



## بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند سوراخکاری لیزر سوپرآلیاژ Hastelloy X روی مشخصه‌های هندسی سوراخ

علی خرم<sup>۱\*</sup>، محمدرضا رزازان<sup>۲</sup> و عبدالحسین جلالی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنایع و معادن ایران، تهران، ایران  
<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
 مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۰۵

### چکیده

در سال‌های اخیر، فرآیند سوراخکاری لیزری به عنوان یکی از روش‌های موثر برای سوراخکاری ریز قطعات با دقت بالا، زمان کم و نسبت طول به قطر بالا در صنایع گوناگون به ویژه صنعت هوافضا، مورد استفاده قرار گرفته است. جهت بهبود کیفیت فرآیند سوراخکاری، شناسایی پارامترهای فرآیند و بررسی تاثیر آن‌ها روی مشخصه‌های خروجی سوراخ لازم است. در این پژوهش فرآیند سوراخکاری لیزری Nd:YAG به روش چند پالسی روی سوپرآلیاژ Hastelloy X انجام گرفت و تاثیر پارامترهای فرآیند شامل، فرکانس لیزر، عرض پالس و زمان نگهداری پرتو روی مشخصه‌های هندسی سوراخ (قطر سوراخ در قسمت ورودی و خروجی، دایره‌ای بودن سوراخ در قسمت ورودی و خروجی و زاویه مخروطی سوراخ)، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش فرکانس لیزر، میانگین قطر سوراخ در قسمت ورودی و خروجی افزایش یافته، اما میزان دایره‌ای بودن در قسمت ورودی و خروجی کاهش می‌یابد و زاویه مخروطی شدن سوراخ نیز کمتر می‌شود. با افزایش عرض پالس، میانگین قطر در قسمت ورودی و خروجی و دایره‌ای بودن سوراخ در قسمت ورودی و خروجی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند؛ همچنین میزان مخروطی شدن سوراخ با افزایش عرض پالس کاهش می‌یابد. با افزایش زمان نگهداری پرتو، میانگین قطر سوراخ در قسمت ورودی و خروجی افزایش یافته، اما میانگین دایره‌ای بودن و خروجی سوراخ کمتر شده و زاویه مخروطی سوراخ کاهش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** سوپرآلیاژ Hastelloy X؛ سوراخکاری لیزر؛ لیزر Nd:YAG؛ مشخصات هندسی سوراخ

## Investigation of the Process Parameter Effects on the Hole Geometry Characteristics in Laser Drilling of Hastelloy X Superalloy

A. Khorram<sup>1\*</sup>, M. Razazan<sup>2</sup>, A. Jalali<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D., Mech. Eng., K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Master of Science Student, Mech. Eng., Iran University of Industries and Mines, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Mech. Eng., K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

In recent years, laser drilling is used as a new process for micro drilling with high precision, less time and high aspect ratio in various industries, particularly in the aerospace industry. To improve the quality of drilling process, identification of the process parameters and investigation of their influence on the output characteristics are necessary. In present study, laser percussion drilling process was performed on Hastelloy X nickel-based superalloy and the effect of process parameters including laser frequency, pulse width and laser beam keeping time was investigated on the hole geometry characteristics (hole entrance and exit diameter, hole entrance and exit circularity and hole taper). The results indicate that by increasing the laser frequency, hole entrance and exit diameter increases but hole entrance and exit circularity and hole taper decrease. By increasing the pulse width, hole entrance and exit diameter increases but hole entrance and exit circularity decreases. Also, with increasing the pulse width, hole taper decreases. When the laser beam keeping time increases, hole entrance and exit diameter increases but hole entrance and exit circularity and hole taper decrease.

**Keywords:** Hastelloy X Superalloy; Hole Geometry Characteristics; Laser Drilling; Nd:YAG Laser.

## ۱- مقدمه

فرآیند سوراخکاری لیزر به عنوان یکی از روش‌های ماشین-کاری غیرسنتی موثر برای ایجاد تعداد زیادی سوراخ با ابعاد بسیار کم، سرعت بالا و هزینه کم روی مواد گوناگون شناخته شده است. در سال‌های اخیر، از این روش به طور گسترده‌ای جهت برآورده کردن نیازهای صنعت در موارد گوناگون مانند، صنعت اتومبیل سازی، هوافضا، صنایع الکتریکی، پزشکی و غیره استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای مهم فرآیند سوراخ-کاری لیزر، در صنعت هوافضا است [۱]. در موتورهای توربینی به دلیل ایجاد دمای بالا و در نتیجه خنک‌کاری قطعات آن لازم است تا سوراخ‌های ریز (با قطر کمتر از ۱ میلی‌متر) به صورت راه به در، روی قطعات زیر مجموعه آن مانند پس‌سوزها، پره‌های توربین، محفظه‌های احتراق و نازل-های راهنمای پره ایجاد شود [۲] تا با ایجاد جریان هوا هنگام چرخش و کارکرد موتور، انتقال حرارت صورت گرفته و دمای آن نیز کاهش یابد.

به طور معمول از سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت به دلیل دمای ذوب بالا و حفظ خواص مکانیکی در دمای بالا، مقاومت در برابر اکسیدشدن و خوردگی، نرخ انبساط حرارتی کم و مقاومت به خزش در تنش‌های بالا در صنایع هوافضا استفاده می‌شود [۳]. سوپرآلیاژ Hastelloy X یکی از سوپرآلیاژهای پایه نیکل است که مهمترین عناصر آلیاژی آن کروم، آهن و مولیبدن است. این سوپرآلیاژ در موتورهای توربین گازی، کوره‌های صنعتی و صنایع شیمیایی استفاده می‌شود.

برای سوراخکاری ریز قطعات، لیزرهای Nd:YAG قادر هستند تا در زمان کم تعداد زیادی سوراخ (تقریباً ۳۴۰۰۰۰ سوراخ بر دقیقه برای قطرهای کمتر از ۰/۰۲۵ میلی‌متر) را ایجاد کنند. در موتورهای توربینی لازم است تا تعداد زیادی سوراخ ایجاد شود؛ به طور مثال در پس‌سوزها ممکن است تا حدود ۴۰ هزار عدد سوراخ با قطر نیم میلی‌متر وجود داشته باشد [۴]. هم‌چنین این امکان وجود دارد تا در یک موتور توربینی تعداد  $1 \times 10^6$  سوراخ خنک‌کاری ایجاد شود [۱]. در این حالت کاهش زمان تولید و افزایش کیفیت بسیار مهم است؛ در نتیجه برای افزایش کیفیت سوراخ‌ها لازم است تا توجه بیشتری روی مشخصه‌های مرتبط با کیفیت سوراخ شامل مشخصه‌های هندسی (اندازه قطر سوراخ، دایره‌ای بودن

سوراخ، مخروطی بودن سوراخ) شود. برای تغییر و بهبود مشخصه‌های خروجی لازم است تا پارامترهای ورودی فرآیند سوراخکاری لیزر شناخته، بررسی و بهینه شود. برخی از این پارامترها شامل، توان بیشینه و توان میانگین دستگاه، انرژی پالس، مدت زمان پالس، فرکانس پالس، موقعیت کانونی پرتو و غیره است. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای روی بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند سوراخکاری لیزر صورت گرفته است.

گوپتا و همکاران [۵] پارامترهای موثر فرآیند سوراخکاری لیزر را در سوپرآلیاژ پایه نیکل CM247LC با روکش محافظ حرارتی، مورد بررسی قرار داد. وی دریافت که فشار گاز محافظ تاثیر مهمی بر اندازه قطر ورودی و قطر خروجی سوراخ دارد و نیز این پارامتر روی زاویه مخروطی شدن و صافی سطح دیواره سوراخ تاثیر می‌گذارد؛ هم‌چنین وی دریافت که تعداد پالس کم‌تر اما با انرژی بیشتر، باعث ایجاد سوراخ با قطر خروجی و ورودی کم‌تر می‌شود. یکی دیگر از یافته‌های او این بود که افزایش فشار گاز، باعث کاهش لایه منجمد شده می‌شود و نیز زاویه‌دار شدن پرتو نسبت به سطح کار، باعث بیضی‌شدن ورودی سوراخ می‌شود که با افزایش زاویه پرتو، میزان بیضی‌شدن، افزایش می‌یابد. شین و مازومدار [۶] با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، پارامترهای سوراخکاری لیزر به صورت مارپیچی و تحت زاویه‌ی ۳۰ درجه را روی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ بررسی کرده و در مرحله بعد مشخصه‌های خروجی را بهینه کردند. مشخص شد که افزایش قدرت لیزر، کاهش سرعت حرکت پرتو و کاهش موقعیت کانونی پرتو نسبت به سطح کار، باعث افزایش نرخ برداشت ماده می‌شود که این به خاطر جذب بیشتر انرژی لیزر و افزایش شدت و تمرکز پرتو است؛ هم‌چنین تغییر این پارامترها باعث افزایش قطر سوراخ خروجی و کاهش مخروطی‌شدن می‌شود. به علاوه افزایش توان لیزر، باعث کاهش ضخامت لایه منجمد شده می‌شود.

بررسی فرآیند سوراخکاری لیزر پالسی روی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به ضخامت ۱ میلی‌متر، توسط مرادی و همکاران [۷] انجام شد. در این فرآیند مشخصه‌های هندسی مانند قطر ورودی سوراخ، دایره‌ای بودن ورودی سوراخ و میزان مخروطی بودن سوراخ، به عنوان خروجی، مورد بررسی

با مقیاس عرض پالس نانوثانیه در فولاد زنگ نزن و آلومینیوم بدست آوردند؛ همچنین سزار و همکاران [۱۲]، به بررسی تاثیر زاویه پرتوی لیزر روی منطقه متأثر از حرارت، لایه منجمد شده و لایه اکسیدی در فرآیند سوراخ کاری لیزر تحت زاویه و نیز حالت عمود سوپرا لایز پایه نیکل نایمونیک ۲۶۳ پرداختند. گیرادوت و همکاران [۱۳]، با استفاده از دوربین ثبت کننده سریع وقایع به بررسی مکانیزم لایه لایه شدن در سوراخ های زاویه دار و سوراخ عمود بر سطح در فرآیند سوراخ کاری سوپرا لایز پایه کبالت پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در سوراخ های تحت زاویه، میزان لایه لایه شدن افزایش یافته است، اما در سوراخ عمود بر سطح میزان لایه لایه شدن مقدار ناچیزی است. بیهاراتیش و همکاران [۲]، سوراخ کاری لیزر روی ورق های فلزی دارای روکش محافظ حرارتی را بررسی کردند. با استفاده از آزمایش های متعدد و روش های آماری تاگوچی<sup>۲</sup> و آنالیز گری<sup>۳</sup> بدست آمد که میزان پاشش مذاب و قطر خروجی سوراخ، رابطه مستقیم با قدرت لیزر دارد؛ همچنین قطر ورودی سوراخ و میزان مخروطی بودن سوراخ وابستگی زیادی به فشار گاز محافظ دارند.

در این پژوهش فرآیند سوراخ کاری لیزر سوپرا لایز Hastelloy X با ضخامت ۱/۲ میلی متر با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG انجام پذیرفت. تاکنون هیچ گونه گزارشی در خصوص سوراخ کاری لیزری این سوپرا لایز ارائه نشده است؛ همچنین اثر پارامترهای لیزر مانند، فرکانس پالس، عرض پالس و نیز زمان نگهداری پرتو روی مشخصه های هندسی سوراخ (قطر سوراخ ورودی و خروجی، دایره ای بودن سوراخ ورودی و خروجی و میزان مخروطی بودن سوراخ) مورد بررسی قرار گرفت. بررسی تاثیر زمان نگهداری پرتو روی مشخصه های هندسی سوراخ، از دیگر جنبه های نوآوری این مقاله است.

## ۲- روش انجام آزمون

در این پژوهش از ورق های سوپرا لایز پایه نیکل Hastelloy X با ضخامت ۱/۲ میلی متر به عنوان قطعه، مورد آزمایش استفاده شده است. در جدول ۱ درصد وزنی عناصر تشکیل

قرار گرفتند. نتایج نشان داد که فرکانس پالس لیزر، تاثیر مستقیم بر قطر ورودی سوراخ دارد؛ همچنین با افزایش قدرت لیزر، قطر ورودی سوراخ و میزان مخروطی شدن افزایش می یابد. راجش و همکاران [۸] اثر پارامترهای سوراخ کاری لیزر روی فولاد زنگ نزن آستنیتی را با استفاده از روش رویه پاسخ مورد بررسی قرار داده و در نهایت آن را بهینه کردند. با انجام چندین آزمایش، تاثیرات پارامترها روی مشخصه های خروجی بدست آمد. با افزایش جریان لامپ پمپ کننده، قطر سوراخ در قسمت ورودی و خروجی به مقدار ناچیزی کاهش می یابد؛ همچنین مشخص گردید که مقدار مطلوب برای قطر سوراخ در قسمت خروجی، در مقدار فرکانس پالس بالا، مقدار متوسط عرض پالس و مقدار کم فشار گاز بدست می آید. ژانگ و همکاران [۹]، تاثیر شدت انرژی و سرعت حرکت پرتو را در فرآیند سوراخ کاری لیزر با عرض پالس مقیاس میکروثانیه به روش ماریچی را روی کامپوزیت SiC/C، مورد بررسی قرار دادند. مشخص شد که با کاهش انرژی پالس، میزان دایره ای بودن در قسمت خروجی سوراخ کاهش می یابد؛ در صورتی که در قسمت ورودی تغییر کمی صورت می گیرد. به طور کلی مشخص گردید که برای قطعات نازک کاهش انرژی پالس، باعث افزایش استوانه ای بودن سوراخ (کاهش مخروطی شدن سوراخ) می شود. در نمونه هایی با ضخامت کمتر از ۳ میلی متر، با افزایش سرعت حرکت پرتو، دایره ای بودن در قسمت خروجی کاهش می یابد؛ در صورتی که در قسمت ورودی مقدار ناچیزی تغییر صورت می گیرد. به علاوه نرخ تغییر قطر (مخروطی شدن) افزایش می یابد.

در خصوص به حداقل رساندن پلیسه در فرآیند سوراخ کاری لیزر تحقیقاتی انجام شده است. به طور مثال دووان و همکاران [۱۰]، به بررسی تجربی و مطالعه پارامتری کاهش پلیسه روی فرآیند سوراخ کاری لیزر پرداخته و در نهایت تاثیر هر یک از پارامترهای عرض پالس، انرژی پالس، نرخ تکرار پالس، سرعت حرکت پرتو و فشار گاز محافظ را روی حجم پلیسه ایجاد شده در دو طرف بدست آوردند. رگ و همکاران [۱۱]، تاثیر نوع گاز محافظ را روی کیفیت برداشت ماده، کیفیت سوراخ و نرخ برداشت ماده در فرآیند سوراخ کاری لیزر

<sup>2</sup> Taguchi

<sup>3</sup> Gray

<sup>1</sup> Response Surface Methodology (RSM)

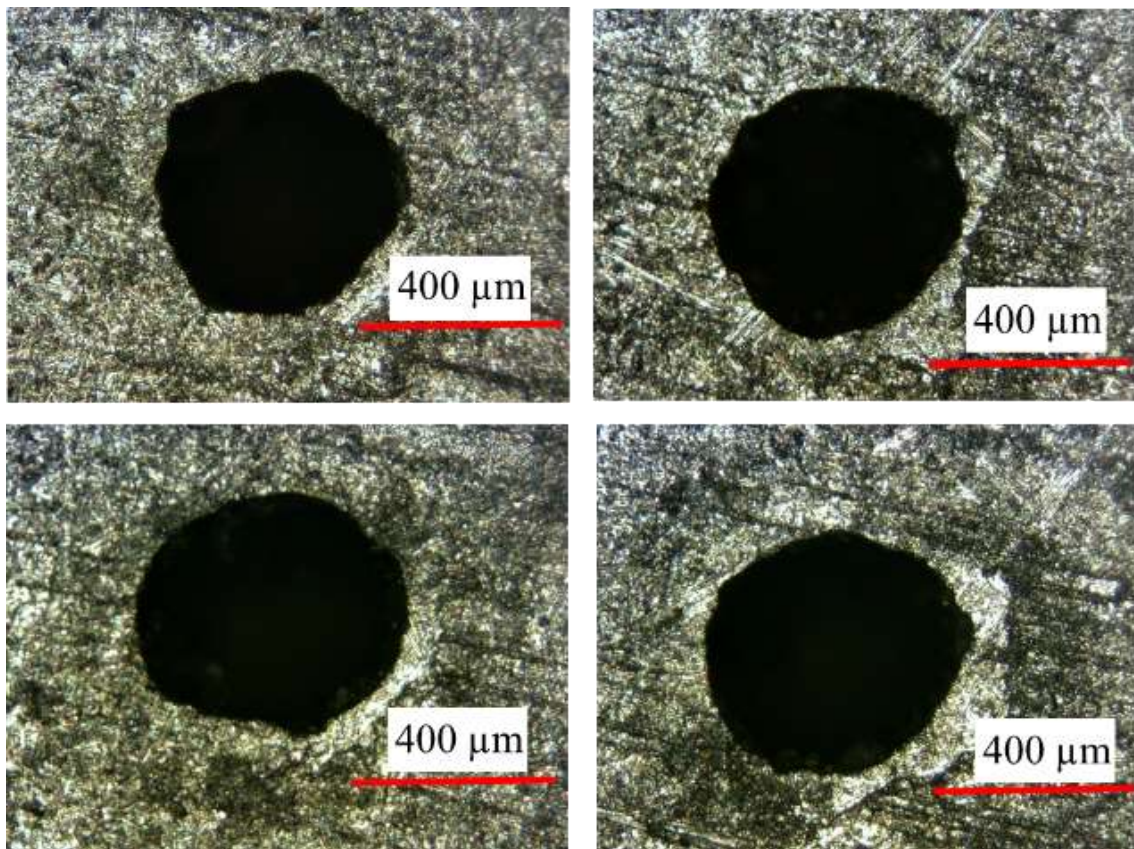
عنوان گاز کمکی استفاده شد. در تمام آزمایش‌ها، فاصله کانونی در ۱- میلی‌متر و جریان دستگاه در ۱۰۰ آمپر تنظیم شد. در شکل ۱ نمونه‌ای از سوراخ‌های ایجاد شده توسط لیزر نشان داده شده است. در نمونه‌های ۱ تا ۴ تاثیر عرض پالس و در نمونه‌های ۵ تا ۹، تاثیر فرکانس لیزر بررسی شده است؛ همچنین در نمونه‌های ۱۱، ۱۰، ۹، تاثیر زمان نگهداری پرتو مطالعه شده است. برای بررسی تکرار پذیری نتایج، آزمایش‌ها سه مرتبه تکرار شدند و میانگین آنها گزارش شده است.

جهت بررسی ویژگی‌های هندسی سوراخ، از میکروسکوپ نوری مدل Olympus BH-2 و جهت اندازه‌گیری ابعادی دقیق سوراخ از نرم افزار Imagej استفاده شد.

برای اندازه‌گیری میزان مخروطی بودن و دایره‌ای بودن سوراخ در قسمت ورودی و خروجی به ترتیب از معادله‌های (۱) و (۲) استفاده می‌شود.

دهنده این سوپرآلیاژ ارائه شده است که توسط روش کوانتومتری (دستگاه PMI MASTER SMART) تعیین شده است. به منظور ایجاد سوراخ در نمونه‌ها از لیزر پالسی Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر استفاده شد. لیزر مورد استفاده مدل IQL-10 با حداکثر توان متوسط ۴۰۰ وات و شکل پالس خروجی مربعی بود. محدوده پارامترهای قابل دستیابی دستگاه لیزر عبارتند از: فرکانس پالس ۱ تا ۱۰۰۰ هرتز، عرض پالس ۲ تا ۲۰ میلی‌ثانیه و انرژی پالس صفر تا ۴۰ ژول. بدیهی است به علت آنکه توان متوسط نمی‌تواند از ۴۰۰ وات تجاوز کند، هر ترکیبی از پارامترهای دستگاه قابل حصول نیست. سیستم متمرکز کننده نوری از سه لنز با فاصله ۷۵ میلی‌متر و حداقل اندازه قطر پرتو ۲۵۰ میکرومتر تشکیل شده است.

از توان سنج مدل 5000W-Lp Ophir و ژول سنج مدل LA300W-Lp، جهت اندازه‌گیری توان متوسط و انرژی پالس استفاده گردید. در آزمایش‌ها از گاز اکسیژن با فشار ۳۰ بار به



شکل ۱- نمونه‌هایی از سوراخ‌های ایجاد شده توسط لیزر

همراه با پارامترهای فرآیند و مشخصه‌های خروجی سوراخ ارائه شده است.

### ۳- نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌های گوناگون روی ورق‌هایی از جنس سوپرآلیاژ Hastelloy X، تاثیر پارامترهای ورودی روی مشخصه‌های خروجی، مورد بررسی قرار گرفت. در زیر به بررسی این نتایج پرداخته می‌شود.

#### ۳-۱- تاثیر فرکانس لیزر بر روی ویژگی‌های هندسی سوراخ

فرکانس لیزر تاثیر مهمی روی ویژگی‌های هندسی سوراخ دارد. با توجه به شکل ۲، افزایش فرکانس پالس باعث افزایش قطر سوراخ در قسمت ورودی می‌شود؛ زیرا افزایش فرکانس پالس باعث افزایش حرارت اعمال شده به قطعه کار شده و در نتیجه میزان نرخ برداشت ماده بیشتر می‌شود [۱۴]؛ همچنین با افزایش فرکانس پالس، قطر سوراخ در قسمت خروجی افزایش می‌یابد. به این دلیل که با افزایش فرکانس، انرژی پرتو بیشتر شده و در نتیجه دمای اعمال شده به قطعه افزایش می‌یابد و در نقطه‌ای که پرتوی لیزر در آنجا متمرکز شده، ماده بیشتری از قطعه ذوب و یا تبخیر و در مرحله بعد به بیرون انتقال<sup>۱</sup> می‌یابد.

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس لیزر میزان دایره‌ای بودن سوراخ در قسمت ورودی و خروجی کاهش می‌یابد و جهت دستیابی به مقادیر دایره‌ای بودن بالا لازم است تا سوراخ‌کاری در محدوده‌های پایین‌تری از فرکانس تعیین شده انجام گیرد؛ زیرا در فرکانس‌های پایین زمان خاموشی پالس بیشتر می‌شود و قطعه زمان بیشتری برای سرد شدن دارد؛ در نتیجه به انجماد کامل نزدیکتر می‌شود [۱۵]. همچنین با کاهش فرکانس پالس، زمان خاموشی در پالس (زمان بین دو برخورد پرتوی لیزر به سطح کار) افزایش و انرژی پالس کاهش می‌یابد؛ در نتیجه ماده با بی‌نظمی کمتری ذوب و منجمد می‌شود که در نتیجه دایره‌ای بودن افزایش می‌یابد.

<sup>۱</sup> Ejection

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژ Hastelloy X

عناصر تشکیل دهنده	درصد وزنی
کربن	۰/۰۷
منگنز	۰/۱۹
فسفر	۰/۰۱
گوگرد	۰/۰۲
سیلیکون	۰/۹۴
کروم	۲۱/۵
نیکل	تعداد
مولیبدن	۸/۹۸
آهن	۱۹/۹۵
تیتانیوم	۰/۰۴
آلومینیوم	۰/۱
کیالت	۱/۲۳
تنگستن	۰/۴۱

$$Taper(\theta) = \left[ \frac{D_{entry} - D_{exit}}{2t} \right] \quad (1)$$

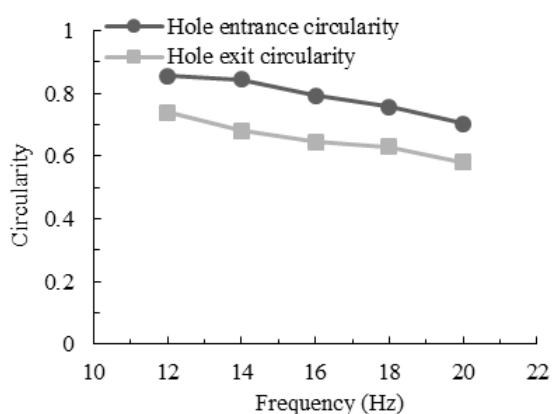
$$C_i = \frac{D_{min}}{D_{max}} \quad (2)$$

در معادله میزان مخروطی بودن،  $t$  ضخامت نمونه،  $D_{entry}$  قطر سوراخ ورودی،  $D_{exit}$  قطر سوراخ خروجی است. در معادله دایره‌ای بودن،  $D_{min}$  حداقل قطر سوراخ و  $D_{max}$  حداکثر قطر سوراخ است.

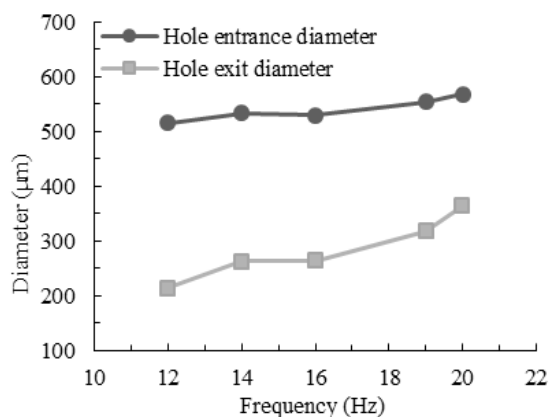
جهت بررسی ویژگی‌های هندسی سوراخ، پارامترهای فرکانس لیزر، عرض پالس و زمان نگه‌داری پرتو به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند در نظر گرفته شدند. مشخصه‌های خروجی شامل اندازه قطر سوراخ در قسمت ورودی و خروجی، دایره‌ای بودن سوراخ در قسمت ورودی و خروجی و مخروطی بودن سوراخ می‌باشند. لازم به ذکر است، مقدار میانگین برای قطر سوراخ در قسمت ورودی و خروجی محاسبه شده است. در جدول ۲ آزمایش‌های صورت گرفته

جدول ۲- آزمایش‌های انجام گرفته همراه با پارامترهای فرآیند و مشخصه‌های خروجی

شماره آزمایش	پارامترهای ورودی			پارامترهای خروجی		
	فرکانس (Hz)	عرض پالس (ms)	زمان نگهداری پرتو (s)	دایره‌ای بودن ورودی	دایره‌ای بودن خروجی	میانگین قطر ورودی (μm)
۱	۱۰	۲	۱/۴۸	۰/۸۴	۰/۸	۵۱۵/۴
۲	۱۰	۲/۵	۰/۹۰	۰/۸۴	۰/۶۵	۵۱۹/۵
۳	۱۰	۳	۰/۸۶	۰/۸۲	۰/۶۲	۵۲۹/۴
۴	۱۰	۳/۵	۰/۶۰	۰/۸۱	۰/۴۸	۶۱۴/۱۴
۵	۱۲	۲	۱/۳۷	۰/۸۵	۰/۷۴	۵۱۵/۷۵
۶	۱۴	۲	۱/۲۴	۰/۸۴	۰/۶۸	۵۳۴/۰
۷	۱۶	۲	۱/۱۶	۰/۷۹	۰/۶۴	۵۳۰/۴
۸	۱۸	۲	۰/۹۵	۰/۷۵	۰/۶۳	۵۵۴/۷
۹	۲۰	۲	۰/۹۳	۰/۷۰	۰/۵۸	۵۶۸/۳
۱۰	۱۰	۲	۵	۰/۷۸	۰/۷۷	۶۴۹/۹۵
۱۱	۲۰	۲	۵	۰/۶۸	۰/۵۴	۶۷۸/۸۵

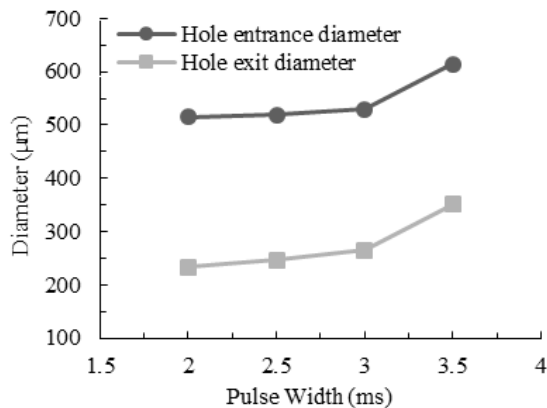


شکل ۳- تاثیر فرکانس لیزر بر روی دایره‌ای بودن سوراخ در قسمت ورودی و خروجی (عرض پالس = ۲ میلی ثانیه، جریان = ۱۰۰ آمپر و فاصله کانونی = ۱- میلیمتر)



شکل ۲- تاثیر فرکانس لیزر روی قطر سوراخ در قسمت ورودی و خروجی (عرض پالس = ۲ میلی ثانیه، جریان = ۱۰۰ آمپر و فاصله کانونی = ۱- میلیمتر)

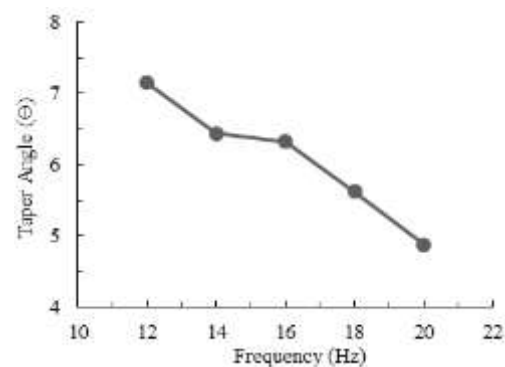
هر پالس می‌شود. به علاوه، افزایش عرض پالس، باعث افزایش زمان خروج مواد مذاب توسط بخار ایجاد شده و گاز محافظ می‌شود؛ در نتیجه باعث افزایش نرخ برداشت ماده و نیز افزایش قطر سوراخ ورودی می‌شود [۱۷].



شکل ۵- تاثیر عرض پالس روی قطر سوراخ در قسمت ورودی و خروجی (فرکانس = ۱۰ هرتز، جریان = ۱۰۰ آمپر و فاصله کانونی = ۱ میلی‌متر)

هم چنین در خصوص ارتباط دایره‌ای بودن و عرض پالس با توجه به شکل ۶ نیز می‌توان دریافت که به طور کلی افزایش عرض پالس، باعث کاهش دایره‌ای بودن می‌شود. به این دلیل که افزایش عرض پالس، باعث افزایش زمان خروج مذاب توسط مواد بخار شده در هر پالس می‌شود و این خود باعث بیشتر شدن بی‌نظمی حاصل از دفع مذاب و پاشش آن به اطراف سوراخ شده و در نتیجه می‌تواند باعث کاهش دایره‌ای بودن سوراخ گردد [۱۸]. شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش عرض پالس، مخروطی شدن کاهش می‌یابد؛ زیرا در عرض پالس بیشتر، زمان خاموشی پالس کم می‌شود و در نتیجه با توجه به پدیده انتقال حرارت همرفتی<sup>۲</sup> و کاهش زمان، قطعه فرصت کمتری برای سرد شدن و کاهش دما دارد و این باعث افزایش منطقه مذاب در سطح قطعه می‌شود؛ در نتیجه افزایش نفوذ حرارتی و هدایت حرارتی به انتهای سوراخ را در پی دارد و سبب افزایش قطر سوراخ در قسمت خروجی

در خصوص ارتباط فرکانس پالس و مخروطی شدن سوراخ در سوپرآلیاژ Hastelloy X مطابق شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس پالس، میزان مخروطی شدن کاهش می‌یابد. به این دلیل که با افزایش فرکانس، دما افزایش می‌یابد و در جایی که پرتوی لیزر در آنجا متمرکز شده، مواد بیشتری ذوب و تبخیر شده و در نتیجه ماده بیشتری برداشته می‌شود. از این رو افزایش قطر در قسمت خروجی بیشتر از ورودی است که در نتیجه باعث کاهش مخروطی شدن می‌شود. در این رابطه هان [۱۶] گزارش داده که افزایش فرکانس پالس، باعث ایجاد دیواره سوراخ به صورت صاف می‌شود. به علت دمای بالای ایجاد شده، مقدار کمی از ماده در دیواره سوراخ پس از دفع مذاب باقی می‌ماند و در مرحله بعد به انجماد دوباره<sup>۱</sup> می‌رسد؛ در نتیجه مواد مذاب و بخار بیشتری از سوراخ به بیرون انتقال می‌یابد.



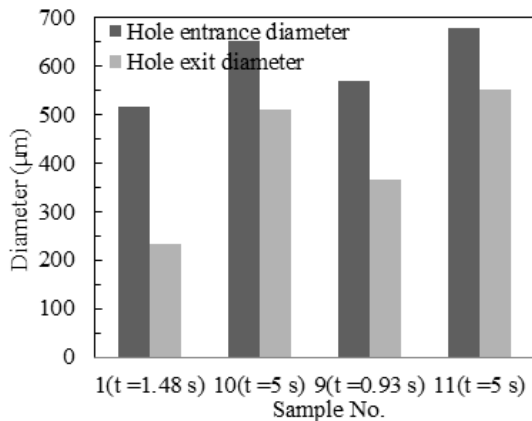
شکل ۴- تاثیر فرکانس پالس روی زاویه مخروطی شدن سوراخ (عرض پالس = ۲ میلی ثانیه، جریان = ۱۰۰ آمپر و فاصله کانونی = ۱ میلی‌متر)

### ۳-۲- تاثیر عرض پالس روی مشخصه‌های هندسی سوراخ

در این قسمت تاثیر عرض پالس بر مشخصه‌های هندسی سوراخ، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل ۵، افزایش عرض پالس باعث افزایش قطر ورودی و خروجی سوراخ می‌شود. به این دلیل که افزایش در عرض پالس، در توان قله ثابت، لزوماً باعث افزایش انرژی در

<sup>2</sup> Convection Heat Transfer

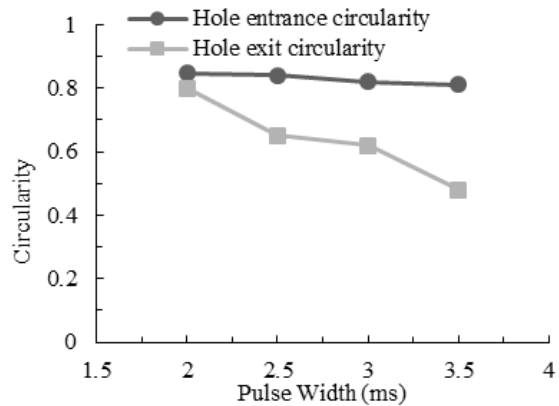
<sup>1</sup> Resolidification



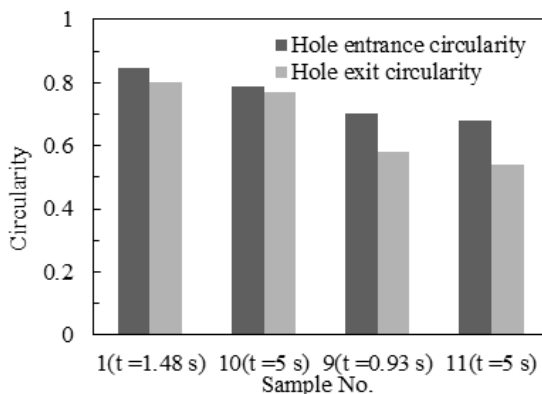
شکل ۸- تاثیر زمان نگهداری پرتو بر روی قطر میانگین سوراخ در قسمت ورودی و خروجی

(نمونه های ۱ و ۱۰: فرکانس = ۱۰ هرتز، عرض پالس = ۲ میلی ثانیه، جریان = ۱۰۰ آمپر، نمونه های ۹ و ۱۱: فرکانس = ۲۰ هرتز، عرض پالس = ۲ میلی ثانیه، جریان = ۱۰۰ آمپر)

می‌شود؛ بنابراین کاهش اختلاف قطر ورودی و خروجی، سبب کاهش مخروطی شدن می‌شود [۱۹].

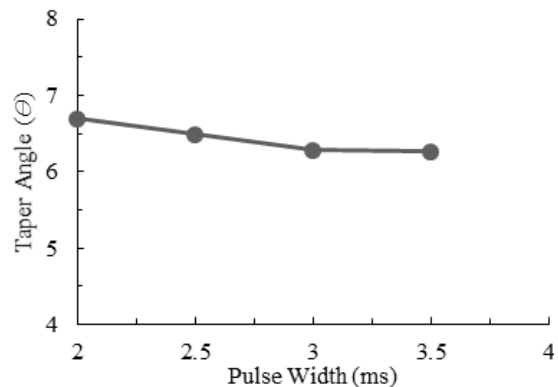


شکل ۶- تاثیر عرض پالس روی دایره‌ای بودن سوراخ در قسمت ورودی و خروجی (فرکانس = ۱۰ هرتز، جریان = ۱۰۰ آمپر و فاصله کانونی = ۱ میلی‌متر)



شکل ۹- تاثیر زمان نگهداری پرتو روی دایره‌ای بودن سوراخ در قسمت ورودی و خروجی

(نمونه های ۱ و ۱۰: فرکانس = ۱۰ هرتز، عرض پالس = ۲ میلی ثانیه، جریان = ۱۰۰ آمپر، نمونه های ۹ و ۱۱: فرکانس = ۲۰ هرتز، عرض پالس = ۲ میلی ثانیه، جریان = ۱۰۰ آمپر)



شکل ۷- تاثیر عرض پالس بر روی زاویه مخروطی شدن سوراخ (فرکانس = ۱۰ هرتز، جریان = ۱۰۰ آمپر و فاصله کانونی = ۱ میلی‌متر)

### ۳-۳- تاثیر زمان نگهداری پرتو روی مشخصه‌های هندسی سوراخ

تاثیر زمان نگهداری پرتو روی ویژگی‌های هندسی سوراخ در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸ افزایش زمان نگهداری، باعث افزایش میانگین قطر در قسمت ورودی و خروجی سوراخ می‌شود. به این دلیل که با افزایش زمان فرآیند، انتقال حرارت بیشتری توسط دو پدیده انتقال حرارت همرفتی و تشعشعی انجام می‌گیرد که در نتیجه باعث

برداشت بیشتر ماده می‌شود؛ در نتیجه قطر سوراخ در قسمت ورودی افزایش می‌یابد؛ همچنین با افزایش زمان نگهداری پرتو، انتقال حرارت بیشتری به انتهای سوراخ انجام می‌گیرد که در نتیجه باعث افزایش قطر در قسمت خروجی سوراخ می‌شود؛ همچنین با توجه به شکل ۹ با افزایش زمان نگهداری پرتو، میزان دایره‌ای بودن سوراخ در قسمت ورودی و خروجی کاهش می‌یابد. این پدیده می‌تواند به این علت



(۱) با افزایش فرکانس لیزر، میانگین قطر سوراخ در قسمت ورودی و خروجی افزایش یافته، اما میزان دایره‌ای بودن در قسمت ورودی و خروجی کاهش می‌یابد و زاویه مخروطی شدن سوراخ نیز کمتر می‌شود.

(۲) با افزایش عرض پالس، میانگین قطر در قسمت ورودی و خروجی و دایره‌ای بودن سوراخ در قسمت ورودی و خروجی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد؛ همچنین میزان مخروطی شدن سوراخ با افزایش عرض پالس کاهش می‌یابد.

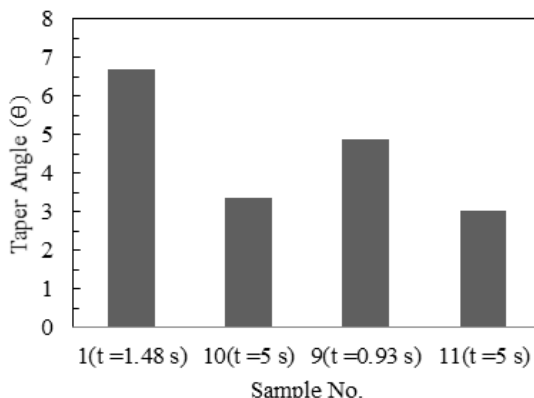
(۳) با افزایش زمان نگهداری پرتو، میانگین قطر سوراخ در قسمت ورودی و خروجی افزایش یافته، اما میانگین دایره‌ای بودن ورودی و خروجی سوراخ کمتر شده و زاویه مخروطی سوراخ کاهش می‌یابد.

#### ۴- مراجع

- [1] Chen MF, Hsiao WT, Wang MC, Yang KY, Chen YF (2015) A theoretical analysis and experimental verification of a laser drilling process for a ceramic substrate. *Int J Adv Manuf Technol* 81(9-12): 1723-1732.
- [2] Bharatish A, Murthy HNN, Anand B, Satyanarayana BS, Nagaraja S, Sunil RY (2014) Laser Microdrilling of Thermal Barrier Coatings. *Procedia Mater Sci* 5: 1005-1014.
- [3] Gautam GD, Pandey AK (2018) Pulsed Nd:YAG laser beam drilling: A review. *Opt Laser Technol* 100: 183-215.
- [4] Bahar ND, Marimuthu S, Yahya WJ (2016) Pulsed Nd: YAG laser drilling of aerospace materials (Ti-6Al-4V), *IOP Conf. Ser.: Mater Sci Eng* 152(1): 1-10.
- [5] Gupta U, Nath AK, Bandyopadhyay PP (2016) Laser micro-hole drilling in thermal barrier coated nickel based superalloy, *IOP Conf. Ser.: Mater Sci Eng* 149(1): 1-10.
- [6] Shin J, Mazumder J (2016) Shallow Angle Drilling of Inconel 718 Using a Helical Laser Drilling Technique. *J Manuf Sci Eng* 139(3): 31004-310013.
- [7] Moradi M, Mohazab Pak A, Khorram A (2016) An Experimental Investigation of the Effects of Fiber Laser Percussion Drilling: Influence of Process Parameters. , *Int J Adv Des Manuf Technol* 9(4): 7-12.

باشد که با افزایش زمان نگهداری پرتو، دمای قطعه بالاتر می‌رود و باعث افزایش مواد مذاب و بخار شده بیشتری می‌شود. در این حالت با پاشش مذاب، ماده با بی‌نظمی بیشتری سرد شده و در نتیجه باعث کاهش دایره‌ای بودن می‌شود.

با توجه به شکل ۱۰ می‌توان دریافت که با افزایش زمان نگهداری پرتو، میزان مخروطی شدن سوراخ نیز کاهش می‌یابد. به این دلیل که با افزایش زمان نگهداری، انتقال حرارت بیشتری به قطعه و در نتیجه به انتهای سوراخ انجام می‌گیرد که باعث افزایش حرارت در انتهای سوراخ می‌شود. که این افزایش حرارت افزایش قطر در انتهای سوراخ و در نتیجه کاهش اختلاف قطر و کاهش مخروطی شدن را در پی دارد.



شکل ۱۰- تاثیر زمان نگهداری پرتو بر روی زاویه‌ی

مخروطی شدن سوراخ

(نمونه های ۱ و ۱۰: فرکانس = ۱۰ هرتز، عرض پالس = ۲ میلی

ثانیه، جریان = ۱۰۰ آمپر، نمونه های ۹ و ۱۱: فرکانس = ۲۰

هرتز، عرض پالس = ۲ میلی ثانیه، جریان = ۱۰۰ آمپر)

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر پارامترهای لیزر مانند، فرکانس پالس، عرض پالس و نیز زمان نگه داری پرتو، روی مشخصه‌های هندسی سوراخ (قطر سوراخ ورودی و خروجی، دایره‌ای بودن سوراخ ورودی و خروجی و میزان مخروطی بودن سوراخ) در فرآیند سوراخ‌کاری لیزر Nd:YAG به روش چند پالسی روی سوپرآلیاژ Hastelloy X مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشند:

- [14] Ahn DG, Jung GW (2009) Influence of process parameters on drilling characteristics of Al 1050 sheet with thickness of 0.2 mm using pulsed Nd:YAG laser. *Trans Nonferrous Met Soc China* 19(1): 157-163.
- [15] Khorram A, Ghoreishi M, Torkamany MJ, Bali MM (2014) Laser brazing of inconel 718 alloy with a silver based filler metal. *Opt Laser Technol* 56: 443-450.
- [16] Han W (2004) Computational and experimental investigations of laser drilling and welding for microelectronic packaging, PhD Thesis, Worcester Polytechnic Institute, America.
- [17] Moradi M, Mohazabpak AR (2018) Statistical modelling and optimization of laser percussion microdrilling of Inconel 718 sheet using response surface methodology (RSM), *Lasers in Eng* 39(3-6): 313-331.
- [18] Ghoreishi M, Low DKY, Li L (2002) Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in laser percussion drilling. *Int J Mach Tool Manu* 42(9): 985-995.
- [19] Girardot J, Schneider M, Berthe L, Favier V (2013) Investigation of delamination mechanisms during a laser drilling on a cobalt-base superalloy. *J Mater Process Technol* 213(10): 1682-1691.
- [8] Rajesh P, Nagaraju U, Gowd GH, Vardhan TV (2017) Experimental and parametric studies of Nd:YAG laser drilling on austenitic stainless steel. *Int J Adv Manuf Technol* 93(1-4): 65-71.
- [9] Zhang R, Li W, Liu Y, Wang C, Wang J, Yang X, Cheng L (2015) Machining parameter optimization of C/SiC composites using high power picosecond laser. *App Surf Sci* 330: 321-331.
- [10] Duan W, Wang K, Dong X, Mei X, Wang W, Fan Z (2014) Experimental characterizations of burr deposition in Nd:YAG laser drilling: a parametric study. *Int J Adv Manuf Technol* 76 (9-12): 1529-1542.
- [11] Rega Y, Leitz KH, Schmidt M (2011) Influence of processing gas on the ablation quality at ns-laser beam ablation. *Phys Procedia* 12(2): 182-187.
- [12] Sezer HK, Li L, Schmidt M, Pinkerton AJ, Anderson B, Williams P (2006) Effect of beam angle on HAZ, recast and oxide layer characteristics in laser drilling of TBC nickel superalloys. *Int J Mach Tool Manu* 46(15): 1972-1982.
- [13] Girardot J, Schneider M, Berthe L, Favier V (2013) Investigation of delamination mechanisms during a laser drilling on a cobalt-base superalloy. *J Mater Process Technol* 213(10): 1682-1691.