



Analysis and Investigation of Environmental Conditions in Fiber Laser Drilling of Hastelloy X Superalloy Sheets

Mostafa Ghadimi Dafrazi^{1*}, Masoud Barkat¹, Reza Shoja Razavi^{1,2}, Ali Khoram¹ and Mohammad Erfanmanesh¹

1- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran

2- Department of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, Faculty of Science and Engineering, University of Nottingham, Ningbo, People's Republic of China

* Corresponding author, Email: m.ghadimid@gmail.com

(Received: 21 April 2026; Revised: 15 August 2026; Accepted: 16 August 2026; Available online: 23 September 2026)

ABSTRACT

Introduction and Objectives: Laser drilling is widely used in the aerospace, energy, and medical industries because of its high precision and ability to machine advanced materials. However, the formation of a recast layer, molten material redeposition, and deterioration of hole wall quality remain major challenges in nickel-based superalloys. This study investigated the effects of the processing environment and the application of a magnetic field on the morphological quality of laser-drilled holes in Hastelloy X superalloy using a fiber laser.

Materials and Methods: Single-pulse laser drilling experiments were performed on 1-mm-thick Hastelloy X sheets under three processing conditions including argon shielding gas, argon shielding gas with distilled water, and argon shielding gas with distilled water under a magnetic field. The inlet, outlet, sidewall, and longitudinal cross-sectional morphologies of the holes were examined using scanning electron microscopy, while changes in chemical composition were analyzed by energy-dispersive X-ray spectroscopy.

Results: The results showed that the processing environment significantly affected molten material behavior, recast layer formation, hole wall quality, and elemental distribution. The use of distilled water reduced molten material redeposition and improved hole wall uniformity. Furthermore, applying a magnetic field guided the molten material flow resulted in fewer surface discontinuities and a more uniform hole wall morphology. energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis indicated that compositional changes were mainly confined to the regions adjacent to the hole, whereas the base metal exhibited no significant changes.

Conclusion: The results of this research indicated that combined use of distilled water and a magnetic field improved the morphological quality of laser-drilled holes by controlling molten material behavior and reducing its redeposition. This approach can serve as an effective method for enhancing the quality of laser drilling in nickel-based superalloys for engineering applications.

Keywords: Laser drilling, Hastelloy X superalloy, Magnetic field, Water-assisted laser drilling, Surface morphology.

How to Cite: Ghadimi Dafrazi M, Barkat M, Shoja Razavi R, Khoram A, Erfanmanesh M. Analysis and investigation of environmental conditions in fiber laser drilling of hastelloy X superalloy sheets. J Adv Mater Eng. 2027;46(1):113–126 (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jame.46.1.1194>

Copyright © 2027 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



تحلیل و بررسی شرایط محیطی در سوراخ کاری لیزری روی ورق سوپرآلیاژ هستلوی ایکس با استفاده از لیزر فیبری

مصطفی قدیمی دفرازی^{۱*}، سید مسعود برکت^۱، رضا شجاع رضوی^{۱،۲}، علی خرم^۱ و محمد عرفان منش^۱

۱- مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، مواد و ساخت تولید، دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه نائینگهام نینگبو، جمهوری خلق چین

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m.ghadimid@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۵/۲/۱، بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۲۵، انتشار: ۱۴۰۵/۷/۱)

چکیده

مقدمه و اهداف: سوراخ کاری لیزری، به دلیل دقت و قابلیت ماشین کاری مواد پیشرفته، در صنایع هوافضا، انرژی و پزشکی کاربرد دارد. با این حال، تشکیل لایه بازمنجمدشده، بازرسوب مذاب و کاهش کیفیت دیواره سوراخ، از مهم ترین چالش های این فرایند در سوپرآلیاژهای پایه نیکل است. در این پژوهش، تأثیر محیط فرایند و اعمال میدان مغناطیسی بر کیفیت ریخت شناسی سوراخ های هستلوی ایکس (X) با استفاده از لیزر فیبری بررسی شد.

مواد و روش ها: آزمایش های سوراخ کاری تک پالس روی ورق یک میلی متری سوپرآلیاژ هستلوی X، در سه شرایط شامل گاز محافظ آرگون، گاز محافظ همراه با آب مقطر و گاز محافظ همراه با آب مقطر تحت میدان مغناطیسی انجام شد. ریخت شناسی ورودی، خروجی، دیواره و مقطع طولی سوراخ ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی و تغییرات ترکیب شیمیایی با طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس ارزیابی شد.

یافته ها: نتایج نشان داد شرایط محیطی فرایند بر رفتار مذاب، تشکیل لایه بازمنجمدشده، کیفیت دیواره سوراخ و توزیع عناصر تأثیرگذار است. استفاده از آب مقطر موجب کاهش بازرسوب مذاب و بهبود یکنواختی دیواره شد. همچنین، اعمال میدان مغناطیسی با هدایت جریان مذاب، ناپیوستگی های سطحی را کاهش داد و ریخت شناسی دیواره را یکنواخت تر کرد. نتایج طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس نیز نشان داد تغییرات ترکیب شیمیایی، عمدتاً به نواحی مجاور سوراخ محدود بوده و فلز پایه تغییر محسوسی نداشت.

نتیجه گیری: نتایج این پژوهش نشان می دهد استفاده از آب مقطر و میدان مغناطیسی با کنترل رفتار مذاب و کاهش بازرسوب آن، کیفیت ریخت شناسی سوراخ های ایجادشده را بهبود می دهد. این روش می تواند راهکاری موثر برای افزایش کیفیت سوراخ کاری لیزری سوپرآلیاژهای پایه نیکل در کاربردهای مهندسی باشد.

واژه های کلیدی: سوراخ کاری لیزری، سوپرآلیاژ هستلوی X، میدان مغناطیسی، سوراخ کاری لیزری مبتنی بر کمک آب، ریخت شناسی سطح.



۱- مقدمه

هستلوی X، یک سوپرآلیاژ پایه نیکل از نوع محلول جامد، به دلیل مقاومت حرارتی و اکسیداسیونی فوق العاده، انتخابی ایده آل برای ساخت اجزای موتورهای توربین گاز محسوب می شود. بسیاری از این اجزاء نیازمند تعداد قابل توجهی سوراخ خنک کننده هستند؛ از این رو، هستلوی X به بستری مناسب برای مطالعات مرتبط با فرایندهای سوراخ کاری لیزری تبدیل شده است (۱) و (۲). اغلب از این سوپرآلیاژ در ساخت محفظه های احتراق و خروجی موتورهای هوایی در صنایع هوایی، دیواره کوره های عملیات حرارتی و همچنین در صنایع شیمیایی استفاده می شود (۳). تحقیقات انجام شده توسط محققان مختلف همچون بهرا و همکاران (۴)، وانگ و همکاران (۵)، تان و همکاران (۶)، وو و همکاران (۷) و مندیراتا و همکاران (۸) بر سوراخ کاری لیزری مواد مختلف، حاکی از بهبود کیفیت سوراخ های ایجاد شده به واسطه حضور آب در محیط سوراخ کاری است. بهرا و همکاران نشان دادند که سازوکار حفاری لیزری با کمک آب، عمدتاً شامل انتقال (جذب) انرژی لیزر در مایع، گرم شدن و تبخیر مایع، تشکیل، رشد و از بین رفتن حباب ها و همچنین گرم شدن، ذوب و تبخیر مواد است. سایر پژوهشگران نیز کیفیت بالای سوراخ های ایجاد شده، عدم بروز ترک و ریزش مواد سطحی و همچنین عدم تشکیل ناحیه متأثر از حرارت^۱ را از جمله مزایای استفاده از آب در محیط سوراخ کاری گزارش کرده اند (۵، ۷ و ۹).

وانگ و همکاران (۱۰)، نشان دادند که روش با کمک مغناطیسی می تواند کیفیت و کارایی حفاری لیزری را بهبود بخشد. میدان مغناطیسی همچنین می تواند زاویه مخروطی سوراخ را کاهش داده و کیفیت دیواره جانبی سوراخ را در طول حفاری سوراخ با لیزر بهبود بخشد.

این پژوهش بر مقایسه روش های مختلف سوراخ کاری لیزری بر روی سوپرآلیاژ هستلوی X با ضخامت یک میلی متر تمرکز دارد. سه محیط بررسی شد: (۱) گاز محافظ آرگون، (۲) گاز محافظ از بالا همراه با آب مقطر از پایین و (۳) روش ترکیبی نوین شامل گاز محافظ از بالا، آب مقطر از پایین و اعمال میدان مغناطیسی.

این روش ترکیبی سوم، به عنوان رویکردی برتر و منحصر به فرد، تاکنون در هیچ تحقیق دیگری گزارش نشده است. هدف اصلی، ارزیابی تاثیر این محیط های متفاوت بر هندسه سوراخ (شامل قطر ورودی، قطر خروجی و دیواره) می باشد. نتایج نشان می دهد که روش ترکیبی، به دلیل حذف لایه دوباره منجمد شده، رفع ترک های دیواره و حفره ها و بهبود چشمگیر ریخت شناسی سوراخ، عملکردی به مراتب بهتر از دو روش دیگر دارد. این تحقیق، ضمن ارائه روشی نوین و گزارش نشده، برتری قابل توجه این فناوری هیبریدی را در فرایند سوراخ کاری لیزری اثبات می کند.

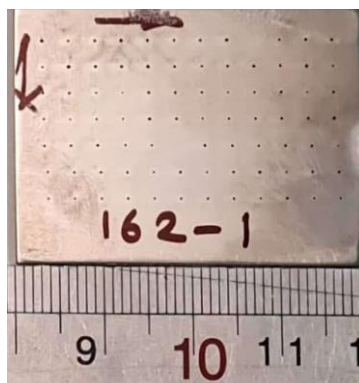
۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ورق سوپرآلیاژ هستلوی X به عنوان ماده اولیه، برای سوراخ کاری لیزری استفاده شده است. در جدول (۱)، درصد وزنی عناصر سوپرآلیاژ هستلوی X با استفاده از روش کوانتومتری برای شناسایی و تأیید جنس مواد^۲ اندازه گیری و ارائه شده است (۱۱). این آلیاژ به ابعاد $40\text{mm} \times 30\text{mm}$ برش داده و نمونه های تهیه شده قبل از انجام فرایند سوراخ کاری با استفاده از استون شسته شده است. فرایند سوراخ کاری با استفاده از دستگاه فیبری با طول موج 1030 نانومتر، قطر لکه پرتو 20 میکرومتر و گاز محافظ آرگون انجام و برای انجام این فرایند قطر نازل 0.8 میلی متر، زمان فرایند 1000 میلی ثانیه، لیزر فیبری با مدولاسیون پهنای پالس^۳ به کار گرفته شد. فرکانس تکرار پالس برابر یک هرتز و عرض هر پالس 100 میلی ثانیه تنظیم شد؛ به این معنا که در هر ثانیه یک پالس لیزر با مدت زمان 100 میلی ثانیه به سطح قطعه کار اعمال گردید. همچنین، موقعیت کانونی پرتو روی مثبت یک میلی متر تنظیم شد؛ به گونه ای که نقطه کانونی پرتو لیزر یک میلی متر بالاتر از سطح قطعه کار قرار داشت و به روش تک پالس اجرا گردید. تصویر نمونه ورق سوراخ کاری شده در شکل (۱) نشان داده شده است.

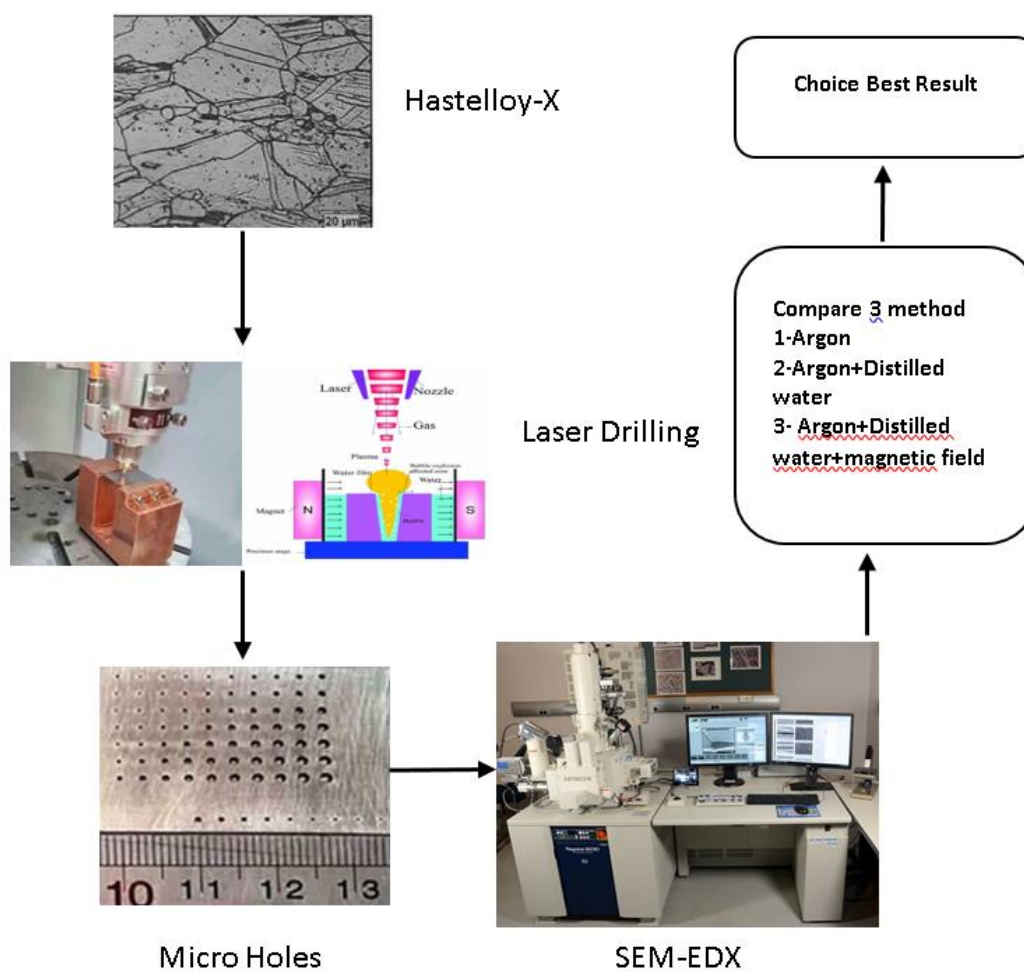
شکل (۲)، طرحواره ای از روندنمای انجام پژوهش را نشان می دهد. برای بررسی تاثیر محیط بر مشخصات سوراخ های

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ هستلوی ایکس (۱۱)

W	Co	Al	Ti	Fe	Mo	Ni	Cr	Si	S	P	Mn	C
۰٫۴۱	۱٫۲۳	۰٫۱	۰٫۰۴	۱۹٫۹۵	۸٫۹۸	Bal.	۲۱٫۵	۰٫۹۴	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۱۹	۰٫۰۷



شکل ۱- تصویر نمونه ورق سوراخ کاری شده.



شکل ۲- روند نمای فرایند سوراخ کاری لیزری.

گاز آرگون به عنوان محافظ در محیط فرایند سوراخ کاری، نمونه تهیه شد. تصویر مقطع برش طولی سوراخ در نمونه تهیه شده در شکل (۳) نشان داده شده است.

گازهایی نظیر آرگون، نیتروژن و هلیوم به منظور جلوگیری از اکسیداسیون و کاهش آلودگی در محل سوراخ کاری به کار می روند. این گازها معمولاً از طریق نازلی هم محور با پرتو لیزر به ناحیه فرایند دمیده می شوند و علاوه بر تخلیه مواد مذاب، از تشکیل پسماند (تجمع مواد در لبه های سوراخ) جلوگیری می کنند (۱۸ و ۱۹). در میان این گازها، آرگون به دلیل اثر خنک کنندگی ملایم تر نسبت به نیتروژن و هلیوم، به کنترل بهتر HAZ کمک کرده و با جلوگیری از سرمایش سریع، احتمال بروز تغییرات متالورژیکی نامطلوب و ترک های حرارتی را کاهش می دهد (۱۸ و ۲۱). علاوه بر این، در توان های بالای لیزر، تشکیل پلازما در بالای سطح قطعه می تواند موجب جذب یا پراکندگی بخشی از انرژی پرتو و کاهش راندمان فرایند شود. استفاده از آرگون به عنوان گاز محافظ، با کنترل رفتار پلازما، کاهش برهم کنش آن با پرتو لیزر و ایجاد محیطی پایدار و عاری از اکسیژن، به افزایش پایداری فرایند سوراخ کاری و بهبود کیفیت سوراخ های ایجاد شده کمک می کند (۲۰، ۱۸ و ۲۲). برای مشاهده نمونه ای از تأثیر گاز آرگون، دهانه ورودی سوراخ ایجاد شده در این شرایط در شکل (۴-الف) و همچنین تصویر خروجی سوراخ ایجاد شده تحت محافظت گاز آرگون در شکل (۴-ب) نشان داده شده است.

شکل (۵)، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و نتایج آنالیز خطی EDS مربوط به نمونه سوراخ کاری شده در حضور گاز محافظ آرگون را نشان می دهد. در تصاویر SEM، در مجاورت دیواره سوراخ لایه ای با ریخت شناسی نامنظم و زبر مشاهده می شود که بیانگر وقوع ذوب و انجماد سریع در طی فرایند سوراخ کاری لیزری است. همچنین، نتایج آنالیز خطی EDS، تغییرات موضعی در توزیع عناصر و افزایش نسبی غلظت اکسیژن در این ناحیه را نشان می دهد که احتمال وقوع اکسیداسیون موضعی را مطرح می کند. با این حال، بر اساس داده های EDS، تعیین قطعی ماهیت فازهای تشکیل شده یا

ایجاد شده، از عوامل محیطی موثر شامل گاز محافظ آرگون، آب مقطر از کف و همچنین اعمال میدان مغناطیسی حین فرایند سوراخ کاری استفاده شد. میدان مغناطیسی مورد نظر، با استفاده از دو آهنربای نئودیمیوم (با قطر ۲۰ میلی متر و ضخامت ۱۰ میلی متر) و با شدت میدان مغناطیسی در مرکز آهنربا برابر ۱۵۰ میلی تسلا اعمال گردید. طرحواره فرایند سوراخ کاری لیزری، شامل خنک کاری با آب مقطر از کف و اعمال میدان مغناطیسی، در شکل (۲) نمایش داده شده است.

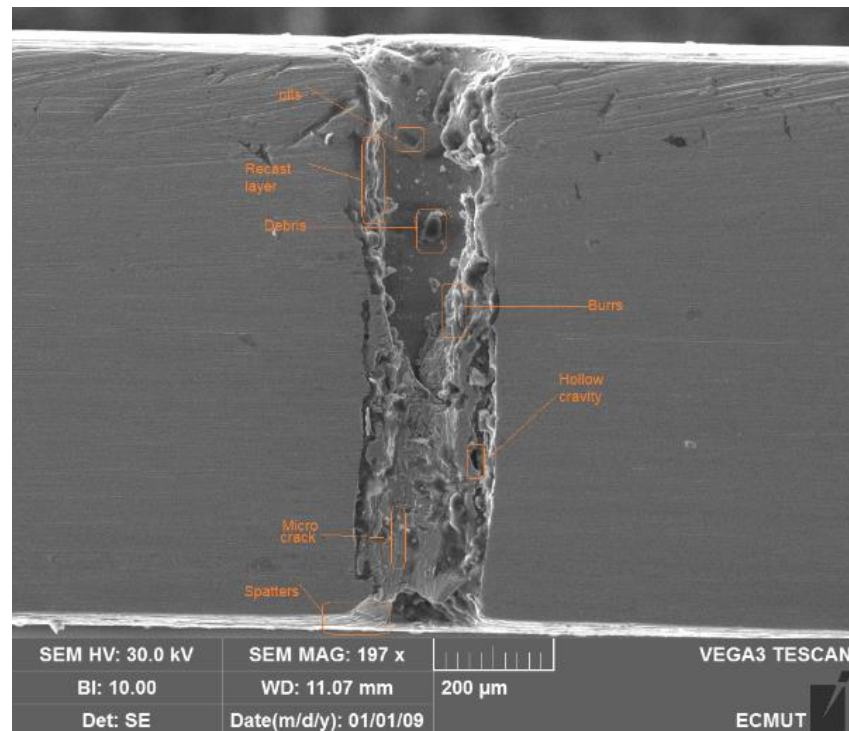
به منظور تحلیل ریخت شناسی سطح دیواره سوراخ ایجاد شده در شرایط محیطی مختلف از قبیل محیط سوراخ کاری تحت گاز محافظ آرگون، گاز محافظ از بالا و آب مقطر از پایین، گاز محافظ از بالا، آب مقطر و مغناطیس از پایین، سوراخ هایی روی نمونه در محیط های ذکر شده انجام شد که در شکل (۱) آمده است و برای مطالعه ریخت شناسی سوراخ های ایجاد شده، ورودی، خروجی و برای بررسی سطح مقطع سوراخ ها، ابتدا نمونه ها با استفاده از دستگاه وایر کات از مرکز سوراخ برش داده شد و پولیش گردید سپس از دستگاه میکروسکپ الکترونی روبشی^۴ برای بررسی و عکس برداری استفاده شد و همچنین برای آنالیز خطی طیف سنجی نمونه ها، از دستگاه SEM و طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس^۵ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

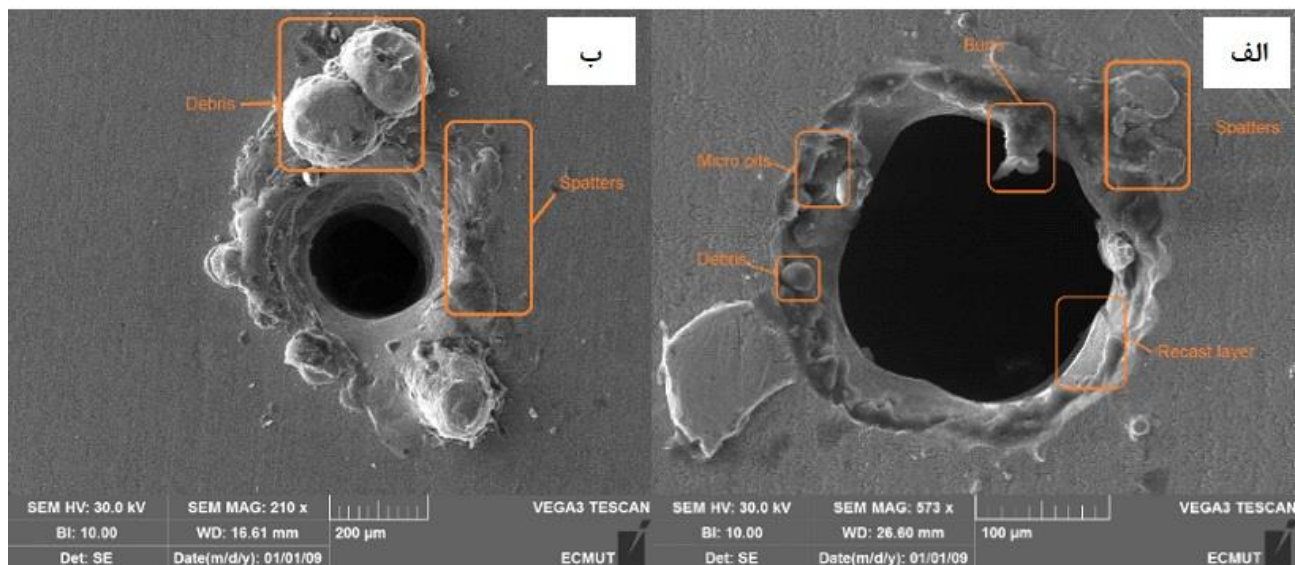
در این تحقیق سه محیط سوراخ کاری تحت گاز محافظ آرگون، محیط سوراخ کاری تحت گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف و محیط سوراخ کاری تحت گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف در یک میدان مغناطیسی، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت که در ادامه به بررسی آن ها پرداخته می شود.

۳-۱- محیط سوراخ کاری تحت گاز محافظ آرگون

جهت تحلیل و بررسی اثر محیط سوراخ کاری بر سوراخ های ایجاد شده، از شرایط بهینه (قطر سوراخ ۲۵۰ میکرومتر) به دست آمده استفاده شد (۱۲) و تحت این شرایط و استفاده از



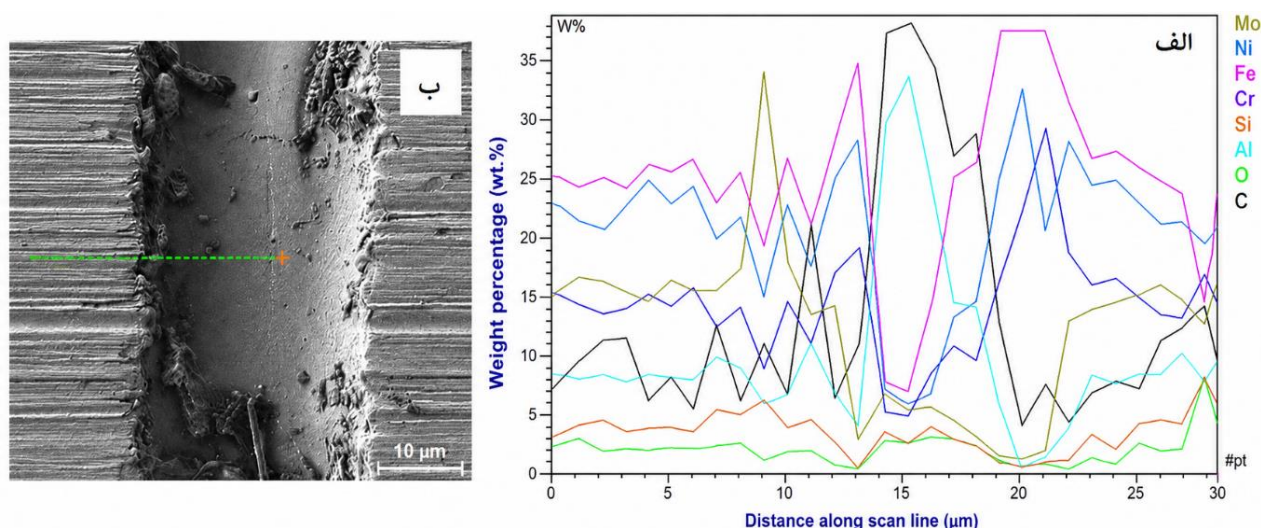
شکل ۳- تصویر مقطع برش طولی تحت محافظت گاز آرگون.



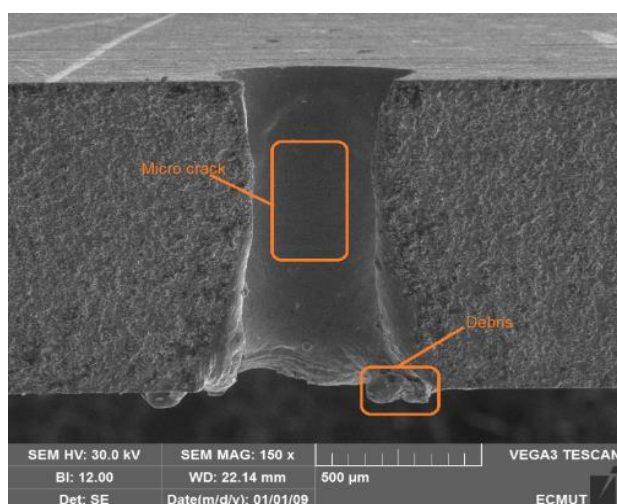
شکل ۴- دهانه ورودی (الف) و دهانه خروجی (ب) سوراخ ایجاد شده در حضور گاز محافظ آرگون.

اکسیداسیون می‌کاهد، اما تغییرات موضعی ناشی از چرخه‌های حرارتی شدید و انجماد سریع در مجاورت دیواره سوراخ همچنان قابل مشاهده است؛ نتایج مشابهی نیز در مطالعات پیشین گزارش شده است (۱۳).

تغییرات ریزساختاری امکان‌پذیر نیست و این موضوع نیازمند آزمون‌های تکمیلی مانند پراش پرتو ایکس^۶ و یا طیف‌سنجی فوتوالکترونی پرتو ایکس^۷ است. در مجموع، نتایج شکل (۵)، بیانگر آن است که استفاده از گاز محافظ آرگون اگرچه از شدت



شکل ۵- آنالیز خطی طیف‌سنجی توزیع انرژی (الف) به همراه مسیر آنالیز (ب)، مربوط به سوراخ‌های تشکیل شده در حضور گاز محافظ آرگون.



شکل ۶- تصویر مقطع برش طولی سوراخ در محیط گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف.

حاضر نیز آب موجود در محیط اولاً سبب جذب حرارت اضافه از سطح ماده می‌شود و در ادامه این حرارت سبب شکل‌گیری حباب‌هایی می‌گردد که مواد حاصل از سوراخ‌کاری را از سطح دور می‌کند. به همین علت در نمونه‌های حاصل، مواد اضافی اطراف سوراخ کاهش یافته و همچنین منطقه متاثر از حرارت دیده نمی‌شود. تأثیرات آب مقطر را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

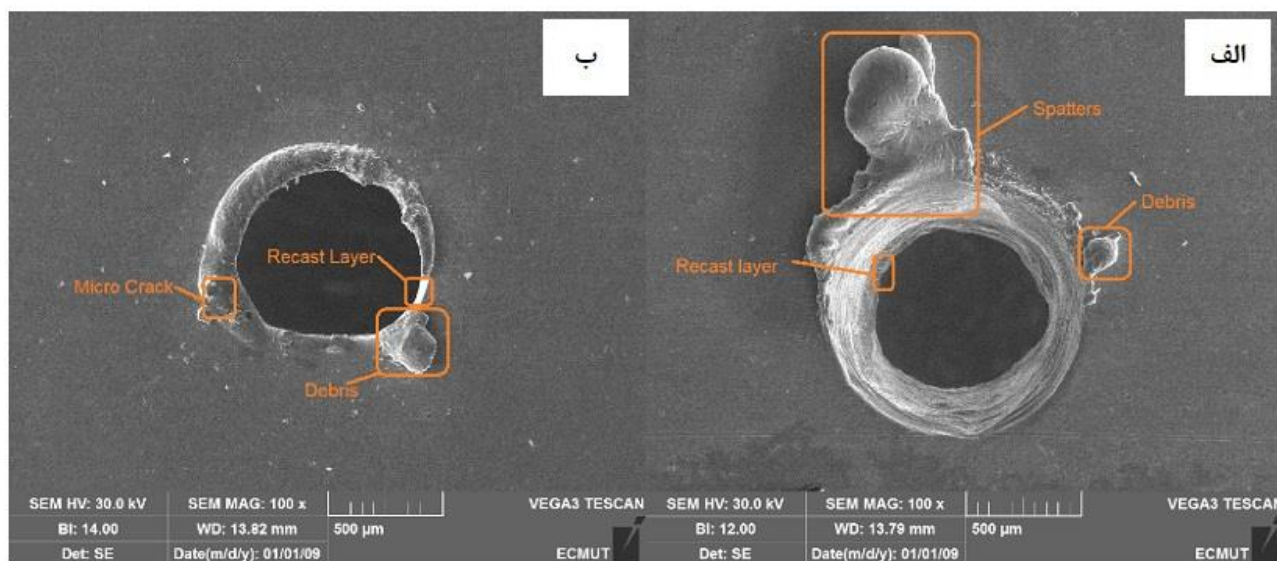
- کاهش گرمای اضافی و جلوگیری از تغییرات متالورژیکی ناخواسته؛

در این پژوهش، استفاده از گاز محافظ آرگون اگرچه شدت اکسیداسیون سطحی را کاهش می‌دهد، اما به‌تنهایی قادر به حفظ یکپارچگی شیمیایی و ریزساختاری سطح نیست. راهبردهای بهبود کیفیت سطح باید بر کنترل دقیق انرژی ورودی، کاهش مدت‌زمان حضور مذاب در ناحیه فرآوری و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند متمرکز شوند و صرفاً تمرکز بر انتخاب یا افزایش خلوص گاز محافظ کافی نیست.

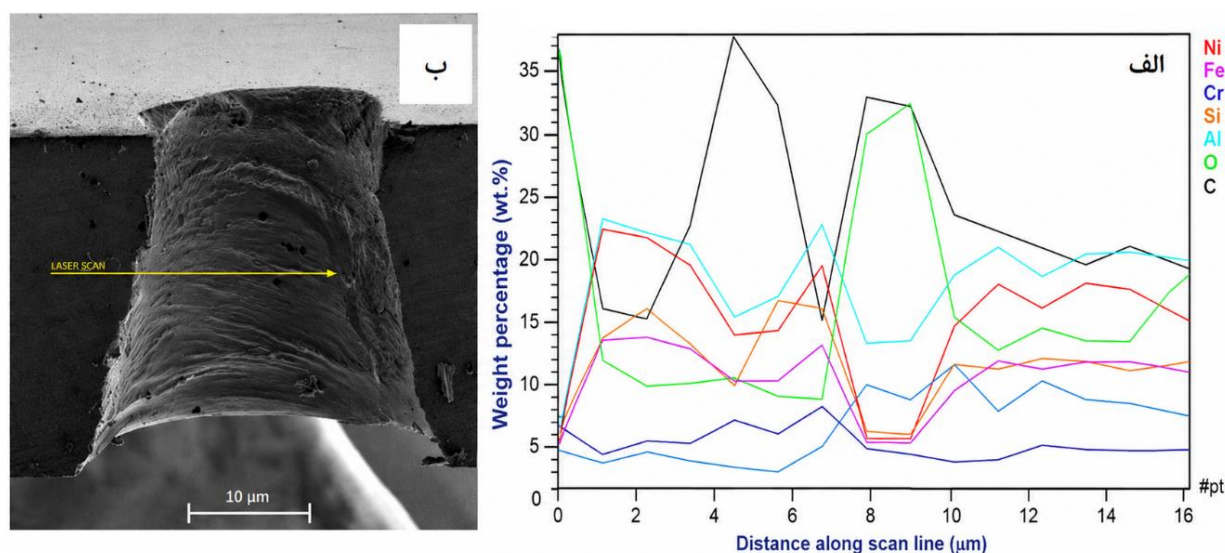
۲-۳- محیط سوراخ‌کاری تحت گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف

در بررسی اثر محیط سوراخ‌کاری، نمونه‌هایی تحت شرایط بهینه با استفاده از گاز محافظ آرگون (از بالا) و آب مقطر (از کف) تهیه شدند. در این روش، قطعه کار به‌گونه‌ای در حمام آب مقطر قرار می‌گیرد که جریان نازکی از آب به‌طور مداوم روی سطح تحتانی آن در جریان باشد.

تصاویر مقطع برش طولی سوراخ‌ها در نمونه‌های بهینه در محیط گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف در شکل (۶) نشان داده شده است. از مقایسه شکل (۶) با شکل (۳) مشخص می‌شود که انجام فرایند سوراخ‌کاری در محیط آب مقطر، بسیار می‌تواند در کیفیت سوراخ‌های ایجادشده موثر باشد. در تحقیق



شکل ۷- دهانه ورودی (الف) و دهانه خروجی (ب) سوراخ ایجادشده در حضور گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف.



شکل ۸- آنالیز خطی طیف‌سنجی توزیع انرژی (الف) به همراه مسیر آنالیز (ب)، مربوط به سوراخ تشکیل شده در حضور گاز محافظ آرگون و آب مقطر از کف.

و تصویر خروجی سوراخ‌های ایجادشده در شرایط بهینه و تحت محافظت گاز آرگون از بالا و آب مقطر از کف در شکل (۷-ب) نشان داده شده است.

نتایج آنالیز خطی طیف‌سنجی توزیع انرژی مربوط به نمونه‌ها در حضور گاز محافظ آرگون و آب مقطر از کف، در شکل (۸) نشان داده شده است. بررسی رفتار عناصر در امتداد دیواره

- کاهش ترک‌های حرارتی با خنک‌کاری موضعی؛
- بهبود کیفیت لبه‌های سوراخ با کاهش منطقه متأثر از حرارت؛
- کاهش پراکندگی مواد ذوب‌شده و کمک به خروج آن‌ها از حفره.

تصویر مربوط به دهانه ورودی سوراخ‌های ایجادشده در حضور گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف در شکل (۷-الف)

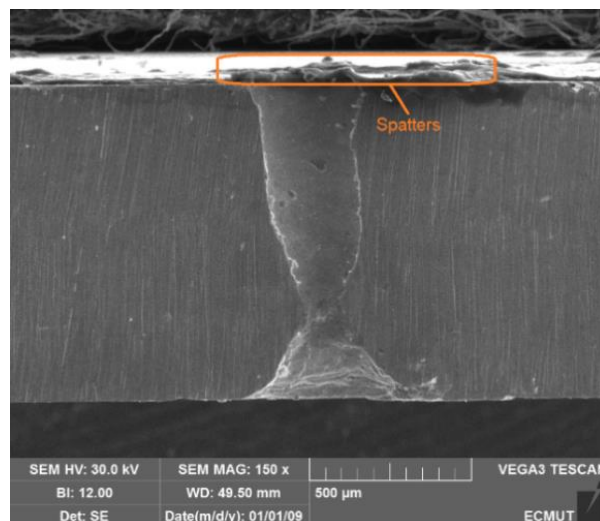
گردد. در بخش زیرین سوراخ، آب مقطر با افزایش نرخ سرمایش، باعث کاهش پهنای HAZ می شود. با این حال، شوک حرارتی ناشی از سرمایش سریع و افزایش بخار آب، منجر به تشدید اکسیداسیون و ایجاد ناهمگنی شیمیایی در دیواره سوراخ می گردد (۲۲). در مجموع، فرایند سوراخ کاری لیزری با استفاده از گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از پایین، گزینه ای کارآمدتر نسبت به فرایند مبتنی بر آرگون خالص ارزیابی می شود. این روش با ایجاد نرخ سرمایش بالا، پهنای HAZ را کاهش داده، اعوجاج حرارتی را بهتر کنترل می کند و دقت هندسی سوراخ را بهبود می بخشد. اگرچه افزایش موضعی اکسیژن و اکسیداسیون سطحی مشاهده می شود، این پدیده عمدتاً محدود به لایه های سطحی بوده و با عملیات تکمیلی قابل حذف است. در مقابل، مزایای حرارتی و هندسی این روش، نقش تعیین کننده ای در افزایش کیفیت نهایی قطعه و بهره وری خط تولید ایفا می کند (۱۸، ۲۰ و ۲۲).

۳-۳- محیط سوراخ کاری تحت گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف در یک میدان مغناطیسی

در ادامه بررسی اثر محیط بر سوراخ کاری و استفاده از گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف در یک میدان مغناطیسی، نمونه تهیه شد. تصاویر مقطع برش طولی سوراخ در محیط گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف تحت میدان مغناطیسی، در شکل (۹) نشان داده شده است.

تصویر مربوط به دهانه ورودی سوراخ ایجاد شده در حضور گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف تحت میدان مغناطیسی در شکل (۱۰-الف) و تصویر خروجی سوراخ ایجاد شده تحت محافظت گاز آرگون از بالا و آب مقطر از کف در شکل (۱۰-ب) نشان داده شده است.

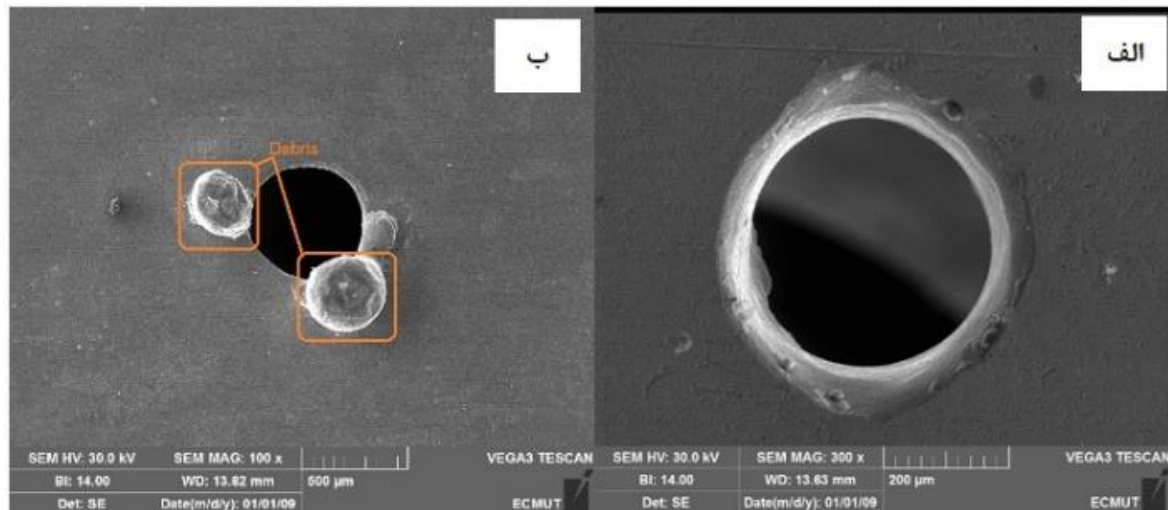
مقایسه ریخت شناسی ورودی و خروجی سوراخ در حضور گاز محافظ (با و بدون میدان مغناطیسی)، نتایج تقریباً مشابهی را نشان داد؛ همچنین ریخت شناسی ورودی و خروجی سوراخ در شرایط استفاده از آب مقطر از کف (چه با میدان مغناطیسی و چه



شکل ۹- تصویر مقطع برش طولی سوراخ در محیط گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف تحت میدان مغناطیسی.

سوراخ، حاکی از نوسانات قابل توجه در ترکیب شیمیایی این ناحیه است. این نوسانات عمدتاً ناشی از فرایند ذوب و انجماد بسیار سریع، آشفته گی حوضچه مذاب و اثر هم زمان جریان گاز محافظ و خنک کاری آبی می باشد (۱۸ و ۱۹).

بیشترین تغییرات مشاهده شده مربوط به عناصر فعال شیمیایی نظیر اکسیژن و کروم است که بیانگر وقوع واکنش های اکسیداسیون موضعی در دیواره سوراخ می باشد. افزایش شدید اکسیژن در برخی نواحی، حاکی از تشکیل لایه ها و تجمعات اکسیدی است. حضور آب مقطر و بخار ناشی از تبخیر آن، پتانسیل اکسیداسیون را تشدید کرده و کنترل ترکیب شیمیایی سطح را دشوارتر ساخته است (۱۸ و ۲۱). کاهش موضعی کروم هم زمان با افزایش اکسیژن، نشان دهنده اکسیداسیون ترجیحی این عنصر و تشکیل اکسیدهای پایدار آن می باشد. این پدیده می تواند به کاهش مقاومت به خوردگی و افت کیفیت سطح سوراخ منجر شود. عناصر دیگر (غیر از اکسیژن و کروم)، رفتار نسبتاً پایداری از خود نشان می دهند؛ با این حال، افت های موضعی آن ها در نواحی اکسید شده، بیانگر مشارکت ثانویه در فرایند اکسیداسیون و وجود ناهمگنی متالورژیکی است (۲۰). نوسانات عناصر Al و Si نیز نشان دهنده تشکیل اکسیدهای موضعی است که می تواند موجب افزایش زبری دیواره و کاهش کیفیت هندسی سوراخ



شکل ۱۰- دهانه ورودی (الف) و دهانه خروجی (ب) سوراخ‌های ایجادشده در حضور گاز محافظ آرگون از بالا و آب مقطر از کف در حضور میدان مغناطیسی.

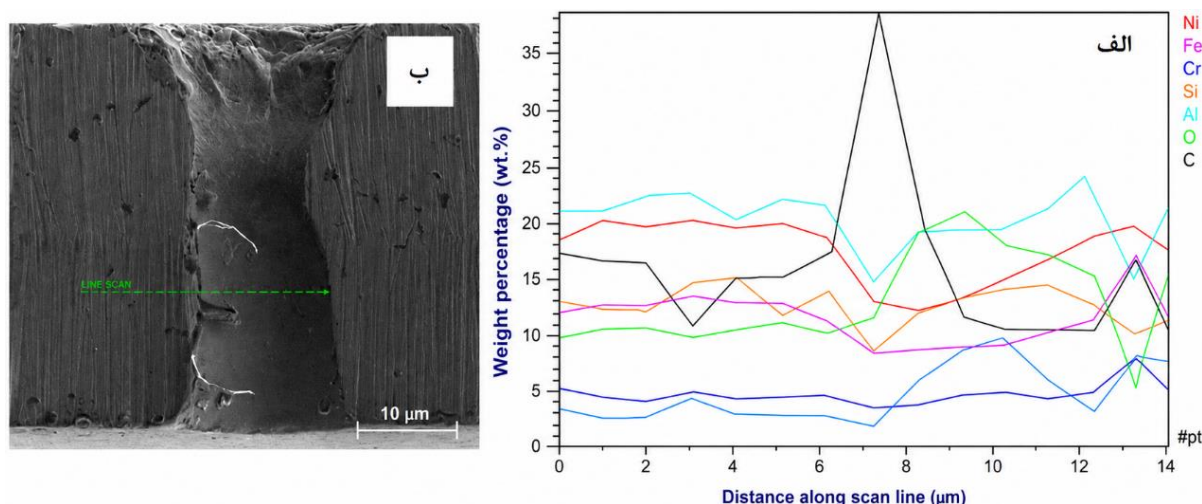
دلیل بود که هم کمک مغناطیسی و هم کمک آب، نرخ حذف مواد را در طول حفاری لیزری بهبود می‌بخشد و در نتیجه قطر خروجی سوراخ افزایش می‌یابد. استفاده هم‌زمان از میدان مغناطیسی و آب مقطر در سوراخ کاری لیزری با سازوکارهای هم‌افزایی، کیفیت سوراخ را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. این ترکیب، به‌ویژه در کاربردهای پیشرفته صنعتی مانند ساخت میکروالکترونیک یا اجزای پزشکی استفاده می‌شود. استفاده هم‌زمان از گاز آرگون محافظ، استفاده از آب مقطر در کف ورق سوراخ کاری و اعمال میدان مغناطیسی، می‌تواند سبب بهبود کیفیت سوراخ‌ها گردد. در این مورد باید موارد زیر را به‌عنوان علل بهبود کیفیت در نظر گرفت.

- سازوکار کلی بهبود کیفیت:

استفاده از آب مقطر می‌تواند سبب خنک کاری، شستشوی ذرات و کاهش اکسید سطحی گردد. اثر استفاده از آب در حضور میدان، می‌تواند سبب افزایش پایداری جریان آب و کنترل هدفمند ذرات گردد. حضور میدان مغناطیسی نیز می‌تواند سبب هدایت ذرات مذاب و پلاسما و تمرکز انرژی لیزر و کاهش نوسانات گردد (۱۴).

بدون آن) نیز تقریباً مشابه بودند که نشان می‌دهد کمک آب تأثیر بیشتری بر ریخت‌شناسی ورودی و خروجی سوراخ نسبت به کمک میدان مغناطیسی دارد. به‌صورت کلی، تأثیر آب از کف نسبت به گاز محافظ آرگون و میدان مغناطیسی بسیار مشخص‌تر بوده است، اما با مقایسه نتایج در محیط‌های مختلف، می‌توان دریافت که استفاده از محیط آب از کف تحت میدان مغناطیسی تأثیر بیشتری بر پروفیل سطح مقطع سوراخ دارد. آب می‌تواند اندازه سطح مقطع سوراخ و عمودبودن سطح مقطع سوراخ را به‌طور قابل توجهی افزایش و زاویه مخروطی را کاهش دهد. این نشان می‌دهد که کمک آب نه تنها می‌تواند راندمان حفاری لیزری را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد، بلکه زاویه مخروطی سوراخ را نیز کاهش داده و کیفیت هندسی سوراخ را بهبود می‌دهد. بر اساس موارد بررسی‌شده، مشخص شد که قبل از حفر سوراخ، آب تأثیر کمی بر فرایند حفاری داشت. وقتی سوراخ ایجاد شد، آب وارد سوراخ شد و بر فرایند حفاری اثر گذاشت.

با مقایسه محیط‌های مختلف، می‌توان دریافت که هم میدان مغناطیسی و هم کمک آب، قطر خروجی سوراخ را افزایش می‌دهند و قطر خروجی سوراخ در محیط آب از کف در حضور میدان مغناطیسی بیشترین مقدار را دارد. این امر عمدتاً به این



شکل ۱۱- آنالیز خطی طیف‌سنجی توزیع انرژی (الف) به همراه مسیر آنالیز (ب)، مربوط به سوراخ‌های تشکیل شده در حضور گاز محافظ آرگون و آب مقطر از کف در حضور میدان مغناطیسی.

میکرومتر کاهش می‌دهد (در مقایسه با ۵/۰ میکرومتر در روش‌های معمولی).

(ب) دقت ابعادی: خطای قطری سوراخ‌های زیر ۱۰۰ میکرومتر به $2 \pm \mu\text{m}$ می‌رسد.

(ج) یکنواختی لبه‌ها: عدم وجود تغییر رنگ حرارتی^{۱۱} (به‌ویژه در فلزاتی مانند مس یا فولاد ضدزنگ).

- علت فیزیکی پشت این اثر ترکیبی:

(الف) کنترل دینامیک سیال-پلازما: میدان مغناطیسی، پلاسمای داغ و جریان آب را به صورت هم‌زمان مدیریت می‌کند.

(ب) اثر مگنتوهیدرودینامیک^{۱۲}: برهم‌کنش میدان مغناطیسی با سیال رسانا (آب حاوی یون‌ها)، جریان آب را پایدارتر می‌کند.

نتایج آنالیز خطی طیف‌سنجی توزیع انرژی مربوط به نمونه‌ها در حضور گاز محافظ آرگون از بالا، آب مقطر از کف و در حضور میدان مغناطیسی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

بررسی توزیع عناصر در نواحی دور از دیواره سوراخ (فلز پایه)، نشان می‌دهد که عناصر Ni و Fe دارای توزیع یکنواخت و منطبق با ترکیب اسمی آلیاژ هستند. این موضوع بیانگر محدود بودن اثرات حرارتی فرایند لیزر به ناحیه نزدیک دیواره سوراخ و عدم تأثیرگذاری بر عمق قطعه می‌باشد (۱۸ و ۲۲).

کروم به‌عنوان عنصر کلیدی در مقاومت به اکسیداسیون، در

- نقش میدان مغناطیسی در بهبود عملکرد آب مقطر: (الف) کنترل حرکت ذرات مذاب^{۱۳}: ذرات مذاب به دلیل یونیزاسیون توسط لیزر حین سوراخ کاری، بار الکتریکی دارند. اعمال میدان مغناطیسی خارجی (معمولاً ۰/۱ تا ۱ تسلا)، این ذرات را طبق قانون نیروی لورنتس هدایت می‌کند و ذرات به جای چسبیدن به دیواره‌های سوراخ، به صورت کنترل شده توسط آب مقطر شسته می‌شوند. در نتیجه کاهش برآمدگی‌های حاشیه سوراخ^۹ تا ۷۰ درصد می‌تواند حاصل گردد (۸، ۱۵ و ۱۶).

(ب) تثبیت جریان آب مقطر: میدان مغناطیسی بر مولکول‌های قطبی آب اثر گذاشته و از تشکیل حباب‌های بخار ناپایدار جلوگیری می‌کند، جریان آب را یکنواخت‌تر می‌کند و در نتیجه با ایجاد خنک‌کاری یکنواخت‌تر می‌تواند ناحیه متأثر از حرارت را تا ۴۰ درصد کاهش دهد (۸، ۱۵ و ۱۶).

(ج) بهبود انتقال انرژی لیزر: میدان مغناطیسی، ابر پلاسمای تولید شده توسط لیزر را فشرده می‌کند و آب مقطر با جذب گرمای پلازما، انرژی متمرکزتری به منطقه سوراخ منتقل می‌کند؛ در نتیجه می‌توان شاهد افزایش نسبت عمق به قطر سوراخ و کاهش انحراف هندسی دیواره‌ها تا ۲۵ درصد بود.

- تأثیرات مستقیم بر کیفیت سوراخ (۱۷):

(الف) صافی سطح^{۱۴}: ترکیب این دو روش، زبری سطح را تا ۰/۱

قرار گرفت. به منظور ارزیابی عملکرد هر یک از شرایط، مورفولوژی سوراخ‌ها با استفاده از تصاویر SEM و تغییرات موضعی ترکیب شیمیایی توسط آنالیز خطی طیف‌سنجی EDS بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، مهم‌ترین یافته‌های پژوهش به شرح زیر است:

۱- استفاده از گاز محافظ آرگون، موجب کاهش شدت اکسیداسیون سطحی در حین سوراخ کاری لیزری شد، اما به تنهایی نتوانست از تشکیل لایه دوباره منجمد شده، ناهمگنی سطحی و تغییرات موضعی ناشی از چرخه‌های شدید ذوب و انجماد جلوگیری کند. نتایج آنالیز خطی EDS نیز نشان داد که اگرچه آرگون محیط فرایند را پایدارتر می‌کند، اما حفظ کامل یکپارچگی شیمیایی و متالورژیکی دیواره سوراخ تنها با استفاده از این گاز امکان‌پذیر نیست.

۲- استفاده از آب مقطر در زیر قطعه، نسبت به سوراخ کاری در محیط آرگون، موجب بهبود قابل توجه کیفیت سوراخ‌ها شد. آب با جذب حرارت اضافی و افزایش نرخ سرمایش، پهنای HAZ را کاهش داده و با تشکیل حباب‌های بخار، به خروج مواد مذاب از داخل سوراخ کمک کرد. در نتیجه، میزان بازرسوب مواد مذاب و عیوب سطحی کاهش یافت و کیفیت ریخت‌شناسی دیواره سوراخ بهبود پیدا کرد. با این حال، آنالیز EDS نشان داد که افزایش موضعی اکسیژن و اکسیداسیون سطحی کروم همچنان رخ می‌دهد و بنابراین استفاده از آب مقطر به تنهایی قادر به حذف کامل تمامی عیوب متالورژیکی نیست.

۳- استفاده هم‌زمان از گاز محافظ آرگون، آب مقطر و میدان مغناطیسی، بهترین عملکرد را در بین شرایط بررسی شده ارائه داد. اعمال میدان مغناطیسی با هدایت جریان مذاب، افزایش پایداری حوضچه مذاب و بهبود تخلیه مواد مذاب، موجب کاهش لایه دوباره منجمد شده، حفره‌ها، ترک‌های سطحی و سایر ناپوستگی‌ها شد. همچنین، یکنواختی دیواره سوراخ افزایش یافته و کیفیت هندسی و ریخت‌شناسی سوراخ‌ها نسبت به دو روش دیگر به طور محسوسی بهبود یافت. نتایج آنالیز خطی طیف‌سنجی EDS نشان داد که در روش ترکیبی، توزیع عناصر اصلی آلیاژ،

نواحی نزدیک دیواره سوراخ، نوسانات محدودی نشان می‌دهد. افزایش موضعی اکسیژن هم‌زمان با کاهش نسبی کروم، بیانگر تشکیل اکسیدهای کروم در سطح دیواره است. با این حال، دامنه این نوسانات در مقایسه با فرایندهای بدون کنترل خنک‌کاری و میدان مغناطیسی، محدود بوده و نشان‌دهنده کنترل موثر اکسیداسیون سطحی می‌باشد (۲۰ و ۲۱).

استفاده از آب مقطر در حضور میدان مغناطیسی، موجب افزایش نرخ سرمایش و یکنواختی تخلیه حرارت در ناحیه ذوب می‌شود. در نتیجه، از تمرکز بیش‌ازحد حرارت و رشد ناپایدار حوضچه مذاب جلوگیری شده و انجماد دیواره سوراخ به صورت یکنواخت‌تری انجام می‌گیرد. این مسئله به‌ویژه برای سوپرآلیاژ هستلوی X که حساس به تغییرات ریزساختاری ناشی از حرارت است، اهمیت بالایی دارد (۲۲).

نوسانات مشاهده شده در عناصر Si و Al، محدود و عمدتاً سطحی است و به تشکیل اکسیدهای ناپایدار موضعی نسبت داده می‌شود. تغییرات کربن نیز بیشتر ناشی از تمرکز نسبی آن در نواحی اکسید شده بوده و شواهدی از تشکیل گسترده فازهای ترد کاربیدی در دیواره سوراخ مشاهده نمی‌شود. این موضوع نشان‌دهنده حفظ یکپارچگی متالورژیکی دیواره سوراخ در فرایند پیشنهادی است (۱۸).

از نتایج این فرایند می‌توان به حفظ ترکیب شیمیایی فلز پایه در فاصله کوتاه از دیواره سوراخ، کنترل اکسیداسیون سطحی کروم و بهبود ریخت‌شناسی و یکنواختی دیواره سوراخ اشاره نمود. این روش برای سوراخ کاری دقیق سوپرآلیاژهای پایه نیکل، به‌ویژه در کاربردهای دمابالا و حساس به کیفیت سطح، راهکاری مناسب و قابل توسعه صنعتی محسوب می‌شود (۱۸، ۲۰ و ۲۲).

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرایند سوراخ کاری لیزری تک‌پالس روی ورق سوپرآلیاژ هستلوی X در سه محیط مختلف شامل گاز محافظ آرگون، گاز محافظ آرگون همراه با آب مقطر از کف و ترکیب گاز محافظ آرگون، آب مقطر و میدان مغناطیسی مورد بررسی

پراش الکترون‌های برگشتی^{۱۳} و میکروسکوپ الکترونی عبوری^{۱۴} برای بررسی دقیق‌تر تغییرات متالورژیکی و سازوکارهای حاکم بر بهبود کیفیت سوراخ مورد مطالعه قرار گیرد.

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافع با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

سهم نویسندگان

مصطفی قدیمی دفرازی: طراحی و ایده‌پردازی مقاله، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر داده‌ها، نوشتن مقاله. **سید مسعود برکت:** طراحی و ایده‌پردازی مقاله، اعتبارسنجی نتایج، نوشتن مقاله، راهنمایی پروژه. **رضا شجاع رضوی:** طراحی و ایده‌پردازی مقاله، اعتبارسنجی نتایج، نوشتن مقاله، راهنمایی پروژه. **علی خرم:** مشاوره در تحلیل و تفسیر نتایج. **محمد عرفان‌منش:** مشاوره در تحلیل و تفسیر نتایج.

به‌ویژه نیکل و آهن، در فاصله کوتاهی از دیواره سوراخ با ترکیب اسمی فلز پایه مطابقت داشته و اثرات حرارتی فرایند به ناحیه مجاور دیواره محدود شده است. همچنین، کاهش نوسانات عنصر کروم و محدود بودن تغییرات عناصر سیلیسیم، آلومینیوم و کربن، بیانگر کنترل موثر اکسیداسیون سطحی، حفظ یکپارچگی متالورژیکی دیواره سوراخ و جلوگیری از تشکیل گسترده فازهای نامطلوب است.

۴- در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از گاز محافظ آرگون، آب مقطر و میدان مغناطیسی، علاوه بر بهبود رفتار مذاب و کاهش عیوب ریخت‌شناسی، موجب حفظ بهتر کیفیت متالورژیکی دیواره سوراخ نیز می‌شود. این روش، به‌عنوان یک رویکرد ترکیبی و نوآورانه، می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای سوراخ کاری دقیق سوپراآلیاژهای پایه نیکل، به‌ویژه در صنایع هوافضا، انرژی و سایر کاربردهای دمابالا باشد و ظرفیت مناسبی برای توسعه در فرایندهای صنعتی و تولید قطعات با کیفیت بالا را دارد.

۵- از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به بررسی تنها یک شدت میدان مغناطیسی و یک ضخامت ورق اشاره کرد. از این رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، اثر شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی، ضخامت‌های متفاوت قطعه، پارامترهای مختلف لیزر و همچنین تحلیل‌های ریزساختاری تکمیلی مانند XRD،

واژه‌نامه

- | | |
|---|---|
| 1. heat affective zone (HAZ) | 8. molten debris control |
| 2. positive material identification (PMI) | 9. dross protrusions |
| 3. pulse width modulation (PWM) | 10. surface roughness |
| 4. scanning electron microscopy (SEM) | 11. absence of thermal discoloration |
| 5. energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) | 12. magnetohydrodynamic (MHD) |
| 6. X-Ray diffraction (XRD) | 13. electron backscatter diffraction (EBSD) |
| 7. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) | 14. transmission electron microscopy (TEM) |

مراجع

- | | |
|--|---|
| 1. Bahar ND, Marimuthu S, Yahya WJ. Pulsed Nd:YAG laser drilling of aerospace materials (Ti-6Al-4V). IOP Conf Ser: Mater Sci Eng. 2016;152:012056. https://doi.org/10.1088/1757-899X/152/1/012056 | Experimental characterization of a micro-hole drilling process with short micro-second pulses by a CW single-mode fiber laser. Opt Lasers Eng. 2014;55:275-283. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.11.002 |
| 2. Tu J, Paleocrassas AG, Reeves N, Rajule N. | 3. Ghadimi Dafrazi M, Barooghi Bonab B. Investigation |

- of the process of forming a bowl-shaped part with Hastelloy raw materials using rotational forming method. In: Proceedings of the 6th International and 17th National Conference on Manufacturing Engineering (ICME 2021); 2021 Mar 2-4; Tehran (Iran. Persian).
4. Behera RR, Sankar MR. State of the art on under liquid laser beam machining. *Mater Today Proc.* 2015;2(4-5):1731-1740.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.007>
 5. Wang W, Song H, Liao K, Mei X. Water-assisted femtosecond laser drilling of 4H-SiC to eliminate cracks and surface material shedding. *Int J Adv Manuf Technol.* 2021;112:553-562.
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-06262-1>
 6. Tan Y, Chu W, Wang P, Li W, Wang Z, Cheng Y. Water-assisted laser drilling of high-aspect-ratio 3D microchannels in glass with spatiotemporally focused femtosecond laser pulses. *Opt Mater Express.* 2019;9(5):1971-1978.
<https://doi.org/10.1364/OME.9.001971>
 7. Wu C, Fang X, Kang Q, Sun H, Zhao L, Tian B, et al. Crystal cleavage, periodic nanostructure and surface modification of SiC ablated by femtosecond laser in different media. *Surf Coat Technol.* 2021;424:127652.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127652>
 8. Mendiratta M, Prakash S. Improved quality micro-hole fabrication using backside water assisted laser micro drilling in titanium. *Eng Res Express.* 2025; 7:015402. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ada88a>
 9. Hong ZY, Okano K, Di Carlo D, Tanaka Y, Yalikun Y, Hosokawa Y. High-speed micro-particle manipulation in a microfluidic chip by directional femtosecond laser impulse. *Sens Actuators A Phys.* 2019;297:111566.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111566>
 10. Wang L, Yang H, Ren N, Wu Z, Xia K. Experimental characterization of laser trepanned microholes in superalloy GH4220 with water-based assistance. *Micromachines.* 2022;13(12):2249.
<https://doi.org/10.3390/mi13122249>
 11. Dafrazi MG, Razavi RS, Barkat M, Khoram A, Erfanmanesh M. Statistical experimental investigation of the effect of focal length and displacement on laser drilling of Hastelloy-X superalloy sheet using single pulse fiber laser. *J Adv Mater Eng.* 2026;44(2):49-66 (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jame.44.2.1083>
 12. Ghadimi Dafrazi M, Shoja Razavi R, Barekat M, Khoram A, Erfanmanesh M. Statistical-experimental optimisation of laser drilling on Hastelloy X superalloy. *Can Metall Q.* 2025.
<https://doi.org/10.1080/00084433.2025.2593700>
 13. Sivaprasad P, Noorul Haq A. Accuracy and surface integrity analysis of micro holes drilled on Hastelloy-X alloy using a laser source with optimization. *Surf Rev Lett.* 2020;27(6):1950109.
<https://doi.org/10.1142/S0218625X19501099>
 14. Wang L, Rong Y, Xu L, Wu C, Xia K. Study on laser drilling of micro-holes using a breakthrough detection method. *Materials* 2025;18(16):3764.
<https://doi.org/10.3390/ma18163764>
 15. Zhang Y, Qiao H, Zhao J, Cao Z, Liang J, Zhang Q. Numerical and experimental study on the stability of water-beam fiber in double coaxial gas-assisted water jet guided laser machining. *Opt Laser Technol.* 2025;190:113221.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.113221>
 16. Mendiratta M, Prakash S. Investigation and process optimization of backside thin water layer assisted laser micro-drilling of titanium. *Lasers Manuf Mater Process* 2025;12(2):1-28.
<https://doi.org/10.1007/s40516-025-00288-7>
 17. Gao L, Liu C, Liu J, Wang K. Femtosecond laser drilling of SiC/SiC composites in longitudinal magnetic field and semi-water immersion assistance. *Opt Laser Technol.* 2025;181:111955.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111955>
 18. Gravel JFY, Boudreau D. Study by focused shadowgraphy of the effect of laser irradiance on laser-induced plasma formation and ablation rate in various gases. *Spectrochim Acta Pt B-Atom Spectrosc.* 2009;64(1):56-65.
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2008.10.037>
 19. Low DKY, Li L, Corfe AG. Effects of assist gas on the physical characteristics of spatter during laser percussion drilling of NIMONIC 263 alloy. *Appl Surf Sci.* 2000;154:689-695.
[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(99\)00427-4](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(99)00427-4)
 20. Otto CR, Doroudi A, Vaseghi M, Davami K. The effect of assist gas type on nitinol microsecond laser cut edges: a study on the use of oxygen, argon, nitrogen, helium, and compressed air. *Eng Res Express.* 2024;6(4):045583.
<https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad980f>
 21. Marimuthu S, Elkington H, Smith B. Millisecond fibre laser drilling of thick-section aerospace alloy. *Int J Adv Manuf Technol.* 2022;119(5-6):3437-3447.
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-08435-y>
 22. Xia K, Wang L, Li M, Yang H. Analysis of the effects of water temperature on water-assisted laser trepanning in superalloys. *Metals* 2024;14(8):943.
<https://doi.org/10.3390/met14080943>