرتو لیزر؛ ب. نمایی از چیدمان تجهیزات ماشین کاری به کمک لیزر.

ابتدا دمای سطح قطعه کار در ناحیه برش در عملیات پیشگرم توسط پرتو لیزر، بدون عملیات براده برداری، در چند نقطه و در حالات مختلف اندازه گیری شد و مقادیر میانگین آن، در جدول (۴) گزارش شده است. نمونه ای از منحنی اندازه گیری دما در شکل (۳) ارائه شده است. با حرکت پرتو لیزر و نزدیک شدن به مکان اندازه گیری دما، افزایش دما با نرخ چشمگیری مشاهده می شود. با عبور پرتو از نقطه مدنظر، دما با نرخ بسیاری کاهش می یابد. مطابق جدول (۴) و شکل (۳)، در سرعت برشی و پیشروی ثابت با افزایش توان لیزر، دمای ناحیه براده برداری افزایش یافت. با افزایش سرعت برشی و نرخ پیشروی، با ثابت بودن دیگر متغیرها، زمان برهم کنش پرتو لیزر با سطح قطعه کار کاهش یافته که باعث کاهش دمای سطح می شود. در تمام آزمایش های ماشین کاری، طول نمونه ماشین کاری ۳۰ میلی متر و عمق برش ۰/۳ میلی متر بود و فاصله طولی پرتو لیزر روی سطح قطعه کار تالبه ابزار برش ۱ میلی متر انتخاب شد.

شد. همچنین با افزایش توان لیزر و در نتیجه افزایش دمای ناحیه براده‌برداری، انرژی مخصوص تراش نیز کاهش یافت.

### ۱.۳. زبری سطح

زبری سطح قطعات ماشین‌کاری شده در ۶ نقطه برای هر قطعه برطبق آزمایش‌های جدول (۴) اندازه‌گیری شد. شکل (۵) روند تغییرات زبری سطح را با متغیرهای مختلف ماشین‌کاری نشان می‌دهد. در ماشین‌کاری سنتی افزایش سرعت برشی، باعث بهبود نسبی زبری سطح ماشین‌کاری شد. در حالی که افزایش نرخ پیشروی، در سرعت برشی ثابت، سبب کاهش کیفیت سطح و افزایش میزان زبری سطح شد. در ماشین‌کاری به کمک لیزر، با افزایش دمای سطح ناحیه براده‌برداری و کاهش استحکام قطعه‌کار، نیروی برشی و انرژی مخصوص تراش در مقایسه با ماشین‌کاری سنتی کاهش یافت. کاهش نیروی برشی، باعث تسهیل فرایند براده‌برداری شد. به‌طور کلی، زبری سطح با اعمال پرتو لیزر و افزایش دمای سطح ناحیه براده‌برداری در مقایسه با تراشکاری سنتی بهبود یافت. در ماشین‌کاری به کمک لیزر در توان ۵۲۰ وات با کاهش سرعت برشی در پیشروی ثابت، کاهش زبری سطح به‌علت افزایش دمای ناحیه براده‌برداری مشاهده شد.



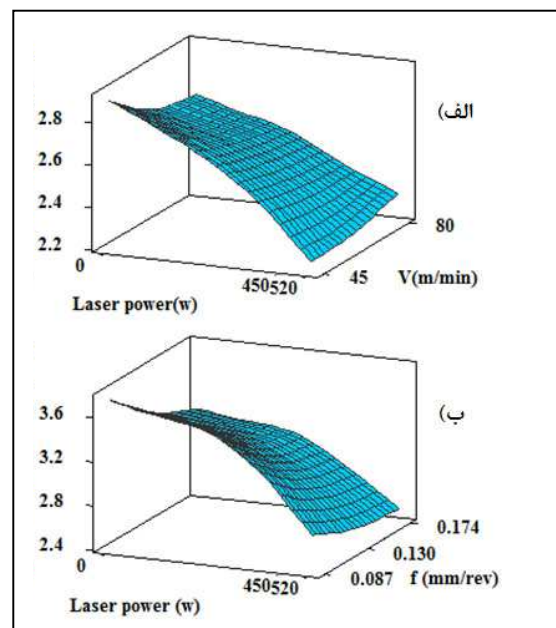
شکل (۵): تغییرات زبری سطح با متغیرهای ماشین‌کاری متفاوت.

### ۱.۳. شکل براده

نرم‌شدگی و کاهش استحکام ماده، در اثر گرمایش پرتو لیزر در فرایند ماشین‌کاری به کمک لیزر سبب تغییر رفتار ماده هنگام براده‌برداری شده است. همچنین تفاوت در تغییر شکل پلاستیک و

با توجه به شکل (۴.الف)، با افزایش سرعت برشی در توان لیزر ثابت، به علت کاهش زمان برهم‌کنش پرتو لیزر با قطعه‌کار و در نتیجه کاهش دمای ناحیه براده‌برداری و افزایش نیروی برشی، انرژی مخصوص تراش افزایش یافت. در حالی که افزایش سرعت برشی، در ماشین‌کاری سنتی باعث کاهش انرژی مخصوص تراش شد.

شکل (۴.ب)، بیانگر کاهش انرژی مخصوص تراش با افزایش پیشروی در هر دو فرایند ماشین‌کاری سنتی و ماشین‌کاری به کمک لیزر است. با این تفاوت که میزان کاهش انرژی مخصوص تراش، در ماشین‌کاری به کمک لیزر در توانی ثابت، به‌علت کاهش زمان برهم‌کنش پرتو لیزر با قطعه، کمتر از ماشین‌کاری سنتی است. در حالی که افزایش توان لیزر همراه با کاهش نیروی و انرژی مخصوص تراش، در سرعت برشی و پیشروی ثابت، در ماشین‌کاری به کمک لیزر است.



شکل (۴): الف. نمودار توان لیزر- سرعت برشی در برابر انرژی مخصوص تراش؛ ب. نمودار توان لیزر- نرخ پیشروی در برابر انرژی مخصوص تراش.

به‌طور کلی، گرمایش توسط پرتو لیزر در ماشین‌کاری به کمک لیزر آلیاژ تیتانیوم باعث کاهش نیروی برش و در نتیجه، کاهش ۳۰ درصدی انرژی مخصوص تراش در مقایسه با ماشین‌کاری سنتی

استحکام ماده تولید براده‌هایی با شکل ظاهری متفاوت در ماشین‌کاری به کمک لیزر را باعث شد. با اعمال پرتو لیزر، براده‌ها با شعاع انحنا بیشتری تشکیل شد. همچنین، در ماشین‌کاری به کمک لیزر با افزایش دمای ناحیه برش شعاع انحنا براده‌ها نیز افزایش یافت.

دمای سطح ناحیه براده‌برداری، حاصل از پیشگرم توسط پرتو لیزر، نقش مهمی را در فرایند ماشین‌کاری به کمک لیزر ایفا می‌کند. دمای سطح ناحیه براده‌برداری، با توجه به دیگر پارامترها برای بازدهی بیشتر فرایند، می‌بایست در محدوده بهینه‌ای قرار گیرد.

در فرایند ماشین‌کاری به کمک لیزر، با افزایش توان لیزر و ثابت در نظر گرفتن دیگر متغیرها، دمای سطح ناحیه برش افزایش یافت. افزایش دمای سطح ناحیه براده‌برداری باعث کاهش استحکام ماده و در نتیجه کاهش انرژی مخصوص تراش شد. همچنین، در ماشین‌کاری به کمک لیزر افزایش سرعت برشی و نرخ پیشروی، به علت کاهش زمان برهم‌کنش پرتو لیزر با سطح قطعه‌کار، باعث افزایش نیروی برش و انرژی مخصوص تراش شد.

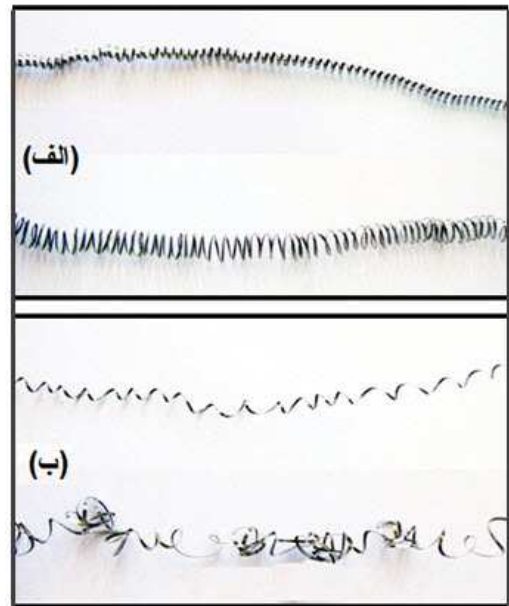
گرمایش موضعی قطعه‌کار توسط پرتو لیزر، در ناحیه‌ای کمتر از عمق براده‌برداری باعث تسهیل رفتار تغییر شکل پلاستیک ماده در این ناحیه شد. این تغییر در مقایسه با ماشین‌کاری سنتی، سبب بهبود وضعیت براده‌برداری و در نتیجه بهبود زبری سطح ماشین‌کاری شد. براده‌ها در ماشین‌کاری سنتی آلیاژ تیتانیم، به شکل مارپیچ نامتناهی و فنی شکل هستند در حالی که گرمایش پرتو لیزر در فرایند ماشین‌کاری به کمک لیزر، باعث تولید براده‌های نواری شکل با شعاع انحنا بیشتری شد.

#### ۴. تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از همکاری جناب مهندس احسان ایمانیان و جناب مهندس افشین پنجه‌پور، در طول انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌کنند.

تشکیل براده، در دو فرایند ماشین‌کاری سنتی و ماشین‌کاری به کمک لیزر را باعث می‌شود. این تمایز سبب تغییر در نیروهای ماشین‌کاری و زبری سطح شده است که در قسمت‌های قبل به آن اشاره شد.

در شکل (۶)، نمونه‌هایی از براده ماشین‌کاری در هر دو فرایند ارائه شده است. براده‌های ماشین‌کاری سنتی آلیاژ تیتانیم، به صورت مارپیچ نامتناهی و فنی شکل هستند. گرمایش پرتو لیزر و کاهش



شکل (۶): براده‌های ماشین‌کاری الف. ماشین‌کاری سنتی؛ ب. ماشین‌کاری به کمک لیزر.

#### ۳. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

فرایند ماشین‌کاری به کمک لیزر، به میزان درخور توجهی قابلیت ماشین‌کاری آلیاژ تیتانیم Ti6Al4V را با کاهش انرژی مخصوص تراش و بهبود زبری سطح در مقایسه با ماشین‌کاری سنتی بهبود بخشید. استفاده از گرمایش توسط پرتو لیزر، به عنوان یک منبع حرارتی موضعی با دانسیته بسیار و کنترل‌کردنی و تکرارپذیر از مزایای این فرایند، در مقایسه با دیگر روش‌های ماشین‌کاری به کمک افزایش حرارت است. در آزمایش‌های انجام‌شده، ماشین‌کاری به کمک لیزر باعث کاهش انرژی مخصوص تراش تا میزان ۳۰ درصد و بهبود زبری سطح ماشین‌کاری شد.

- |                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| 1- Laser assisted machining. | 6- Mullite.             |
| 2- Conventional machining.   | 7- $\alpha$ & $\beta$ . |
| 3- Inconel 718.              | 8- Aluminum.            |
| 4- Bearing steel (100Cr6).   | 9- Vanadium.            |
| 5- Ti6Al4V.                  | 10- Full Factorial      |

## ۵. مراجع

- [1] Ulutan, D. and Ozel T. "Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51(11): 250–280, 2011.
- [2] Sun, S., Brandt, M. and Dargusch, M.S. "Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials: A review". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50(4): 663–680, 2010.
- [3] Masood, S.H., Armitage, K., and Brandt, M. "An experimental study of laser-assisted machining of hard-to-wear white cast iron". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51(6):450–456, 2011.
- [4] Germain, G., Lebrun, J.L., Braham-Bouchnak, T., Bellett, D., and Auger, S. "Laser-assisted machining of Inconel 718 with carbide and ceramic inserts". *International Journal of Material Forming*, 1(1): 523–526, 2008.
- [5] Germain, G., Morel, F., Lebrun, J., and Morel, A. "Machinability and surface integrity for bearing steel and a titanium alloy in laser assisted machining". *Lasers in Engineering*, 17(1): 329–344, 2007.
- [6] Yang, B., Shen, X. and Lei, S. "Mechanisms of edge chipping in laser-assisted milling of silicon nitride ceramics". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49(9): 344–350, 2009.
- [۷] پنجه پور، ا؛ سلیمانی یزدی، م؛ شجاع رضوی، ر؛ ایمانیان، ا و پولادساز، ک. «بررسی تجربی فرایند ماشین کاری به کمک لیزر فولاد سخت کاری شده»، بیست و یکمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران، تهران، ایران، ۱۳۹۲.
- [8] Sun, S., Harris, J. and Brandt, M. "Parametric Investigation of Laser Assisted Machining of Commercially Pure Titanium". *Advanced Engineering Materials*, 10(6): 565–572, 2008.
- [9] Sun, S., Brandt, M. and Dargusch, M.S. "Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49(7): 561-568, 2009.