

## بررسی تأثیر فراسنج‌های ورودی روی عمق ناحیه‌ی متأثر از حرارت (HAZ) فولاد AISI H13 در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی (EDM)

محمد رضا شبگرد<sup>۱\*</sup>، احمد افسری<sup>۲</sup>، هادی عیوضی باقری<sup>۳</sup>، روح الله رحمانی<sup>۴</sup>

### چکیده

به دلیل اهمیت سلامتی سطح قطعات تولید شده به روش ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی (EDM) در صنایع گوناگون تولیدی، موضوع سلامتی سطح بیشتر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه را به خود اختصاص داده است. در این پژوهش، تأثیر فراسنج‌های ورودی (زمان روشنی پالس، چرخه‌ی کاری و قطبیت ابزار) روی تغییرات سختی و مقدار تغییر درصد کربن در سطح و لایه‌های زیر سطح ماشین‌کاری شده‌ی فولاد H13 به روش تخلیه‌ی الکتریکی (EDM) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در هر دو حالت قطبیت ابزار (مثبت و منفی) با افزایش زمان روشنی پالس و چرخه‌ی کاری، میزان افت سختی در لایه‌های نزدیک سطح ماشین‌کاری، بیشتر شده و عمق ناحیه‌ی متأثر از حرارت افزایش می‌یابد و میزان افت سختی و عمق ناحیه‌ی متأثر از حرارت در قطبیت منفی کمتر است. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (EDX) مشخص شد که در قطبیت مثبت، درصد نفوذ کربن به سطح ماشین‌کاری شده نسبت به قطبیت منفی بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: زمان روشنی پالس، چرخه‌ی کاری، قطبیت، میکروسختی، ناحیه‌ی متأثر از حرارت (HAZ).

۱- دانشیار دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز.

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز.

۳- کارشناس ارشد مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز.

۴- کارشناس ارشد مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز.

\*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: mrshabgard@tabrizu.ac.ir

## پیشگفتار

امروزه براساس نیاز تکنولوژی پیشرفته به ساخت و ماشین‌کاری موادی با استحکام و سختی بالا، فرآیندهای جدید ماشین‌کاری، جایگزین فرآیندهای سنتی ماشین‌کاری شده است. یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین این فرآیندها، ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی<sup>۱</sup> (EDM) می‌باشد. ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی فرآیندی است که در آن به‌وسیله‌ی اعمال ولتاژ پالسی و منقطع مابین ابزار و قطعه کار که غوطه‌ور در سیال دی‌الکتریک است و ایجاد جرقه مابین آنها به‌زای هر پالس، عمل براده‌برداری و ماشین‌کاری انجام می‌شود [۱ و ۲]. فولاد AISI H13 به دلیل داشتن مقاومت سایشی خیلی خوب در دماهای بالا، سختی‌پذیری و چقرمگی عالی، در ساخت انواع قالب‌های گرم کار مانند قالب‌های آهنگری، اکستروژن، ریخته‌گری تحت فشار و غیره به‌کار می‌رود [۳].

ماهیت و ساختار سطح ماشین‌کاری شده به وسیله‌ی تخلیه‌ی الکتریکی، از فراسنج‌های مهم خروجی است که کیفیت آن دارای اهمیت زیادی می‌باشد. به‌طورکلی ماهیت این سطوح به‌وسیله‌ی دو مولفه‌ی مهم ارزیابی و مطالعه می‌گردد. یکی از این مولفه‌ها بافت سطح است که بیانگر پستی بلندی‌های سطح ماشین‌کاری شده می‌باشد و مولفه‌ی دوم ویژگی‌های متالورژیکی سطح است که تغییرات ایجاد شده در لایه‌ها و زیرلایه‌های سطحی قطعه کار را معرفی می‌کند. شکل ۱ مشخصات لایه‌های سطحی را پس از عملیات ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی در یک قطعه کار نمونه نشان می‌دهد.

پژوهش‌های متعددی در رابطه با تأثیر فراسنج‌های ورودی روی کیفیت سطح قطعه کار و ویژگی‌های خروجی فرآیند (EDM) انجام شده است. تبنی<sup>۲</sup> و همکاران [۴]، تغییرات نرخ براده‌برداری، زبری سطح و تغییرات سطحی ایجاد شده در عملیات ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی قطعه کارهای فولادی (50CrV4, X200Cr15) با ابزارهای مسی و گرافیتی را با در نظر گرفتن تأثیر (شدت جریان ورودی، زمان روشن‌ی پالس و زمان خاموشی پالس) مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که

با افزایش انرژی تخلیه، زبری سطح افزایش یافته و کیفیت سطح قطعه کار افت می‌نماید. کوكوبو<sup>۳</sup> و همکاران [۵]، تأثیر دو نوع دی‌الکتریک (نفت سفید و آب دی‌یونیزه<sup>۴</sup>)، قطبیت ابزار و زمان‌های روشن‌ی پالس متفاوت روی حجم ماده‌ی برداشته شده و ضخامت لایه‌ی سفید ایجاد شده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی فولاد AISI 1049 را بررسی کرده و گزارش نموده‌اند که با افزایش زمان روشن‌ی پالس در هر دو حالت قطبیت ابزار، عمق ذوب و حجم ماده‌ی برداشته شده افزایش می‌یابد. ایوبانک<sup>۵</sup> و همکاران [۶]، با مدل‌سازی کاتد<sup>۶</sup> و آند<sup>۷</sup> در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی به این نتیجه رسیدند که هنگام تخلیه‌ی الکتریکی شکل‌گیری کانال پلاسما نخست روی آند آغاز می‌شود و در نتیجه نخست آند ذوب شده و سپس امتداد کانال پلاسما به کاتد می‌رسد. این پدیده سبب بزرگتر شدن شعاع کانال پلاسما روی قطب مثبت نسبت به قطب منفی شده و سبب کاهش چگالی جریان الکتریکی و شار گرمایی ورودی به سطح آند می‌شود. همچنین، دسکودرس<sup>۸</sup> [۷] ویژگی‌های کانال پلاسمای تشکیل شده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی را مورد مطالعه قرار داده است. نتایج این پژوهش، نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف دما بین سطح آند و کاتد در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که دمای سطح کاتد بسیار گرم‌تر از سطح آند گزارش شده است. در حالت قطبیت منفی، این اختلاف دما سبب کاهش دمای سطح قطعه کار و عمق ناحیه‌ی متأثر از عملیات ماشین‌کاری می‌شود. خوشکیش و همکاران [۸]، تأثیر جنس الکترود، شدت جریان و زمان روشن‌ی پالس را روی مشخصه‌های خروجی فرآیند EDM شامل نرخ براده‌برداری، فرسایش ابزار و زبری سطح در ماشین‌کاری فولاد ابزار سردکار AISI D3 مورد مطالعه قرار داده‌اند. براساس نتایج به‌دست آمده از پژوهش آنها، جنس الکترود دارای بیشترین تأثیر در فرسایش ابزار است، به‌گونه‌ای که

3- H. Kokubo

4- De-ionized Water

5- Philip. T. Eubank

6- Cathode

7- Anode

8- A. Descoeudres

1- Electrical Discharge Machining

2- W. Tebni

در این آزمایش‌ها، زمان روشنی پالس (در سه سطح)، چرخه‌ی کاری (در چهار سطح) و قطبیت ابزار به‌عنوان فراسنج‌های ورودی مستقل در نظر گرفته شدند. تمامی نمونه‌ها به‌وسیله‌ی دستگاه اسپارک تهران-اکرام (CNC-EDM) در حالت ایزوپالس<sup>۵</sup> به مدت ۲۰ دقیقه تحت عملیات ماشین‌کاری قرار گرفتند. به‌منظور ایجاد شرایط یکسان شستشو در تمام آزمایش‌ها، از روش شستشوی غوطه‌وری استفاده گردید. پس از انجام عملیات ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی و به‌منظور مطالعه‌ی عمق ناحیه‌ی متأثر از حرارت (HAZ)، قطعات ماشین‌کاری شده نخست به‌وسیله‌ی دستگاه وایرکات<sup>۶</sup> با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر به ارتفاع ۸ میلی‌متر از سطح ماشین‌کاری شده، برش داده شده و سپس سمت برش خورده‌ی قطعات باهم و به‌گونه‌ی یکسان تحت عملیات سنگ‌زنی تخت قرار گرفتند و از تمامی سطوح به اندازه‌ی ۰/۱ میلی‌متر باربرداری گردید. سپس به‌وسیله‌ی دستگاه میکروسختی‌سنجی OLYMPUS-LM700 از لایه‌های نزدیک به سطح ماشین‌کاری شده، آزمون میکروسختی‌سنجی به‌عمل آمد. همچنین، آنالیز EDX<sup>۷</sup> از لایه‌های نزدیک سطح ماشین‌کاری شده به‌وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی Cam Scan MV2300 انجام گرفت. برای تهیه‌ی تصاویر میکروسکوپ نوری از دستگاه میکروسکوپ نور Olympus PMG3 استفاده شد. جدول ۲، فراسنج‌های ورودی آزمایش‌ها و سطوح تغییرات آنها را نمایش می‌دهد.

### نتایج و بحث

#### مشخصات مربوط به وضعیت سلامتی سطح<sup>۸</sup>

با توجه به اینکه فراسنج‌های ورودی مورد مطالعه شامل زمان روشنی پالس (Ti)، چرخه‌ی کاری (نسبت زمان روشنی پالس بر مجموع زمان‌های روشنی و خاموشی پالس) و قطبیت ابزار می‌باشد؛ در ادامه، تأثیر هر یک از آنها روی فراسنج‌های خروجی یاد شده به‌گونه‌ای جداگانه بررسی خواهد شد.

ابزار گرافیتی دارای کمترین میزان فرسایش الکتروود ابزار می‌باشد. همچنین، در این پژوهش مشخص شد که با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان، زبری سطح افزایش می‌یابد. صادقی و همکاران [۹] به بررسی چگونگی اثرگذاری فراسنج‌های ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی سیمی (وایرکات) روی فراسنج‌های خروجی آن در ماشین‌کاری فولاد سردکار ۲۶۰۱ پرداخته‌اند. آنها با استفاده از رویکرد طراحی آزمایش‌ها، تأثیر فراسنج‌های ورودی شامل: شدت جریان، زمان خاموشی پالس، ولتاژ مدار باز و ولتاژ گپ را روی زبری سطح و نرخ براده برداری حجمی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج پژوهش‌های آنها نشان می‌دهد که از میان چهار فراسنج تنظیمی، شدت جریان و زمان خاموشی پالس بیشترین تأثیر را بر نرخ براده‌برداری حجمی و صافی سطح قطعه می‌گذارند؛ درحالی‌که ولتاژکاری و ولتاژ مدار باز تأثیر چندانی بر این دو مشخصه ندارند.

هدف این پژوهش، مطالعه‌ی تأثیر زمان روشنی پالس<sup>۱</sup>، چرخه‌ی کاری<sup>۲</sup> و قطبیت ابزار<sup>۳</sup> روی عمق ناحیه‌ی ناحیه‌ی متأثر از حرارت<sup>۴</sup> و تغییرات درصد کربن در سطح قطعات ماشین‌کاری شده به روش ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی EDM می‌باشد.

### مواد و روش پژوهش

در ابتدا روی میلگرد تهیه شده عملیات برش اولیه، ماشین‌کاری و سنگ‌زنی انجام شد و تعداد ۱۶ نمونه‌ی استوانه‌ای فولادی با قطر و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر آماده شد، سپس به‌منظور دست‌یابی به سختی موردنظر (۴۵-۵۲ HRC)، عملیات سخت‌گردانی نمونه‌های فولادی با دقت انجام گرفت. همچنین، برای آماده‌سازی ۱۶ ابزار مسی نیز عملیات برش‌کاری، ماشین‌کاری و پرداخت‌کاری صورت گرفت و ابزارهای مسی استوانه‌ای شکل با قطر ۱۸ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر آماده شدند. جدول ۱، جنس و ابعاد ابزار و قطعه کار آماده شده را نشان می‌دهد.

5- Iso Pulse  
6- Wire Cutting EDM  
7- Energy Dispersive X-ray  
8- Surface integrity

1- Pulse-on time  
2- Duty cycle  
3- Tool Polarity  
4- Heat Affected Zone

### تأثیر زمان روشنی پالس در میزان درصد کربن سطح ماشین کاری شده

درصد ترکیب‌های لایه‌های سطحی نمونه‌های فولادی (H۱۳) پیش و پس از ماشین کاری به روش EDX (به کمک دستگاه SEM) مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۳، نتیجه‌ی آنالیز میکروسکوپ الکترونی از لایه‌های سطحی نمونه‌ها را پیش از عملیات ماشین کاری و جدول ۴ مقدار کربن در لایه‌های سطحی پس از عملیات ماشین کاری EDM را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که جدول ۴ نشان می‌دهد، مقدار درصد کربن در سطح نمونه‌ها پس از عملیات ماشین کاری، به‌گونه‌ی چشم‌گیری افزایش یافته است. دلیل افزایش کربن را این‌گونه می‌توان توجیه نمود که پس از تشکیل کانال پلازما، پدیده‌ی ذوب و تبخیر و همچنین پدیده‌ی جوشش حجمی<sup>۱</sup> (که به‌عنوان اساسی‌ترین ساز و کار براده‌برداری در فرآیند EDM مطرح می‌باشد)، در محل اتصال کانال پلازما به الکترودها رخ می‌دهد. از سویی تجزیه و تبخیر دی‌الکتریک هیدروکربنی و از سوی دیگر، ذوب و تبخیر الکترودها سبب می‌شود که در بستری مناسب از نظر دما و فشار و در اثر پدیده‌ی نفوذ اتمی، عناصر موجود در ترکیب شیمیایی مایع دی‌الکتریک به لایه‌های سطحی قطعه کار و ابزار نفوذ کرده و سبب افزایش مقادیر این عناصر (کربن) در سطح نمونه‌ها شود. در فرآیند EDM، با افزایش زمان روشنی پالس، به دلیل افزایش انرژی جرقه‌ها درجه‌ی حرارت کانال پلازما افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه‌ی مستقیم بین درجه‌ی حرارت و ضریب نفوذ اتمی، با افزایش درجه‌ی حرارت، ضریب نفوذ اتمی نیز بیشتر شده و لذا میزان نفوذ کربن به لایه‌های سطحی افزایش می‌یابد. به همین دلیل، در شیوه‌های خشن کاری و به دلیل افزایش حجم ماده‌ی ذوب شده در سطح قطعه کار و افزایش ضخامت لایه‌ی دوباره منجمد شده (لایه‌ی سفید)<sup>۲</sup> میزان نفوذ اتمی در لایه‌های سطحی نسبت به رژیم‌های پرداخت کاری بیشتر است (شکل ۲).

### تأثیر نوع قطبیت در میزان درصد کربن سطح ماشین کاری شده

نتایج به‌دست آمده از آنالیز EDX نشان می‌دهد که میزان نفوذ کربن سطحی در حالت قطبیت مثبت بیشتر از حالتی است که قطبیت ابزار منفی انتخاب شده است. دلیل این موضوع را این‌گونه می‌توان توضیح داد که چون دمای سطح قطعه کار در قطبیت منفی کمتر از قطبیت مثبت می‌باشد [۷]، این موضوع سبب کاهش ضریب نفوذ اتمی در سطح قطعه کار در قطبیت منفی شده و در نتیجه سبب کاهش میزان نفوذ کربن به سطح قطعه کار می‌شود.

### تأثیر چرخه‌ی کاری در میزان درصد کربن سطح ماشین کاری شده

جدول ۴ تأثیر چرخه‌ی کاری را روی تغییرات درصد کربن سطحی نشان می‌دهد. همان‌گونه که این نتایج نشان می‌دهد، با افزایش سیکل کاری میزان نفوذ کربن به سطح قطعه کار کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده را می‌توان به کاهش ضخامت لایه‌ی دوباره منجمد شده (لایه‌ی سفید) هم‌زمان با افزایش چرخه‌ی کاری در سطح قطعه کار مرتبط دانست (شکل ۳) و این‌گونه توضیح داد که در فرآیند EDM با افزایش چرخه‌ی کاری به دلیل افزایش بازده فرآیند، درصد بیشتری از ماده‌ی ذوب شده به درون مایع دی‌الکتریک پرتاب شده و حجم ماده‌ی برداشته شده از سطح افزایش می‌یابد. با توجه به این‌که لایه‌ی سفید در هنگام انجام در تماس مستقیم با مایع دی‌الکتریک می‌باشد، درصد بیشتری از کربن به این لایه نفوذ می‌کند. لذا با افزایش چرخه‌ی کاری، مقدار افزایش کربن در سطح قطعه کار به دلیل کاهش ضخامت لایه‌ی دوباره منجمد شده روندی نزولی دارد.

### تأثیر قطبیت ابزار روی میزان سختی و عمق ناحیه‌ی (HAZ)

همان‌گونه که شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند، میزان سختی سطح ماشین کاری شده پس از عملیات ماشین کاری نسبت به سختی اولیه‌ی قطعه کار (HRC۵۲) کمتر شده و بیشینه‌ی عمق ناحیه‌ی متأثر از حرارت در قطبیت مثبت بیشتر از قطبیت منفی می‌باشد.

1- Bulk boiling

2- Recast layer (White layer)

پدیده سبب افت بیشتر سختی و در نتیجه افزایش عمق لایه‌ی متأثر از حرارت هم‌زمان با افزایش زمان روشنی پالس می‌گردد.

### تأثیر چرخه‌ی کاری روی میزان سختی و عمق ناحیه‌ی (HAZ)

شکل ۸، تأثیر چرخه‌ی کاری روی تغییرات سختی در زیر سطح قطعات ماشین‌کاری شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هم‌زمان با افزایش چرخه‌ی کاری، میزان افت سختی بیشتر شده و عمق ناحیه‌ی متأثر از حرارت افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع را این‌گونه می‌توان بیان کرد که با افزایش چرخه‌ی کاری، به دلیل افزایش زمان مفید ماشین‌کاری و افزایش مدت زمان تخلیه‌ی انرژی، دمای سطح قطعه‌کار بالاتر رفته و به دلیل افزایش اندازه و عمق چاله‌های مذاب ایجاد شده در روی سطح قطعه‌کار (شکل ۹)، عمق بیشتری از سطح قطعه‌کار تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین به دلیل افزایش بیشتر دمای سطح قطعه‌کار و رخداد عملیات حرارتی برگشت در دمای بالاتر، افت سختی در این ناحیه بیشتر شده و سبب گسترش ناحیه‌ی متأثر از حرارت می‌گردد.

### نتیجه‌گیری

- ۱- با افزایش زمان روشنی پالس میزان افت سختی در لایه‌های نزدیک به سطح بیشتر شده و عمق ناحیه‌ی (HAZ) افزایش می‌یابد.
- ۲- عمق ناحیه‌ی متأثر از حرارت، در حالت قطبیت منفی کمتر است.
- ۳- با افزایش زمان روشنی پالس درصد نفوذ کربن به دست آمده از تجزیه‌ی نفت سفید به لایه‌های سطحی قطعه‌کار افزایش می‌یابد.
- ۴- مقایسه بین نتایج (EDX) سطوح نمونه‌ها قبل و پس از ماشین‌کاری، بیانگر افزایش چشمگیر درصد کربن در لایه‌های سطحی نمونه‌ها پس از عملیات ماشین‌کاری می‌باشد.

به دلیل وجود عناصری مانند نیکل و منگنز در ترکیب شیمیایی قطعه‌کار (فولاد AIAI H13)، آستنیت باقی‌مانده مهم‌ترین عاملی است که سبب کاهش سختی در این ناحیه شده است. عامل بعدی کاهش سختی در این ناحیه، رخداد عملیات حرارتی برگشت<sup>۱</sup> در مدت زمان خاموشی پالس به وسیله‌ی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی در ناحیه‌ی HAZ می‌باشد [۱۲].

دلیل کاهش عمق ناحیه‌ی HAZ در قطبیت منفی را این‌گونه می‌توان توجیه نمود که در قطبیت منفی به دلیل زیاد بودن شعاع کانال پلاسما در روی قطعه‌کار، شار گرمایی ورودی به سطح قطعه‌کار کاهش یافته [۶] و این موضوع سبب می‌شود تا حجم مذاب ایجاد شده به ازای هر جرقه کمتر شده و در نتیجه عمق لایه‌ی متأثر از حرارت (از نظر تغییرات سختی) کمتر گردد (شکل ۵).

### تأثیر زمان روشنی پالس بر روی میزان سختی و عمق ناحیه‌ی (HAZ)

همان‌گونه که شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند، با افزایش زمان روشنی پالس، عمق کاهش سختی (ناحیه‌ی HAZ) در سطح ماشین‌کاری شده در هر دو حالت قطبیت ابزار (مثبت و منفی) افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع را این‌گونه می‌توان توضیح داد که با افزایش زمان روشنی پالس به دلیل افزایش انرژی جرقه‌ها، دمای سطح قطعه‌کار بالاتر رفته و به دلیل تجزیه‌ی بیشتر مایع دی‌الکتریک، غلظت کربن در سطح قطعه‌کار افزایش می‌یابد. با افزایش درصد کربن محیط، احتمال نفوذ اتم‌های کربن به شبکه‌ی کریستالی آهن بیشتر شده و میزان تشکیل آستنیت در این لایه افزایش می‌یابد. همچنین افزایش درصد کربن، نرخ تبدیل آستنیت به مارتنزیت طی فرآیند کوئنچ<sup>۲</sup> را کاهش می‌دهد، لذا در انتهای استحاله مارتنزیتی در سطح قطعه‌کار، مقادیر بیشتری از آستنیت اولیه باقی می‌ماند [۱۱]. همچنین افزایش دمای سطح قطعه‌کار هم‌زمان با افزایش زمان روشنی پالس، سبب می‌شود که عملیات حرارتی برگشت در دمای بالاتری روی ناحیه‌ی (HAZ) انجام گردد. این

1- Tempering

2- Quenching

۶- عمق ناحیه‌ی متأثر از حرارت هم‌زمان با افزایش چرخه‌ی کاری افزایش می‌یابد.

۵- در حالت قطبیت منفی، درصد نفوذ کربن به‌دست آمده از تجزیه‌ی نفت سفید در لایه‌های سطحی نمونه کاهش می‌یابد.

### References:

- 1- D.L. Green., and J.S. Lin., Size, Volume 1- E. C. Jameson, Electrical Discharge Machining, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, p. 1, 2001.
- 2- H.T. Lee and T.Y. Tai, "Relationship between EDM parameters and surface crack formation", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142, pp. 676-683, 2003.
- 3- H. Yan, J. Hua and R. Shivpuri, "Numerical simulation of finish hard turning for AISI H13 die steel", Science and Technology of Advanced Materials, Vol. 6, pp. 540-547, 2005.
- 4- W. Tebni, M. Boujelbene and E. Bayraktar, "Parametric approach model for determining electrical discharge machining (EDM) conditions: Effect of cutting parameters on the surface integrity", The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 34, pp. 101-114, 2009.
- 5- H. Kokubo, H. Takezawa, K. Horio, N. Mohri and T. Yamazaki, "A study on the material removal mechanism in EDM-single discharge experiments with low melting temperature alloy-", American Society for precision Engineering publications, 2004.
- 6- Ph. T. Eubank, M. R. Patel and M. A. Barrufet, "Theoretical models of the electrical discharge machining process, I. A simple

cathode erosion model", Journal of Applied Physics, Vol. 66, pp. 4095-4103, 1989.

7- A. Descoedres, "characterization of electrical discharge machining plasmas", Ph. D. Thesis, University of Lausanne, India, 2006.

۸- ح. خوشکیش، ح. ر. آشتیانی و م. قریشی، "بررسی اثر جنس الکتروود ابزار بر مشخصه‌های ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی فولاد ابزار AISI D3"، اولین کنگره‌ی بین‌المللی مهندسی ساخت و تولید ایران دانشگاه تربیت مدرس، آذر ۱۳۸۴.

۹- م. صادقی اول شهر، ا. اسماعیل زاده و ف. کلاهان، "مدل سازی و بهینه‌سازی فراسنج‌های ماشین‌کاری وایرکات فولاد سردکار ۲۶۰۱ با استفاده از الگوریتم جستجوگر ممنوعه"، دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، اسفند ۱۳۸۸.

10- S. Kumara, R. Singhb, T.P. Singhc and B.L. Sethi, "Surface modification by electrical discharge machining: A review", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 3675-3687, 2009.

۱۱- م. ع. گل‌عذار، اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان ۱۳۷۸.

12- A. Pandey and Sh. Singh, "Current research trends in variants of electrical discharge machining: A review", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(6), pp. 2172-2191, 2010.

## پیوست‌ها

جدول ۱- جنس و ابعاد ابزار و قطعه کار

قطر (mm)	طول (mm)	جنس	مواد
۱۸	۲۰	مس	ابزار (الکتروود)
۲۰	۲۰	AISI H13 Tool Steel	قطعه کار

جدول ۲- فراسنج‌های ورودی و شرایط انجام آزمایش‌ها

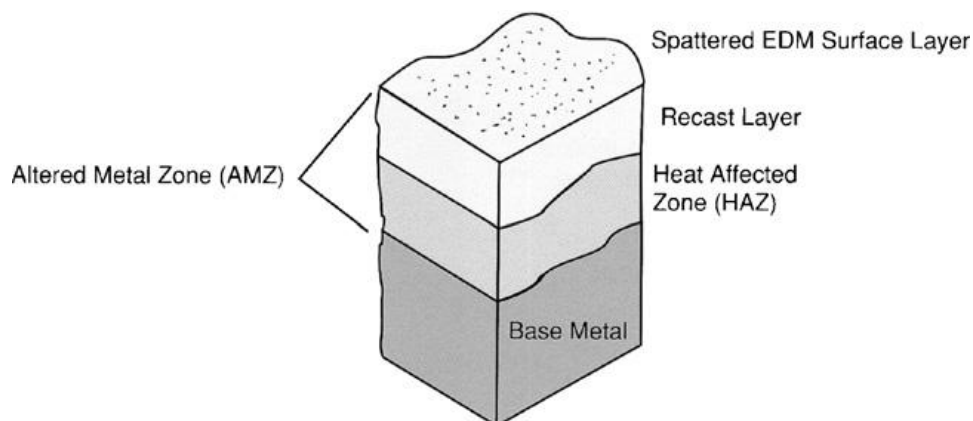
دی الکتریک	نفت سفید
زمان روشنی پالس (μs)	۲،۱۵،۵۰
ولتاژ (V)	۲۰۰
شدت جریان (A)	۱۶
چرخه‌ی وظیفه (%)	۲۰،۳۰،۴۰،۵۰
فاصله‌ی بین ابزار و قطعه کار (mm)	۰،۰۱
قطبیت ابزار	- / +

جدول ۳- نتایج آنالیز EDX از سطح نمونه‌ی فولادی پیش از ماشین‌کاری.

عنصر	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
درصد وزنی	۰،۰۷	۰،۹۶	۰،۷۸	۴،۸۶	۰،۳۸	۹۱،۷۸	۱،۱۸

جدول ۴- تغییرات درصد کربن در سطح نمونه‌های فولادی پس از ماشین‌کاری (براساس نتایج آنالیز EDX).

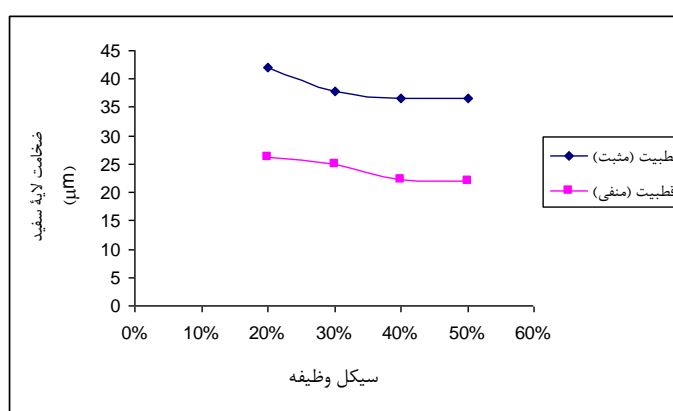
درصد کربن سطحی	نوع قطبیت ابزار	چرخه‌ی وظیفه (درصد)	زمان روشنی پالس (میکروثانیه)
۰،۰۸	+	۳۰	۲
۰،۲۳	-	۲۰	۲
۰،۱۵	+	۳۰	۵۰
۰،۲۴	+	۲۰	۵۰
۰،۱	-	۲۰	۵۰



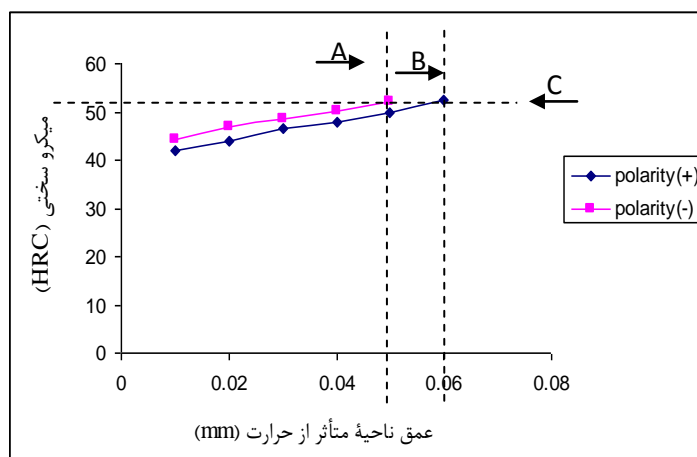
شکل ۱- لایه‌های ایجاد شده پس از عملیات ماشین‌کاری [۱۰]



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ نوری از زیر سطح ماشین‌کاری شده (لایه‌ی سفید)  $T_i=15\mu s$  (ب)  $T_i=50\mu s$  (الف) (Duty cycle=30%, Polarity(+))

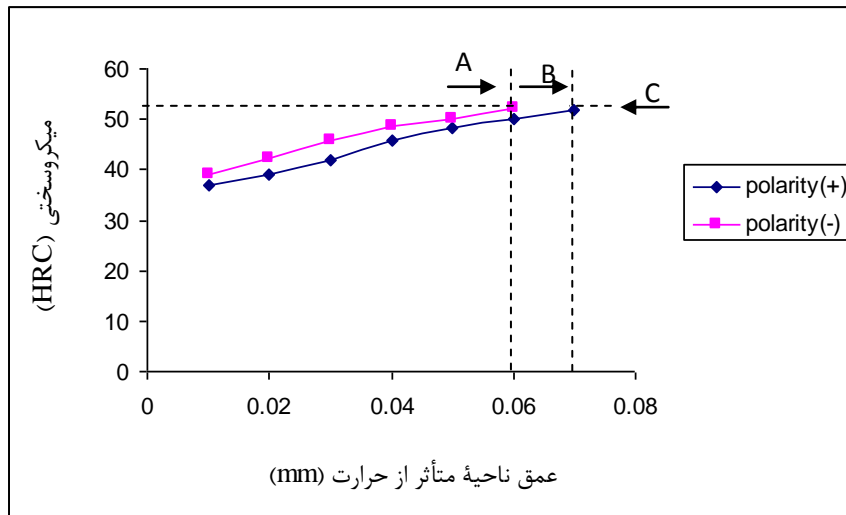


شکل ۳- تغییرات ضخامت لایه‌ی سفید هم‌زمان با افزایش چرخه‌ی کاری ( $T_i=2\mu s$ ).

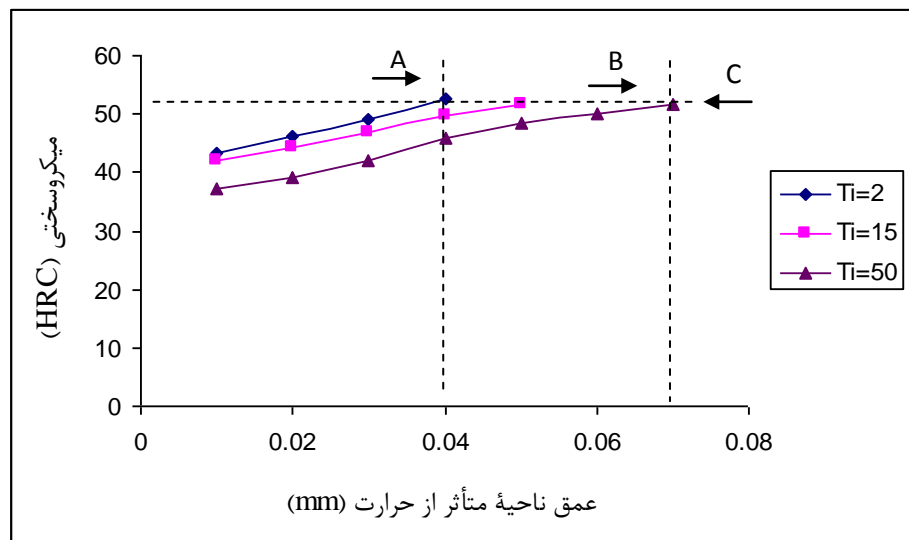


شکل ۴- توزیع میزان سختی در سطح مقطع قطعه کار پس از عملیات ماشین‌کاری ( $T_i=15\mu s$ , Duty cycle=30%)  
 A: بیشینه‌ی عمق ناحیه‌ی (HAZ) در قطبیت منفی، B: بیشینه‌ی عمق ناحیه‌ی (HAZ) در قطبیت مثبت،  
 C: سختی قطعه کار پیش از ماشین‌کاری (52 HRC)

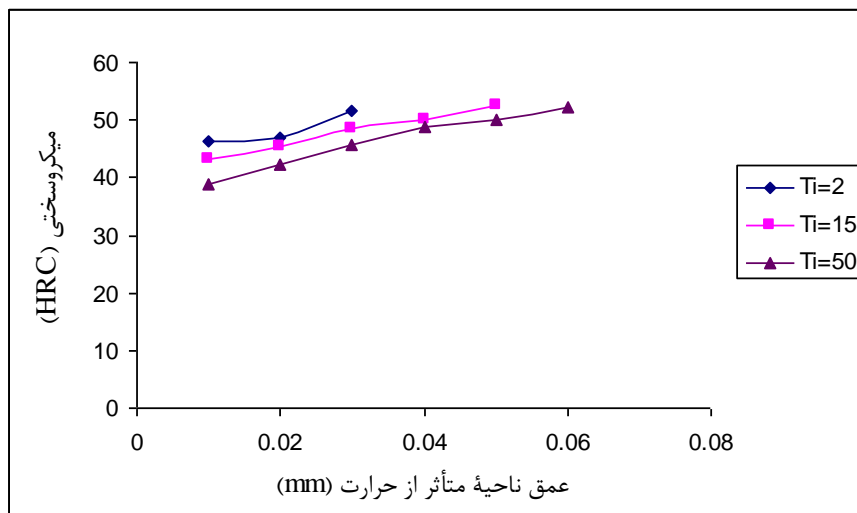


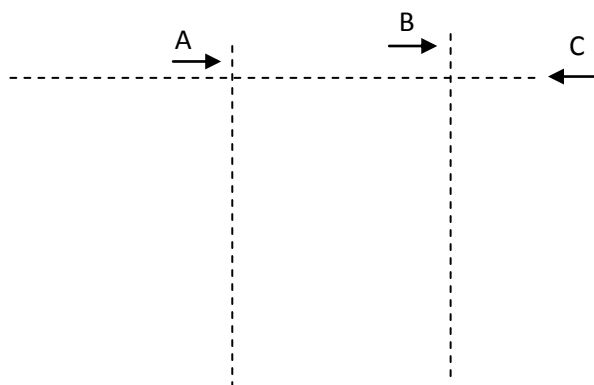


شکل ۵- توزیع میزان سختی در سطح مقطع قطعه کار پس از عملیات ماشین‌کاری  
 A: بیشترین عمق ناحیه‌ی (HAZ) در قطبیت منفی، B: بیشترین عمق ناحیه‌ی (HAZ) در قطبیت مثبت، C: سختی قطعه کار پیش از ماشین‌کاری (52 HRC)

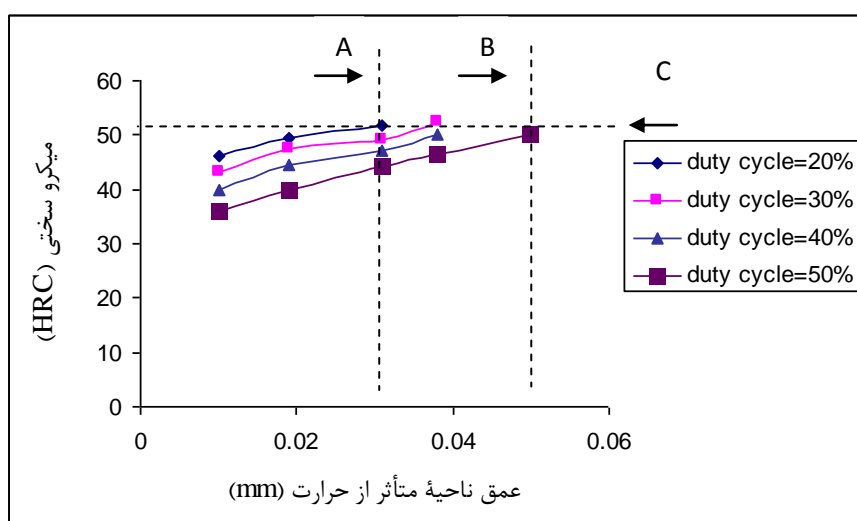


شکل ۶- توزیع میزان سختی در سطح مقطع قطعه کار پس از عملیات ماشین‌کاری  
 A: بیشترین عمق ناحیه‌ی (HAZ) در قطبیت مثبت، B: بیشترین عمق ناحیه‌ی (HAZ) در قطبیت منفی، C: سختی قطعه کار پیش از ماشین‌کاری (52 HRC)

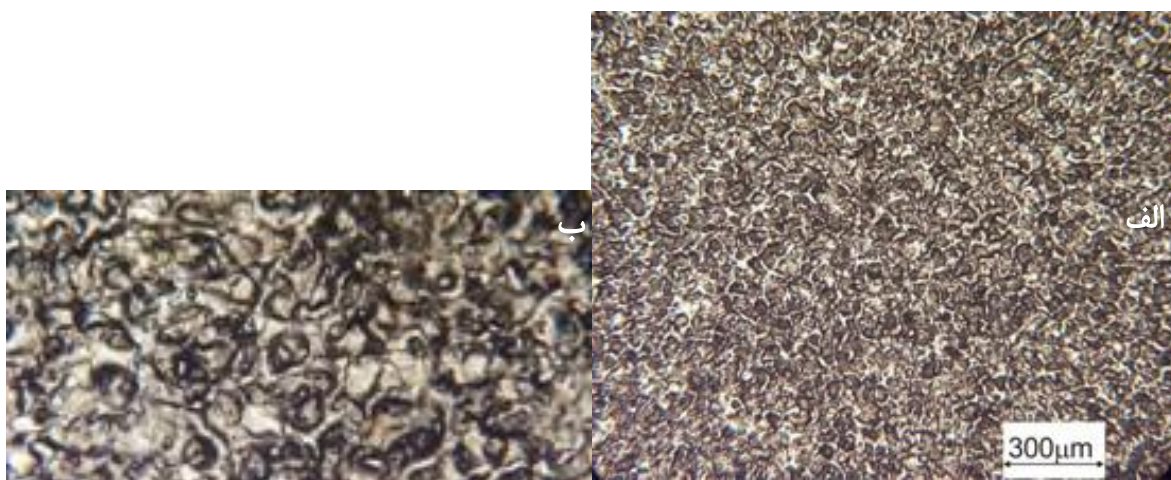




شکل ۷- توزیع میزان سختی در سطح مقطع قطعه کار پس از عملیات ماشین کاری  
 (Polarity(-), Duty cycle=20%) در  $T_i=2\mu s$ : بیشترین عمق ناحیه‌ی (HAZ) A  
 بیشترین عمق ناحیه‌ی (HAZ) در  $T_i=50\mu s$ : C: سختی قطعه کار پیش از ماشین کاری 52 HRC



شکل ۸- توزیع میزان سختی در سطح مقطع قطعه کار پس از عملیات ماشین کاری (Polarity(-),  $T_i=2\mu s$ )  
 A: بیشترین عمق ناحیه‌ی (HAZ) در  $duty\ cycle=20\%$ : B: بیشترین عمق ناحیه‌ی (HAZ) در  $duty$   
 C:  $cycle=50\%$ : سختی قطعه کار پیش از ماشین کاری (52 HRC)



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ نوری از سطح قطعه کارهای فولادی (Polarity(-),  $T_i=15\mu s$ )  
الف) Duty cycle=20% ب) Duty cycle=30%

