



## اثر پارامترهای ماشین کاری بر منطقه متأثر از حرارت و پهنای برش در فرآیند ترکیبی لیزر- جت آب

محمد صابر اسداللهی<sup>1</sup>، حمید سلیمانی مهر<sup>2\*</sup>، شهرام اعتمادی حقیقی<sup>2</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\* تهران، صندوق پستی 14515-775. soleimanimehr@srbiau.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 31 مرداد 1400

داوری اولیه: 21 شهریور 1400

پذیرش: 19 آذر 1400

### کلیدواژه‌گان:

لیزر

واتر جت

ماشین کاری ترکیبی لیزر- جت آب

منطقه متأثر از حرارت

پهنای برش

از جمله محدودیت‌های ماشین کاری با لیزر ایجاد منطقه متأثر از حرارت به دلیل حرارت بالای اعمال شده به قطعه کار می‌باشد. همچنین در میکروماشین کاری با لیزر عدم کنترل دقیق پهنای برش ایجاد شده توسط لیزر باعث کاهش دقت ماشین کاری می‌گردد. برای جبران این موارد از ترکیب فرآیند لیزر و جت آب بدون ذرات ساینده استفاده شد. در فرآیند ترکیبی لیزر-جت آب، فشار آب به تخلیه ماده مذاب در مقطع برش کمک می‌کند، در نتیجه پهنای برش کاهش می‌یابد. همچنین جت آب سبب خنک کاری بهتر قطعه کار نسبت به حالت لیزر خشک می‌گردد و در نتیجه عمق منطقه متأثر از حرارت کم‌تر می‌شود. در این مقاله ابتدا یک نازل واتر جت به قطر 0/4 میلی متر به ماشین لیزر فایبر با طول موج پیوسته 1080 نانومتر و با توان 1500 وات الحاق شد. سپس بر هم کنش پارامترهای سرعت برش، توان لیزر، فاصله کانونی و فشار جت آب بر روی HAZ و پهنای برش بررسی شد. بدین منظور از فولاد پرکربن CK75 استفاده شد. ملاحظه شد که با افزایش سرعت برش، عمق منطقه متأثر از حرارت و پهنای شیار کاهش یافته و با افزایش توان، هر دو پارامتر افزایش می‌یابند. همچنین با افزایش فشار جت آب عمق HAZ و پهنای برش کاهش یافت. در فاصله کانونی 3 میلی متر کم‌ترین عمق HAZ و پهنای شیار به دست آمد. در بهترین حالت عمق HAZ، 57 میکرومتر و پهنای برش، 217 میکرومتر به دست آمد.

## Effect of machining parameters on the heat-affected zone and kerf width in the hybrid laser- waterjet process

Mohammad Saber Asadollahi, Hamid Soleimanimehr\*, Shahram Etemadi Haghighi

Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14515-775 Tehran, Iran, soleimanimehr@srbiau.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 22 August 2021

First Decision: 12 September 2021

Accepted: 10 December 2021

### Keywords:

Laser

Waterjet

Hybrid Laser-Water Jet Machining

Heat Affected Zone

Kerf Width

### Abstract

One of the problems with laser machining is the heat-affected zone (HAZ) generated due to the intense heat applied to the workpiece. Moreover, in laser micromachining, the imprecise kerf width control reduces precision. A hybrid waterjet-laser (WJL) process without abrasive particles was used to counter these problems. In the hybrid WJL process, water pressure flushes out molten materials from the cut section, thus reducing the kerf width. Waterjet also enhances workpiece cooling compared to dry laser and results in reduced depth of HAZ. In this study, first a waterjet nozzle with a diameter of 0.4 mm was attached to a laser fiber machine featuring a constant wavelength of 1080 nm and power of 1500 W. Then, the interactions of cutting speed, laser power, focal length, and waterjet pressure on the HAZ and kerf width were investigated. CK75 high-carbon steel was used in this study. It was observed that increasing the cutting diameter leads to reduced HAZ depth and kerf width; whereas, increasing the power increases both said parameters. Furthermore, increasing waterjet pressure reduced HAZ depth and kerf width. The minimum HAZ depth and kerf width were obtained at a focal length of 3 mm., whereas the best HAZ depth and kerf width were 57 micrometers and 217 micrometers, respectively.

### 1- مقدمه

است که به طور گسترده در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. اعمال حرارت بالا به قطعه کار یکی از معایب ماشین کاری با لیزر بوده که باعث عیوب ریزساختاری می‌شود. همچنین یکی از دلایل کاهش دقت ماشین کاری در لیزر، پهنای برش ایجاد شده توسط لیزر است [2]. در میکروماشین کاری لیزری، مواد با تبخیر

با گسترش مواد پیشرفته تولیدی، نیاز به روش‌های ماشینکاری پیشرفته روزبه روز بیشتر می‌شود. از طرفی هرکدام از روش‌های ماشینکاری پیشرفته دارای معایب و مزایایی هستند که باید مورد بررسی قرار بگیرند [1]. برش لیزر یک فناوری تولیدی

Please cite this article using:

M. S. Asadollahi, H. Soleimanimehr, Sh. Etemadi Haghighi, Effect of machining parameters on the heat-affected zone and kerf width in the hybrid laser- waterjet process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 10, pp. 28- 37, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سرعت موثر برش کندتر است. همچنین نتیجه گرفتند، این فرآیند نتایجی مشابه با فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی را نشان می‌دهد [10]. ماریموتو و همکارانش از فرآیند لیزر-جت آب برای ماشین کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی آلومینیوم استفاده کردند و ماشین کاری بدون آسیب را نشان دادند [11]. شاوچوان فنگ و همکاران، کیفیت سطح تک کریستال 4H-SiC ماشین کاری شده توسط فرآیند ترکیبی لیزر-جت آب را مورد ارزیابی قرار دادند. در مقایسه با لیزر معمولی، نمونه‌ای که توسط فرآیند ترکیبی لیزر-جت آب ساخته شده بود، دارای کیفیت سطح بهتری بود و لبه‌های برش خورده صاف‌تری داشت. در امتداد لبه‌های برش خورده لیزر، صدمات حرارتی شدیدی دیده شد. علاوه بر این، مناطق متأثر از حرارت با عرض 50-100 میکرومتر و لایه‌های مجدد تشکیل شده در طرفین برش توسط لیزر وجود داشت. در مقابل، هیچ لایه تشکیل مجدد و HAZ در ماده ماشین کاری شده با فرآیند ترکیبی لیزر-جت آب وجود نداشت [12]. بینگ گو و همکاران) اظهار داشتند که روش ماشین کاری لیزری پالسی به کمک آب می‌تواند کیفیت سطح را بهبود بخشد و بازدهی ماشین کاری برای ماشین کاری ساختارهای میکرو در سطح پوشش الماس CVD را افزایش دهد [13]. تینگ جیانگ و همکاران از فرآیند ترکیبی لیزر-جت آب به منظور پیش بینی و آنالیز کیفیت سطح بر روی چوب استفاده کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که سرعت برش، توان لیزر و فشار آب نقش مهمی در زبری سطح مقطع برش ایفا می‌کنند. زبری سطح با افزایش توان لیزر افزایش یافت. اما با افزایش سرعت برش و فشار آب زبری سطح کاهش یافت [14].

یوون وو و همکاران پلیمرهای ضخامت بالا تقویت شده با الیاف کربن در فرآیند لیزر-جت آب را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که فرسایش جت آب با سرعت بالا، تخلیه مذاب را سریع‌تر می‌کند، اثر خنک‌کنندگی، ناحیه متأثر از حرارت را کوچک‌تر می‌کند. بنابراین دیواره داخلی کانال برش تمیز بوده و الیاف کربن بدون انبساط حرارتی می‌باشد [15]. بکتاش و همکاران متریال‌های مورد استفاده در صنایع هوافضا را توسط فرآیند لیزر-جت آب مورد بررسی قرار دادند و آن را با لیزر معمولی مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که برش با یک سیستم لیزر-جت آب به طور کلی یکپارچگی سطح بهتری را در مقایسه با یک سیستم لیزر معمولی فراهم می‌کند [16]. ماریموتو و اسمیت در یک بررسی تجربی پشتیبانی شده توسط مدل سازی المان محدود برای درک ویژگی‌های فرآیند لیزر-جت آب بر روی سوپر آلیاژ نیکلی پوشش داده شده به این

حذف شده و مواد مجاور با ناحیه برهمکنش لیزر - ماده، بخشی از گرما را جذب می‌کنند. در نتیجه تنش‌های حرارتی و ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) در برش لیزر پدید می‌آید. تلاش‌هایی توسط محققان برای بهبود کیفیت سطح و بهبود ریزساختارهای حاصل شده به وسیله میکروماشین کاری لیزری، لیزرهای پالسی فوق سریع و لیزر به کمک آب انجام شده است. فرآیندهای لیزر به کمک آب، شامل ماشین کاری لیزر در آب و یا لیزر به کمک جت آب هستند [3]. از آنجا که تجمع گرما توسط آب سیال کاهش می‌یابد، ماده هدف در اطراف منطقه کانونی لیزر از تشکیل لایه تبلور مجدد و HAZ محافظت می‌شود. انرژی لیزر اضافی باقی مانده در مواد تبخیر شده و هدایت شده به قطعه کار عمدتاً توسط آب سیال جذب خواهد شد و سپس به دلیل هدایت گرمایی برجسته آب، حمل به خارج از قطعه کار خواهد شد. علاوه بر این، مواد تبخیر شده به سرعت توسط آب حمل می‌شوند. با اثر خنک‌کنندگی آب، آسیب‌های ریزساختاری در طول فرآیند لیزر کاهش خواهد یافت [4]. ماشین کاری لیزر-جت آب یک راه‌حل امیدوار کننده برای کاهش عیوب حرارتی و افزایش دقت ماشین کاری می‌باشد [5]. فناوری برش لیزر-جت آب نسبت به لیزرهای معمولی مزایای بسیاری دارد، زیرا مزایای جت آب و لیزر با هم ترکیب می‌شوند. در برش لیزر خشک معمولی، گازهای کمکی برای حذف براده‌های ذوب شده و به دست آوردن کیفیت برش، مورد نیاز هستند [6]. به دلیل اثر خنک‌کنندگی قوی جت آب، این جت مزایای بالقوه ای در کاهش HAZ و افزایش عمق برش دارد [7]. این فرآیند یک تکنولوژی نسبتاً جدید برای ماشین کاری دقیق مواد سخت است. جت آب در این فرآیند می‌تواند با خنک سازی مداوم نمونه در طول فرآیند برش، اثر نامطلوب حرارتی را به حداقل برساند [8].

بررسی اثر فاصله کانونی در پژوهش ایشان انجام نشد. سان و همکاران (2018) دریافته‌اند که، عرض و عمق HAZ به طور قابل توجهی پس از برش لیزر-جت آب در مقایسه با برش لیزر در هوا، در پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) کاهش یافت [9]. در مقاله آن‌ها در مورد پهنای شیار، سخنی به میان نیامده است.

سان و همکاران هندسه برش، ناحیه متأثر از حرارت، خصوصیات ریزساختار و راندمان برش به وسیله لیزر معمولی و لیزر-جت آب را بر روی الیاف کربن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اثر خنک کاری جابجایی قوی جت آب در فرآیند ترکیبی، تأثیر قابل توجهی در کاهش آسیب حرارتی لیزر دارد و زیرلایه سطح برش هیچ گونه تخریب آشکاری ندارد، اما

بتواند مواد اولیه ذوب شده لیزر را از سطح قطعه کار جدا کند، باید جت آب و پرتوی لیزر به طور همزمان و متمرکز در یک ناحیه حرکت کنند. برای این منظور، یک سر برش ترکیبی لیزر-واترجت ساخته شده است.

## 2-2- طراحی و ساخت نازل الحاقی برای کلگی دستگاه لیزر

نازل باید مجهز به خروجی برای لیزر و واترجت به صورت مجزا باشد و بدین منظور باید طراحی یک نازل خاص انجام شود. برای ساخت نازل واترجت از آلیاژ 1.4000 استفاده شده است این فولاد دارای خصوصیت عملیات حرارتی و قابلیت مغناطیسی خوب می باشد و از آن می توان در ساخت پره توربین های بخار و قطعات تحت تنش زیاد در محیط های آب و بخار استفاده نمود. همچنین این فولاد ضد زنگ است و برای نازل دستگاه واترجت تحت فشار بالا مناسب می باشد. به منظور ماشین کاری این فولاد ابتدا میله ای به قطر 10 میلی متر در اندازه 75 میلی متر برش زده و سوراخ کاری تا عمق 25 میلی متر به قطر 4 میلی متر در مرکز آن ایجاد گردید. و سپس برای متمرکز نمودن آب نیاز به یک سوراخ به قطر 0/4 میلی متر می باشد که با سوپر دریل ایجاد این سوراخ به ارتفاع 50 میلی متر میسر گشت (شکل 1). برای الحاق این سیستم به کلگی لیزر WSX از مکانیزم شکل 2 با زاویه ثابت 45 درجه استفاده شد. این سیستم توسط ورق های فلزی به کلگی جوش داده شده است و به نحوی طراحی شده که نازل واترجت با زاویه 45 درجه نسبت به محور پرتوی لیزر قرار بگیرد. شکل 2 فرآیند ترکیبی لیزر-جت آب را نشان می دهد.

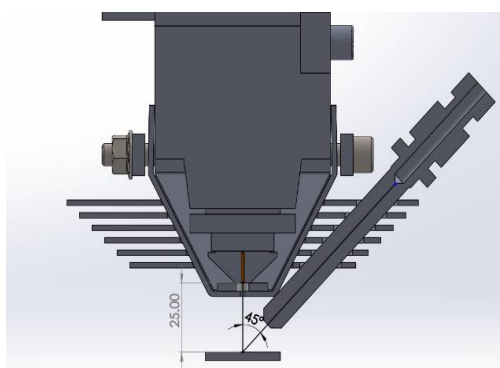


Fig. 1 The angle of the water jet with the laser and the distance of the laser nozzle from the workpiece

شکل 1 زاویه ورود واترجت با لیزر و فاصله نازل لیزر از قطعه کار

## 2-3- انجام آزمایش

در این فناوری ترکیبی، برای خروج ماده مذاب و خنک کاری بهتر، نازل واترجت باید در یک نقطه روی قطعه کار به هم

نتیجه رسیدند که از فرآیند لیزر-جت آب می توان برای این متریکال بدون هیچ گونه لایه تبلور مجدد استفاده کرد. همچنین جت آب نه تنها ماده را در انتهای هر پالس لیزر سرد می کند، بلکه به تسریع حذف ماده از منطقه تابش لیزر نیز کمک می کند [17]. به طور کلی در پژوهش های صورت گرفته به برتری کلی فرآیند لیزر-جت آب نسبت به لیزر معمولی، در خصوص کاهش منطقه متأثر از حرارت و کاهش پهنای شیار و بهبود کیفیت سطح اشاره شده است، اما تأثیر پارامترهای مختلف در فرآیند فوق، مغفول مانده است.

سه شاخص مهم برای نظر بر مفید یا غیر مفید بودن یک فرآیند تولیدی عبارتند از نرخ براده برداری، شرایط قطعه کار (صافی سطح و دقت ابعادی [18]) و هزینه ساخت، از این رو در این مقاله به صورت جامع پارامترهای برش کاری و واترجت، بر روی ماده CK75 بررسی شد و تأثیرات هر پارامتر بر منطقه متأثر از حرارت و پهنای شیار برش مشخص گردید. همان طور که بیان شد، در روش ماشین کاری با لیزر به کمک جت آب، محدودیت های لیزر در مقیاس میکرو کاهش می یابد ولی با توجه به تاریخچه مقالات، مطالعه ای در خصوص بر همکنش پارامترهای ماشین کاری از جمله سرعت برش، فاصله کانونی، توان لیزر و فشار جت آب بر روی فولادهای پرکربن انجام نشده است. در این مقاله از آلیاژ CK75 که یک فولاد فنی با درصد کربن بالا می باشد استفاده شده است. این فولاد در صنایع خودرو سازی و کشتی سازی کاربرد دارد. در برش فولاد CK75 عیوب ریز ساختاری شامل منطقه متأثر از حرارت به وجود می آید و همچنین در میکروماشین کاری این آلیاژ، نیاز به کنترل دقیق پهنای برش برای رسیدن به دقت های بالا می باشد. بنابراین، این مقاله به بررسی اثر پارامترهای ماشین کاری در فرآیند ترکیبی برش لیزر-جت آب به منظور کنترل پهنای برش و عمق HAZ، می پردازد.

## 2- متدولوژی تحقیق

### 1-2- فناوری و تجهیزات آزمایش

در این تحقیق از لیزر فایبر پیوسته با طول موج 1080 نانومتر، به همراه یک پرتو گاوسی با قطبش تصادفی<sup>1</sup> استفاده شد. حداکثر توان این ماشین 1500 وات، در فرکانس پالس 5 کیلو هرتز می باشد. فرکانس پالس لیزر را می توان از 1 تا 100 کیلوهرتز با حداقل مرحله 1 هرتز تغییر داد. برای اینکه جت آب

<sup>1</sup> Random polarization

کد قطعه کار	سرعت برشی (m/min)	توان لیزر (Watt)	فاصله کانونی (mm)	فشار پمپ واترجت (Bar)
A	1/0	1200	1	60
B	1/0	1275	2	80
C	1/0	1350	3	100
D	1/0	1425	4	120
E	1/5	1200	2	100
F	1/5	1275	1	120
G	1/5	1350	4	60
H	1/5	1425	3	80
I	2/0	1200	3	120
J	2/0	1275	4	100
K	2/0	1350	1	80
L	2/0	1425	2	60
M	2/5	1200	4	80
N	2/5	1275	3	60
O	2/5	1350	2	120
P	2/5	1425	1	100

برسند. بدین منظور یک فیکسچر مطابق شکل 2 طراحی و ساخته شد. آب پرفشار توسط یک پمپ پیستونی تولید می شود که قادر است فشار آب را تا 120 بار ایجاد کند.



Fig. 2 The hybrid laser- waterjet process on CK75

شکل 2 فرآیند ترکیبی لیزر - واترجت بر روی آلیاژ CK75

### 2-3-1- انتخاب پارامترهای ماشین کاری

سرعت برشی، توان، فاصله کانونی و فشار واترجت به عنوان 4 مؤلفه اصلی مورد بررسی قرار گرفتند. این انتخاب بر اساس موثرترین پارامترهایی که در پژوهش سایر محققان وجود داشت انتخاب شد. ضخامت قطعه کار 3 میلی متر و جنس آن از فولاد CK75 که دارای ساختار مارتنزیتی با مقادیر جزئی فریت می باشد، در نظر گرفته شده است. جدول 1 مقادیر متغیر هر پارامتر را نشان می دهد. این مقادیر طوری در نظر گرفته شده اند که عمل برش به طور کامل انجام شود. بدین منظور یک پیش آزمایش انجام شد و در آن بازه قابل قبول برای هر پارامتر به طور تجربی به دست آمد.

همان طور که در جدول 1 مشاهده می شود، برای هر پارامتر 4 سطح در نظر گرفته شده است. برای انجام آزمایش از طرح تاگوچی با آرایه های متعامد L16 استفاده شد. طبق آرایه های متعامد تاگوچی آزمایش ها مطابق جدول 2 صورت گرفت و برای هر آزمایش یک کد بر روی قطعه کار بر روی قطعات حکاکی شد.

جدول 1 پارامترها و سطوح انتخاب شده برای این مقاله

Table 1 Parameters and levels selected for this article

سرعت برشی (m/min)	توان لیزر (watt)	فاصله کانونی (mm)	فشار پمپ واترجت (Bar)
1	1200	1	60
1/5	1275	2	80
2	1350	3	100
2/5	1425	4	120

جدول 2 مقادیر پیشنهادی مدل تاگوچی برای هر پارامتر

Table 2 Suggested values of Taguchi model for each parameter

### 2-3-2- اندازه گیری عمق منطقه متأثر از حرارت

برای اندازه گیری عمق منطقه متأثر از حرارت نمونه ها سنباده کاری و پولیش شد و سپس با محلول نایتال 2 درصد ظاهر سازی صورت گرفت. از یک میکروسکوپ نوری دیجیتال با بزرگنمایی 5000 برابری استفاده شد و با اندازه گیری مناطق تغییر رنگ داده شده و تغییر ساختار داده شده در لبه های برش مقدار HAZ به دست آمد. (شکل 3)

### 2-3-3- اندازه گیری پهنای برش

به منظور اندازه گیری پهنای برش، بر روی قطعات یک شیار به صورت خط برش داده شد و با میکروسکوپ نوری دیجیتال با بزرگ نمایی 50 برابری و آنالیز تصاویر با رایانه ابعاد عمق شیار بر حسب میکرومتر بدست آمد. (شکل 4)

### 3- یافته های تحقیق

برای انجام کارآمد آزمایش ها، یک رویکرد علمی مؤثر برای طراحی آزمایش ها (DOE) لازم است. در این تحقیق، بوسیله طراحی آماری، فرآیند طراحی آزمایش ها انجام گرفته است. سپس داده های مورد نظر جمع آوری و با روش های آماری تجزیه و تحلیل شده است. مطالعه جدول واریانس برای تجزیه و تحلیل داده ها کمک می کند تا مشخص شود که کدام یک از پارامترها نیاز به کنترل دارند [19].

آزمایش تاگوچی، طرح آرایه متعامد شانزده تایی (L16) برای طراحی آزمایش‌ها انتخاب شده است که در آن چهار فاکتور با چهار سطح در نظر گرفته شده اند. بنابراین درجه آزادی برای پارامترها 3 است و در نتیجه برای کل پارامترها 12 درجه آزادی وجود دارد. همچنین خطاهای باقیمانده دارای درجه آزادی 3 هستند. در نهایت کل درجه آزادی برای عوامل و خطا، 15 درجه خواهد بود. شانزده آزمایش مطابق جدول 3 با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی انجام گرفته که برای اطمینان از حصول نتایج صحیح، هر کدام از آزمایش‌ها دو بار تکرار و میانگین آنها برای پاسخ‌ها در نظر گرفته شده است. در این مطالعه تمامی مراحل طراحی آزمایش‌ها، رسم نمودارها و آنالیزها با استفاده از نرم‌افزار آماری مینی‌تب انجام شده است. بعد از حصول نتایج آزمایش، ابتدا شایستگی مدل بررسی شد، سپس راجع به تأثیر هر کدام از متغیرهای ورودی بر پهنای شیار و پهنای HAZ بحث شد و نسبت سیگنال به نویز داده‌ها بررسی می‌گردد. در نهایت صحت‌سنجی انجام شده است.

جدول 3 نتایج انجام آزمایش

Table 3 Test results

سرعت برشی (m/min)	توان لیزر (Watt)	فاصله کانونی (mm)	فشار آب (Bar)	پهنای شیار ( $\mu\text{m}$ )	پهنای HAZ ( $\mu\text{m}$ )
1/0	1200	1	60	429	106
1/0	1275	2	80	428	187
1/0	1350	3	100	412	198
1/0	1425	4	120	454	210
1/5	1200	2	100	346	81
1/5	1275	1	120	367	116
1/5	1350	4	60	417	226
1/5	1425	3	80	425	206
2/0	1200	3	120	228	77
2/0	1275	4	100	306	180
2/0	1350	1	80	369	156
2/0	1425	2	60	415	200
2/5	1200	4	80	277	121
2/5	1275	3	60	281	168
2/5	1350	2	120	343	140
2/5	1425	1	100	359	159

### 3-1- بررسی شایستگی مدل

نمودار باقیمانده نموداری است که برای بررسی خوبی برازش داده‌ها استفاده می‌شود. برآورده شدن یا نشدن فرضیات حداقل مربعات معمولی از طریق نمودارهای باقی‌مانده مشخص می‌شوند.

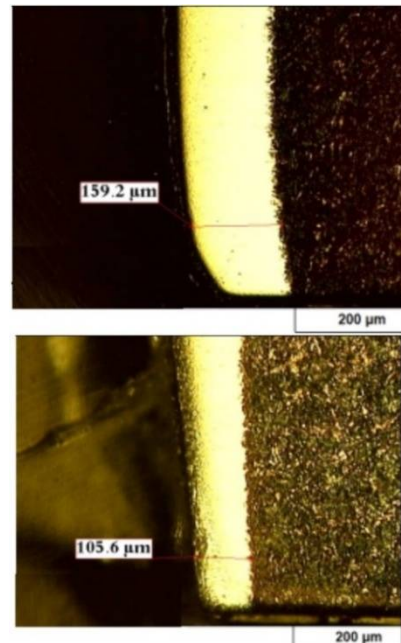


Fig. 3 Measurement of the HAZ region with a digital light microscope  
شکل 3 اندازه‌گیری منطقه HAZ با میکروسکوپ نوری دیجیتال

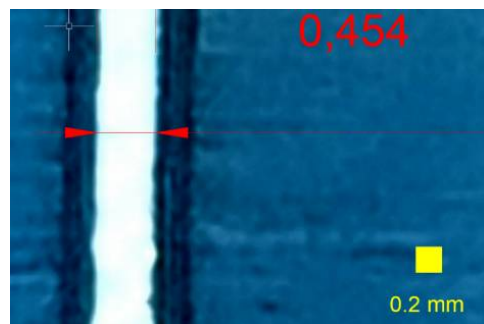


Fig. 4 Measurement of kerf width with digital light microscope  
شکل 4 اندازه‌گیری پهنای برش با میکروسکوپ نوری دیجیتال

تاگوچی دو راه مختلف را برای انجام تجزیه و تحلیل کامل، پیشنهاد می‌کند. اول روش استاندارد است که در آن نتایج اجرای آزمایش‌ها و یا میانگین نتایج به دست آمده از تکرارهای آزمایش‌ها به وسیله ANOVA<sup>1</sup> پردازش می‌شوند و روش دوم استفاده از نسبت سیگنال به نویز (S/N)<sup>2</sup> است [20].

پارامترهای ورودی در این تحقیق، سرعت برش، توان لیزر، فاصله کانونی لیزر و فشار آب در نظر گرفته شد. تأثیر آن‌ها را بر پهنای شیار و عمق HAZ بررسی شد. پهنای برش به مقداری از ماده که در ماشین کاری با لیزر حذف می‌شود، گفته می‌شود. HAZ به منطقه‌ای از فلز زیرلایه اشاره می‌کند که ذوب نشده است اما به دلیل سابقه حرارتی در طول فرآیند لیزر متحمل تغییرات ریزساختاری شده است. با توجه به روش طراحی

<sup>1</sup> Analysis of Variance

<sup>2</sup> Signal- to- Noise ratio

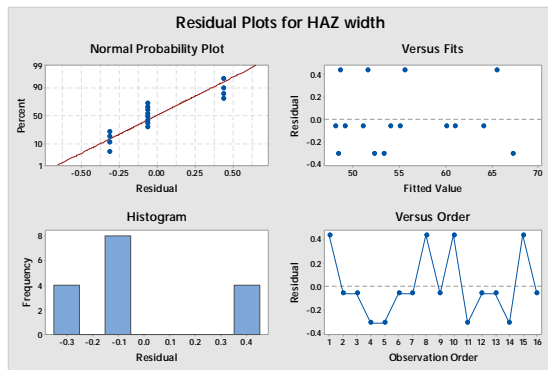


Fig. 6 Chart of residual of heat affected zone (HAZ)

شکل 6 نمودار باقیمانده‌های پهنای ناحیه متأثر از گرما (HAZ)

به بیان بهتر داده‌های این آزمایش با تقریب خوبی در این مدل به دست آمده است. بنابراین، شایستگی مدل آماری تأیید می‌شود.

### 2-3- بررسی تاثیر پارامترهای ورودی روی مشخصه‌های خروجی

شکل 7 تأثیر سرعت برش بر پهنای شیار را نشان داده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش سرعت برش، پهنای شیار کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه با افزایش سرعت، زمان برش کاهش می‌یابد، حرارت کمتری تولید شده و حوضچه مذاب کوچک‌تری تشکیل می‌شود. بنابراین پهنای شیار کاهش می‌یابد. البته در یک توان ثابت، سرعت برش از حد معینی نمی‌تواند تجاوز کند و در مقادیر بالای سرعت، برش کاری صورت نمی‌گیرد. در مورد پارامتر سرعت این‌طور می‌توان جمع‌بندی کرد که حداکثر سرعت ممکن برای برش کاری، کمترین میزان عمق شیار را به دنبال خواهد داشت و در فرآیندهای میکروماشین کاری پیش بینی دقیق‌تری میتوان بر روی جبران این مقدار داشت و قطعات دقیق‌تری تولید کرد.

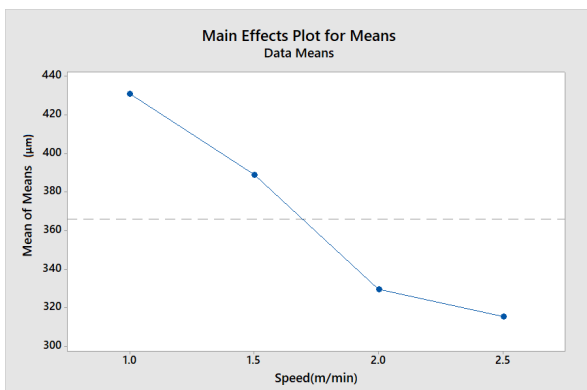


Fig. 7 The average value of the kerf width relative to the cutting speed

شکل 7 مقدار میانگین پهنای شیار نسبت به سرعت برش

اگر این مفروضات برآورده شوند، رگرسیون حداقل مربعات معمولی، تخمین‌های ضرایب مستقل با حداقل واریانس را ایجاد می‌کند. شکل 5، نمودارهای باقیمانده را برای پهنای شیار و شکل 6 برای ناحیه متأثر از گرما نشان می‌دهد.

از هیستوگرام باقیمانده‌ها<sup>1</sup> برای تعیین اینکه آیا داده‌ها دارای انحراف هستند یا اینکه آیا نقاط پرت در داده‌ها وجود دارد استفاده می‌شود. شکل‌های 5 و 6 نشان می‌دهند که نمودار هیستوگرام از توزیع نرمال پیروی میکند و داده‌ها به صورت متقارن هستند. این فرض که باقیمانده‌ها به طور معمول توزیع شده‌اند یا خیر توسط نمودار معمولی باقیمانده‌ها<sup>2</sup> تأیید می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های 5 و 6 مشخص است، تمامی باقیمانده‌ها با تقریب بالایی حول خط قرار گرفته‌اند و پراکندگی باقیمانده‌ها در مقادیر مختلف میباشد که ثابت می‌کند تصادفی‌سازی به خوبی صورت گرفته و ارتباط خاصی بین باقیمانده‌ها وجود ندارد.

برای تأیید این فرض که باقیمانده‌ها واریانس ثابتی دارند، از نمودار باقیمانده در مقابل برازش<sup>3</sup> استفاده می‌شود. این نمودار در شکل‌های 5 و 6 نشان می‌دهد که مقادیر باقیمانده به صورت پراکنده دور صفر هستند و بنابراین باقیمانده‌ها واریانس ثابتی دارند.

این فرض که باقیمانده‌ها با یکدیگر همبستگی دارند یا خیر، توسط نمودار باقیمانده در مقابل ترتیب<sup>4</sup> بررسی می‌شود. این نمودار در شکل‌های 5 و 6 نشان می‌دهد که باقیمانده‌ها از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند و نوسانات بسیاری میان داده‌ها وجود دارد.

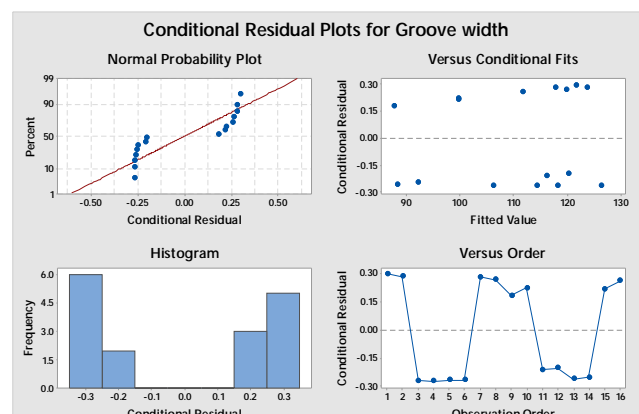


Fig. 5 Chart of residual of kerf with

شکل 5 نمودار باقیمانده‌های پهنای شیار

<sup>1</sup> Histogram of residuals

<sup>2</sup> Normal probability plot

<sup>3</sup> Residuals versus fits

<sup>4</sup> Residuals versus order of data

پهنای شیار شده است.

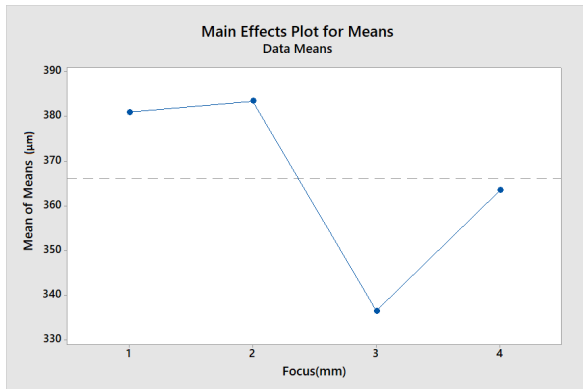


Fig. 9 The average value of the kerf width relative to the focal length  
شکل 9 مقدار میانگین پهنای شیار نسبت به فاصله کانونی

شکل 8 تأثیر توان بر پهنای شیار را نشان داده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش توان لیزر، پهنای شیار افزایش می‌یابد.

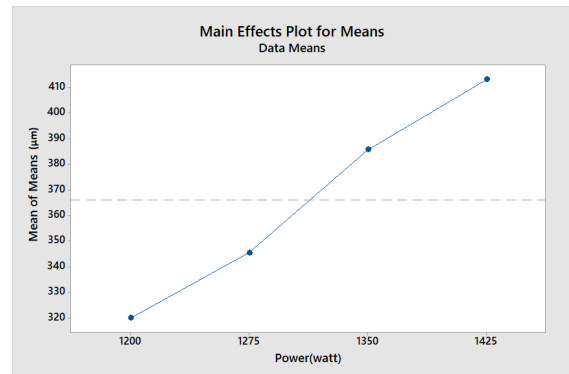


Fig. 8 The average value of kerf width relative to power

شکل 8 مقدار میانگین پهنای شیار نسبت به توان

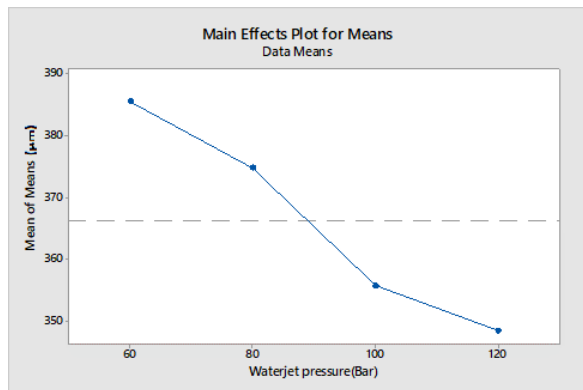


Fig. 10 The average value of the kerf width relative to the waterjet pressure

شکل 10 مقدار میانگین پهنای شیار نسبت به فشار واترجت

البته باید توجه داشت اگر چه کم‌ترین میزان پهنای برش در فشار 120 بار دیده می‌شود. فشار جت آب پایین‌ترین مرتبه را بین پارامترهای دیگر یعنی سرعت، توان و فاصله کانونی دارد و همچنین کمتر شدن شیب نمودار در فاصله 100 تا 120 بار نشان می‌دهد که، افزایش فشار آب بیش از 120 بار تأثیر به‌سزایی در کاهش عمق پهنای برش نداشته است.

نسبت سیگنال به نویز، پراکندگی پاسخ‌ها را نسبت به مقدار هدف در شرایط وجود اغتشاش یا نویز بررسی می‌کند. به همین‌خاطر هر چه مقدار سیگنال به نویز بیشتر باشد نشان‌دهنده کاهش تأثیر نویز است و در شرایط نویز صفر، مقدار پاسخ با مقدار هدف برابری می‌کند. حالت مطلوب در این تحقیق، دستیابی به پهنای شیار کمتر است؛ بنابراین در تحلیل داده به روش سیگنال به نویز، حالت کمتر - بهتر انتخاب می‌شود. با توجه به اطلاعاتی که از سیگنال به نویز داده‌ها به دست آمد، سرعت برش بیشترین تأثیر را بر پهنای شیار و فشار

با افزایش توان، حرارت تولید شده در نقطه برش افزایش یافته و باعث افزایش پهنای شیار می‌شود. دقیقاً بر عکس استدلالی که برای پارامتر سرعت بیان شد، این جا صادق است. در واقع در یک سرعت برشی ثابت هر چقدر با توان کم‌تری بتوان برش کاری را انجام داد، عمق شیار کم‌تری ایجاد می‌گردد. و همچنین این مقدار نباید از حد معینی کمتر باشد زیرا فرآیند به درستی انجام نمی‌شود. البته حدود در نظر گرفته شده برای این مقاله برای هر پارامتر طوری در نظر گرفته شده که عمل برش به صورت کامل انجام شود. به طور مثال برای پارامتر توان از 1200 وات تا 1425 وات، برش کاری به صورت کامل انجام می‌گردد.

مقدار میانگین پهنای شیار نسبت به فاصله کانونی در شکل 9 نمایش داده شده است.

با توجه به نمودار، پهنای شیار در فاصله کانونی 3 میلی‌متر به کمترین حد خود می‌رسد و با افزایش یا کاهش این مقدار پهنای شیار بیشتر می‌شود. زیرا پرتوهای لیزر در یک نقطه بر روی سطح قطعه کار متمرکز می‌شود. فاصله کانونی موقعیت این نقطه را تعیین می‌کند. در این آزمایش فاصله کانونی 3 میلی‌متر بهترین حالت است و با افزایش یا کاهش این فاصله نقطه متمرکز پرتوها به بالاتر یا پایین‌تر از سطح قطعه کار منتقل می‌شود و منطقه بزرگتری ذوب شده و پهنای شیار افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل 10 مشخص می‌شود با افزایش فشار واترجت، پهنای شیار کاهش می‌یابد. افزایش فشار واترجت باعث خروج سریع‌تر حوضچه مذاب شده در نتیجه باعث کاهش

با افزایش سرعت، فرصت کمتری برای انتقال حرارت ایجاد شده و در نهایت منطقه کوچکتری تحت تأثیر حرارت قرار می‌گیرد. بنابراین در این آزمایش بیشترین میزان سرعت برشی، به عنوان بهترین پارامتر در نظر گرفته می‌شود.

با افزایش توان، میزان حرارت ایجاد شده و در نتیجه اندازه‌ی حوضچه‌ی مذاب افزایش می‌یابد، بنابراین کمترین توان ممکن برای برش کاری باید در نظر گرفته شود تا بتوان به حداقل میزان عمق منطقه متأثر از حرارت دست یافت (شکل 13).

همان‌طور که برای پارامتر پهنای برش بیان شد، مقدار 3 میلی‌متر برای کمترین مقدار HAZ به دست آمد. با افزایش یا کاهش این فاصله پرتوها در نقطه‌ی خارج از سطح قطعه کار متمرکز شده‌اند و روی قطعه کار واگرا یا همگرا هستند، بنابراین منطقه بزرگتری را تحت حرارت قرار داده و عمق منطقه متأثر از حرارت (HAZ) افزایش می‌یابد (شکل 14).

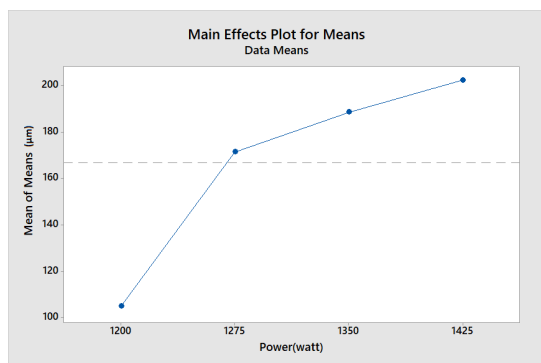


Fig. 13 The average value of the HAZ relative to the power

شکل 13 مقدار میانگین عمق ناحیه متأثر از حرارت نسبت به توان



Fig. 14 The average depth of the HAZ relative to the focal length

شکل 14 مقدار میانگین عمق ناحیه متأثر از حرارت نسبت به فاصله کانونی

با افزایش فشار واترجت، مقدار میانگین عمق منطقه متأثر از حرارت (HAZ) کاهش یافت (شکل 15). زیرا علاوه بر این که فشار آب باعث تخلیه زودتر مذاب می‌گردد و انتقال حرارتی کمتری به اطراف حوضچه‌ی مذاب انجام می‌پذیرد؛ خاصیت خنک‌کنندگی آب باعث می‌شود تا پس از تخلیه حوضچه‌ی

واترجت کمترین تأثیر را بر پهنای شیار دارد. شکل 11 نمودار سیگنال به نویز داده‌ها را برای پهنای شیار برش نشان داده است با توجه به اینکه هر چه نسبت سیگنال به نویز بیشتر باشد به شرایط بهینه نزدیک است، بنابراین شرایط بهینه برای رسیدن به پهنای برش کمتر، بیشترین مقدار هر پارامتر انتخاب می‌شود.

مقادیر بهینه پارامترها برای کمترین میزان پهنای شیار در جدول 4 آمده است.

همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت برشی مقدار میانگین عمق منطقه متأثر از حرارت کاهش می‌یابد.

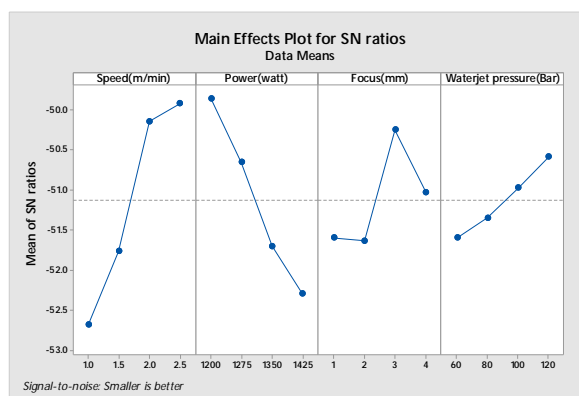


Fig. 11 Signal to noise of the kerf width

شکل 11 نمودار سیگنال به نویز پهنای شیار

جدول 4 مقدار بهینه پارامترها برای پهنای شیار کمتر

Table 4 Optimal value of parameters for less kerf width

فشار پمپ واترجت (Bar)	فاصله کانونی (mm)	توان لیزر (watt)	سرعت برشی (m/min)
120	3	1200	2/5

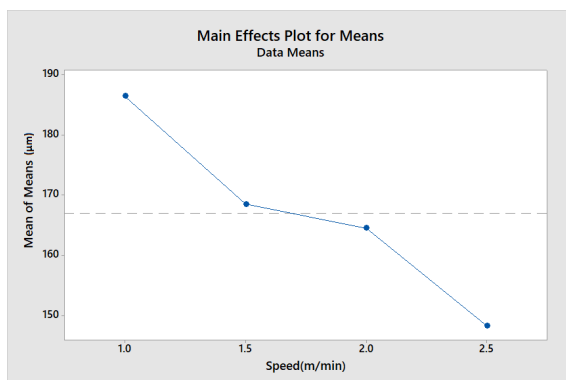


Fig. 12 The average value of the HAZ relative to velocity

شکل 12 مقدار میانگین عمق ناحیه متأثر از حرارت نسبت به سرعت



### 3-3-3- صحت سنجی

بعد از تعیین بهترین پارامترهای مورد ارزیابی، برای رسیدن به کمترین میزان پهنای شیار و عمق منطقه متأثر از حرارت، با استفاده از نرم افزار مینی تب، بهترین مقدار پهنای شیار و عمق HAZ در مدل تاگوچی تخمین زده می شود. از آنجا که این مقادیر جزء پارامترهای در نظر گرفته شده نبود، با انجام دوباره آزمایش با این مقادیر، پاسخها صحت سنجی می شوند. همان طور که از جدول 6 مشخص است درصد خطای پهنای شیار 2/3 و عمق ناحیه متأثر از حرارت 3/9 درصد است که ناچیز هستند و نشانگر آن است که مقادیر پاسخهای به دست آمده با تقریب خوبی به مقدار تخمین زده شده نزدیک اند. بنابراین صحت سنجی مدل تایید می گردد.

جدول 6 صحت سنجی آزمایش عمق HAZ و پهنای برش

Table 6 Validation test HAZ depth and cutting width

	مقدار تخمینی	مقدار واقعی	درصد خطا
پهنای شیار	222/125	217	% 2/3
عمق HAZ	56/68	59	% 3/9

### 4- نتیجه گیری

برش لیزر یک روش دقیق و ارزان قیمت نسبت به سایر روشهای ماشین کاری می باشد. یکی از محدودیت های برش لیزر ایجاد ناحیه متأثر از حرارت در قطعات برش خورده می باشد. همچنین در این فرآیند پیش بینی پهنای برش به منظور جبران شعاع ابزار و تولید قطعات با دقت میکرون ضروری می باشد. به منظور کاهش عمق منطقه متأثر از حرارت و کاهش پهنای برش و یکنواخت نمودن آن از ترکیب واترجت و لیزر استفاده شد. واترجت به خروج ماده ذوب شده از منطقه برش کمک نموده و حرارت ناشی از پرتو لیزر را کاهش می دهد. بنابراین، مقدار پهنای برش و عمق HAZ کاهش می یابد. این مقاله به بررسی اثر پارامترهای ماشین کاری در فرآیند ترکیبی لیزر-جت آب بر روی مقدار پهنای برش و عمق HAZ پرداخت. از این رو، از یک واترجت با فشار 120 بار، متصل به نازل فولادی به قطر 0/4 میلی متر استفاده شد. واترجت با زاویه 45 درجه نسبت به محور پرتوهای لیزر و با سرعت 176 متر بر ثانیه به نقطه مذاب وارد شده و علاوه بر خنک کنندگی سطح باعث خروج یکنواخت تر ماده نسبت به حالت لیزر خشک می گردد. در این تحقیق اثر پارامترهای سرعت برشی، توان، فاصله کانونی و فشار آب بر عمق منطقه متأثر از حرارت و پهنای برش، بررسی شد. ملاحظه شد که با افزایش سرعت برش و با کاهش توان عمق منطقه متأثر از حرارت کاهش می یابد. همچنین با افزایش فشار جت آب تا 100 بار به دلیل خروج بهتر مذاب و انتقال حرارت بهتر عمق منطقه

مذاب قسمت های اطراف آب سریع تر خنک شوند و عمق منطقه متأثر از حرارت کاهش یابد. در اینجا مرتبه تأثیرگذاری پارامتر فشار آب برای عمق منطقه متأثر از حرارت بیشتر می باشد. همان طور که بیان شد جدول سیگنال به نویز میزان تأثیر هر پارامتر ورودی را بر روی پارامتر خروجی نشان می دهد. با توجه به اطلاعاتی که از سیگنال به نویز داده ها برای پارامتر عمق منطقه متأثر از حرارت به دست آمد (شکل 16)، توان، بیشترین و فاصله کانونی کمترین تأثیر را بر عمق منطقه متأثر از حرارت دارد. همچنین مرتبه پارامتر فشار آب در این آزمایش به مرتبه دوم تأثیرگذاری رسید. با توجه به نسبت های سیگنال به نویز، بهینه ترین شرایط آزمایش مطابق جدول 5 خواهد بود.

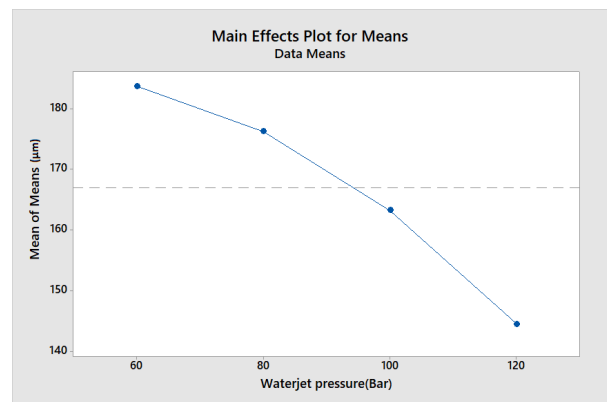


Fig. 15 The average depth of the HAZ relative to the waterjet pressure

شکل 15 مقدار میانگین عمق ناحیه متأثر از حرارت نسبت به فشار واترجت

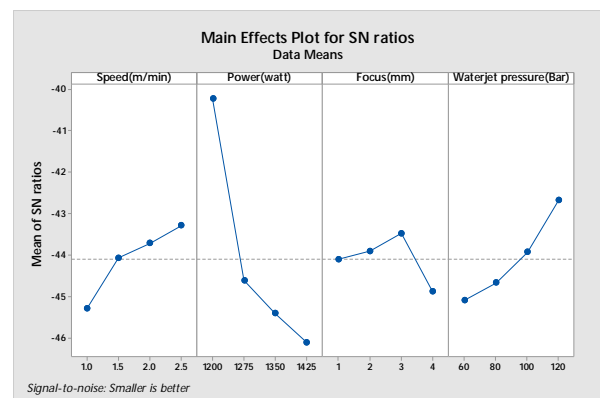


Fig. 16 Signal to noise of the HAZ

شکل 16 نمودار سیگنال به نویز عمق منطقه متأثر از حرارت (HAZ)

جدول 5 مقدار بهینه پارامترها برای عمق منطقه متأثر کمتر

Table 5 Optimal value of parameters for depth of the HAZ

فشار پمپ واترجت (Bar)	فاصله کانونی (mm)	توان لیزر (watt)	سرعت برشی (m/min)
120	3	1200	2/5

- متأثر از حرارت کاهش یافت. در فاصله کانونی 3 میلی‌متر، کمترین مقدار HAZ دیده شد و مشاهده شد که با افزایش یا کاهش این فاصله، منطقه متأثر از حرارت بیشتر می‌گردد. میزان تأثیرگذاری سرعت برش بیشترین اثر را بر روی کاهش منطقه متأثر از حرارت دارد و کمترین اثرگذاری مربوط به فشار جت آب می‌باشد. همچنین مشاهده شد که، بیشترین میزان تأثیرگذاری بر روی پهنای برش، توان لیزر می‌باشد. با افزایش توان لیزر، پهنای برش افزایش می‌یابد. توان 1200 وات با سرعت برشی 2/5 متر بر دقیقه به عنوان بهترین حالت برای حداقل پهنای برش بدست آمد. همچنین با افزایش فشار جت آب، سرعت دفع حرارت بیشتر شده، ماده کمتری توسط لیزر ذوب می‌شود و ماده مذاب با سرعت بیشتری از قطعه کار خارج می‌گردد. بنابراین پهنای برش کاهش می‌یابد. همچنین نشان داده شد که با کاهش یا افزایش فاصله کانونی از مقدار 3 میلی‌متر، به دلیل واگرا شدن و یا همگرا شدن پرتوی لیزر روی سطح قطعه کار، پهنای برش افزایش می‌یابد و به ازای یک میلی‌متر کاهش یا افزایش از این مقدار، عمق HAZ تا 13 درصد و پهنای برش تا 14 درصد افزایش یافت. در بهترین حالت عمق HAZ، 57 میکرومتر و پهنای برش، 217 میکرومتر به دست آمد.
- ### 5- مراجع
- [1] H. Soleimanimehr, M. Mirzaei, M. Ghani, F. Sattari, A. Forouzan Najafabadi, Micro-Grooving of Aluminum, Titanium and Magnesium Alloys by Acidithiobacillus Ferrooxidans Bacteria, *Advanced journal of science and engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 16-19, 2020.
  - [2] Y. K. Madhukar, S. Mullick, and A. K. Nath, An investigation on co-axial water-jet assisted fiber laser cutting of metal sheets, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 77 pp. 203-218, 2016.
  - [3] W. Yufeng, Z. Zhang, G. Zhang, B. Wang, W. Zhang, Study on immersion waterjet assisted laser micromachining process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 262 pp. 290-298. 2018
  - [4] Y. Z. Liu, Coaxial waterjet-assisted laser drilling of film cooling holes in turbine blades, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 150 No. 103510. 2020
  - [5] Ch. Bai, D. Ye, L. Yuan, L. Jingyi, X. Junjie, L. Qiang, Y. Lijun, Coaxial helical gas assisted laser water jet machining of SiC/SiC ceramic matrix composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 293, No.117067, 2021
  - [6] Y. Liu, M. Wei, T. Zhang, H. Qiao, H. Li, Overview on the development and critical issues of water jet guided laser machining technology, *Optics & Laser Technology*, Vol. 137, No. 106820, 2021
  - [7] G. Zhang, Z. Zhang, Y. Wang, C. Guo, and W. Zhang, Gas shrinking laminar flow for robust high-power waterjet laser processing technology, *Optics express* Vol. 27, No. 26, pp. 38635-38644, 2019.
- [8] Z. Liao, D. Xu, D. Axinte, J. Diboine, A. Wretland, Surface formation mechanism in waterjet guided laser cutting of a Ni-based superalloy, *CIRP Annals*, Vol. 70, No. 1, pp. 155-158, 2021.
  - [9] Sun, Dong, et al, Surface integrity of water jet guided laser machining of CFRP, *Procedia CIRP*, Vol. 71 pp.71-74. 2018
  - [10] D. Sun, F. Han, W. Ying, Ch. Jin, The experimental investigation of water jet-guided laser cutting of CFRP, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 102, No.1, pp.719-729, 2019
  - [11] S. Marimuthu, J. Dunleavy, Y. Liu, B. Smith, A. Kiely, M. Antar, Water-jet guided laser drilling of SiC reinforced aluminium metal matrix composites, *Journal of Composite Materials*, Vol. 53, No. 26-27, pp.3787-3796, 2019.
  - [12] Sh. Feng, Ch. Huang, J. Wang, Z. Jia, Surface quality evaluation of single crystal 4H-SiC wafer machined by hybrid laser-waterjet: Comparing with laser machining, *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 93 pp.238-251, 2019.
  - [13] B. Guo, J. Zhang, M. Wu, Q. Zhao, H. Liu, A. Monier, J. Wang, Water assisted pulsed laser machining of micro-structured surface on CVD diamond coating tools, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 56, pp.591-601, 2020.
  - [14] T. Jiang, Ch. Yang, Y. Yu, B. S. Doumbia, J. Liu, Y. Ma, Prediction and Analysis of Surface Quality of Northeast China Ash Wood during Water-Jet Assisted CO Laser Cutting, *Journal of Renewable Materials*, Vol. 9, No.1, pp.119, 2021.
  - [15] Y. Wu, G. Zhang, J. Wang, Y. Chao, W. Zhang, The cutting process and damage mechanism of large thickness CFRP based on water jet guided laser processing, *Optics & Laser Technology*, Vol. 141 pp.107140. 2021.
  - [16] B. Erdem, S. Levent, G. Aydemir, D. Jeremie, O. O. Can, Water Jet Guided Laser vs. Conventional Laser: Experimental Comparison of Surface Integrity for Different Aerospace Alloys, *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, Vol. 16, No.1, pp. 1-7, 2021.
  - [17] S. Marimuthu, B. Smith, Water-jet guided laser drilling of thermal barrier coated aerospace alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 113, No.1, pp.177-191, 2021.
  - [18] H. Soleimanimehr, Analysis of the cutting ratio and investigating its influence on the workpiece's diametrical error in ultrasonic-vibration assisted turning, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 235, pp. 640-649, 2021.
  - [19] P.J. Ross, *Taguchi techniques for quality engineering*, New York: McGraw-HillBook Company. 1988
  - [20] R.K. Roy, *A primer on Taguchi method*, NewYork: Van Nostrand Reinhold, 1990