

دقت گوشه‌های کوچک - شعاع در برش چندمرحله‌ای در وایرکات

حمید آبیارفیروزآبادی مربی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یزد
 امیر عبدالله دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
 جمشید پرویزیان دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

یکی از مهمترین مشکلات فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی (وایرکات) عدم دستیابی به دقت‌های بالا در ماشینکاری گوشه‌ها و قوس‌ها است. در این تحقیق خطای شعاع گوشه در برش‌های متوالی وایرکات (شامل یک مرحله خشن‌کاری و دو مرحله پرداخت‌کاری) بررسی شده است. تأثیر فرکانس تخلیه، ولتاژ متوسط گپ، و سرعت پیشروی در دو مرحله‌ی پرداخت روی بار باقیمانده روی مسیر مستقیم و قوس گوشه مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که تأثیر بهینه‌سازی این پارامترها روی بار باقیمانده در روی مسیر مستقیم بیشتر از روی قوس گوشه است. به‌هرحال، بهینه‌سازی پارامترها در این دو مرحله، توانست خطای شعاع گوشه را حدود ۱۲ درصد کاهش دهد. همچنین مشخص شد که مرحله‌ی خشن‌کاری موثرترین قسمت برش است و خطاهای ابعادی بیشتر ناشی از مرحله‌ی خشن‌کاری است. کلمات کلیدی: ماشین‌کاری وایرکات، ماده‌ی باقیمانده، دقت گوشه، خیز سیم.

Accurate Machining of Small-Radius Corners by Wire EDM

H. AbyarFirouzabadi Lecturer, Faculty of Engineering, University of Yazd
 A. Abdullah Associate Professor, Mechanical Engineering Department,
 Amirkabir University of Technology
 J. Parvizian Associate Professor, Department of Industrial Engineering,
 Isfahan University of Technology

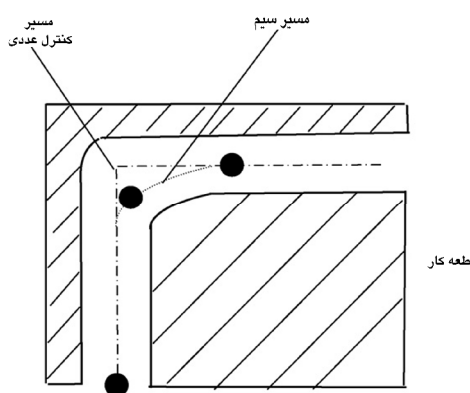
Abstract

Lack of machining accuracy, at corners and corner radii, is one of the major problems in Wire-EDM process. The focus of investigation in this work was on corner radii errors through successive cuts of roughing and finishing operations. Effects of discharge frequency, inter-electrode average gap voltage, and feed-speed were investigated for finishing operations. Residual material left on straight path and over-cut on convex curved path were measured. Results indicated that the influence of the input variable parameters on the thickness of the residual material on straight paths is remarkable in comparison to curved corners. Ultimately, for corner radii, an optimum set of parameters could reduce the errors only by 12%. It was, then, concluded that the roughing operation is the most influential stage of cutting on corner radii.

Keywords: WEDM, Dimensional accuracy of corners, Corner radii, Residual material, Wire deflection.

۱- مقدمه

وایرکات یک فرآیند ماشینکاری پیچیده با طبیعت تصادفی است. عملکرد ماشین و ایرکات کاملاً به پارامترهای ماشینکاری وابسته است. از میان پارامترهای خروجی وایرکات دقت ابعادی نقش اساسی در تعیین جایگاه این فرآیند دارد. با وجود دقت بسیار بالای سیستم‌های کنترل، دستیابی به دقت‌های میکرونی در تولید قوس‌های با قطر کمتر از دو میلیمتر در فرآیند وایرکات کاری سخت و مشکل است. به دلیل وجود نیروهای فرآیندی (الکترواستاتیک، الکتروپنایمیک، الکترومگنتیک، فشار دی‌الکتریک و انفجار پلاسما) و انعطاف‌پذیری سیم، همواره امکان ارتعاش و خم شدن سیم و در نتیجه انحراف آن از مسیر برنامه‌ریزی شده وجود دارد. ماکزیمم انحراف بین موقعیت راهنما (مسیر NC) و سیم تغییر شکل یافته (مسیر واقعی) به عنوان واماندگی سیم^۱ شناخته می‌شود که عامل ایجاد برخی از خطاها در برش وایرکات می‌باشد (شکل ۱) [۱].



شکل ۱- واماندگی سیم در برش گوشه‌ها [۱]

دسته‌ی مهم از مسیرهای برشی در وایرکات، گوشه‌ها و مسیرهای دارای انحنای نسبتاً بالا هستند. گوشه‌ها، که ممکن است محدب^۲ (نر) و یا مقعر^۳ (ماده) باشند، بر حسب شکل هندسی به گوشه‌های تیز^۴، گوشه‌های بزرگ-شعاع^۵ و گوشه‌های کوچک-شعاع^۶ تقسیم‌بندی می‌شوند. در ماشینکاری گوشه‌ها، سیم در اثر برآیند نیروهای متعادل نشده خم می‌شود. این خمیدگی مولفه‌ای در جهت عمود بر مسیر حرکت دارد که سبب انحراف مسیر حرکتی سیم از مسیر کنترل عددی شده و عامل اصلی خطاهای ابعادی در برش گوشه‌های تیز و گوشه‌های کوچک-شعاع می‌باشد.

در تحقیقات انجام شده به‌طور کلی دو دیدگاه برای کاهش و حذف خطاهای هندسی و ابعادی به ویژه در گوشه‌ها وجود دارد [۲-۶]:

- ۱- کاهش تغییر شکل جانبی سیم با کاستن نیروهای جانبی اعمالی به آن و یا افزایش کشش سیم،
- ۲- اصلاح مسیر سیم به منظور جبران انحراف سیم از مسیر کنترل عددی.

در روش نخست به کمک اصلاح پارامترهای ماشین و در روش دوم با استفاده از تغییر مسیر (جابه‌جایی مسیر)، میزان انحراف سیم از مسیر برنامه‌ریزی شده، و در نتیجه خطای هندسی و ابعادی ماشینکاری، کاهش می‌یابد.

دکسر و اسنویز در سال ۱۹۸۹ خطای ماشینکاری گوشه‌های تیز را بررسی نمودند. ایشان سه عامل اصلی ایجاد خطای برش در این گوشه‌ها را واماندگی سیم، افزایش ارتعاشات سیم^۷ و افزایش احتمال تخلیه الکتریکی^۸ معرفی کردند [۲]. ماگارا و همکاران در سال ۱۹۹۱ نشان دادند که با تغییر شرایط ماشینکاری، نظیر زمان خاموشی پالس، خیز سیم می‌تواند به طور موثری کاهش، و دقت هندسی و مستقیم بودن در طول ارتفاع قطعه کار بهبود یابد [۲-۳]. برای تغییر دادن پارامترهای فرآیند به منظور کاهش خیز سیم، هسو و همکاران در سال ۱۹۹۹ یک الگو (استراتژی) پیشنهاد کردند که به موجب آن، با کاهش توان^۹ در گوشه، خیز سیم کاهش می‌یابد. بر اساس این الگو، هنگامی که دقت بالا در گوشه مورد نیاز باشد زمان ماشینکاری طولانی می‌گردد [۳].

اوبارا و همکاران در سال ۲۰۰۳ یک روش ترکیبی کنترل توان و کنترل مسیر برای بهبود دقت گوشه‌ها را در خشن‌کاری وایرکات پیشنهاد کردند. در این روش از کنترل توان برای کاهش خیز سیم و از اصلاح مسیر برای جبران خطا استفاده شده است. بنا بر نظر نویسندگان، در میان روش‌های ماشینکاری گوشه، این روش کمترین زمان ماشینکاری را دارد [۴]. در یک مطالعه دیگر در سال ۲۰۰۳، اوبارا و همکاران با نشان دادن برتری روش کنترل زمان خاموشی پالس در دقت گوشه، بر زمان طولانی برش گوشه در این روش انگشت‌نهادند. بنابراین، ایشان انواع کنترل برای کاهش زمان ماشینکاری در گوشه را بررسی، و در نهایت کنترل زمان خاموشی پالس با کنترل ولتاژ سروو و روش اصلاح مسیر را ترکیب و پیشنهاد نمودند [۵].

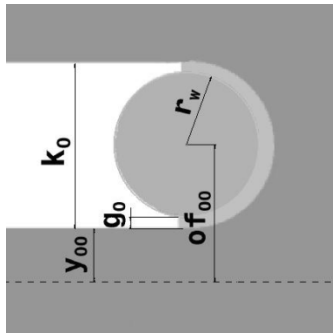
1. Wire-lag
 2. convex corner
 3. concave corner
 4. sharp corner
 5. large-radius corner
 6. small-radius corner

7. Enhanced wire vibrations
 8. Enhanced discharge probability
 9. power

۲- تحلیل برش

در ماشینکاری وایرکات، فاصله‌ی مرکز سیم از مسیر برنامه‌ریزی افست^۱ نامیده می‌شود. تنظیمات برش و همچنین مقادیر افست برای برش‌های یک، دو، و سه مرحله‌ای به وسیله سازنده‌ی ماشین وایرکات پیشنهاد می‌گردد. این مقادیر بسته به ضخامت و جنس قطعه‌کار و سیم تغییر می‌کنند. شکل ۲ برش یک مرحله‌ای وایرکات را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان رابطه‌ی (۱) را برای برش یک مرحله‌ای وایرکات در نظر گرفت:

$$of_{00} = r_w + g_0 + y_{00} \quad (1)$$



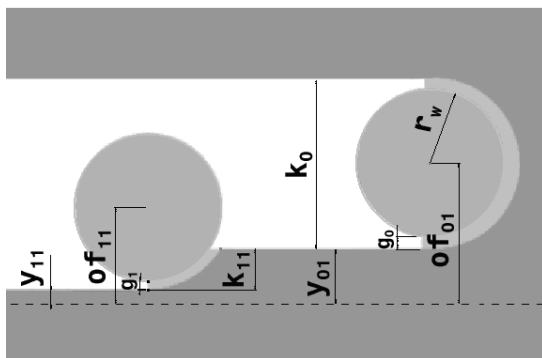
شکل ۲- برش یک مرحله‌ای وایرکات

با توجه به شکل ۳ می‌توان روابط (۲)-(۴) را برای برش دو مرحله‌ای وایرکات نوشت:

$$of_{01} = r_w + g_0 + y_{01} \quad (2)$$

$$of_{01} = r_w + g_0 + k_{11} + y_{11} \quad (3)$$

$$of_{11} = r_w + g_1 + y_{11} \quad (4)$$



شکل ۳- برش دو مرحله‌ای وایرکات

شکل ۴ یک برش سه مرحله‌ای وایرکات را نشان می‌دهد. روابط (۵)-(۹) برای برش سه مرحله‌ای وایرکات برقرار می‌باشند:

$$of_{02} = r_w + g_0 + y_{02} \quad (5)$$

$$of_{02} = r_w + g_0 + k_{12} + k_{22} + y_{22} \quad (6)$$

$$of_{12} = r_w + g_1 + y_{12} \quad (7)$$

$$of_{12} = r_w + g_1 + k_{22} + y_{22} \quad (8)$$

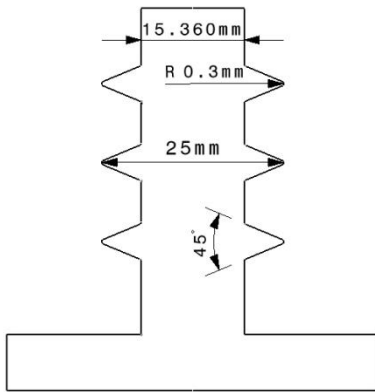
در سال ۲۰۰۴، امکان استفاده از کامپیوتر برای بهینه‌سازی دقت گوشه‌ها، توسط سانچز و همکاران مطرح شد. ایشان یک سیستم جامع کامپیوتری برای پیش‌بینی خطا و اصلاح مسیر سیم ارائه کردند که تلفیقی از یافته‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی بود [۶]. مینگی و همکاران در سال ۲۰۰۵ به روش تجربی نشان دادند که تغییر شکل و موقعیت سیم روی دقت برش گوشه‌ها موثر می‌باشند [۷]. در سال ۲۰۰۷ شکل هندسی گوشه‌ی ایجاد شده در برش‌های متوالی (خشن و پرداخت) توسط سانچز و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه خطاها در نواحی مختلف گوشه شناسایی شده، و به ماده‌ی برداشتی توسط هر برش ارتباط داده شده است. ایشان نتیجه گرفتند که محدودیت سرعت برشی، کنترل مقدار ماده‌ی برداشتی توسط سیم را ممکن می‌سازد. نتیجه‌ی مهم به‌دست‌آمده از بررسی تأثیر محدودیت سرعت در حالت‌های متفاوت ضخامت قطعه، شعاع گوشه و تعداد مراحل برش آن است که در برش‌های متوالی، هر تلاشی برای بهینه‌سازی دقت گوشه باید خطاهای ایجاد شده در برش‌های پیشین را مورد توجه قرار دهد [۸].

یک روش شبیه‌سازی برای خشن‌کاری گوشه‌های تیز توسط هان و همکاران در سال ۲۰۰۷ تدوین گردید. در این روش بر اساس ارتعاش سیم، یک مدل هندسی برای ارتباط مسیر واقعی سیم و مسیر NC پیشنهاد گردیده است. تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی برای زوایای قائم و باز حاصل گردید. اما در مورد زوایای تند، تفاوت‌هایی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی وجود داشت. نویسندگان این را به بریده‌شدن راس زاویه به دلیل کوچک‌بودن زاویه و قدرت بالای خشن‌کاری ارتباط دادند [۱]. هان و همکاران در سال ۲۰۰۸ توزیع سه‌بعدی حرارت روی سیم را مطالعه کردند و بر اساس تحلیل ترمومکانیکی، کشش سیم را مطابق با انرژی تخلیه وارده بر آن بهینه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش کشش سیم دقت شعاع گوشه افزایش یافته و اختلاف بین شعاع گوشه در صفحات میانی و انتهای قطعه کاهش یافته است [۹]. دودان و همکاران در سال ۲۰۰۸ دقت ماشینکاری گوشه‌ها در ورق‌های نازک و تأثیر نیروی الکترومغناطیس روی آنها را بررسی کردند [۱۰].

اهمیت گوشه‌های کوچک-شعاع ناشی از کاربردهای زیاد آنها است. در تحقیق حاضر، خطای هندسی و ابعادی در این گوشه‌ها مورد بررسی قرار گرفته، تأثیر پارامترهای ماشینکاری روی دقت برش مسیر مستقیم و شعاع گوشه تجزیه و تحلیل گشته‌است.

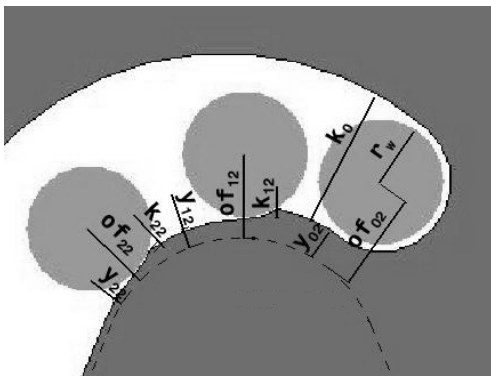
¹. Offset

وسیله کمپراتور مکانیکی در شرایط اتاق تمیز با ابعاد گیج بلوک‌های مینا مقایسه و میزان بار باقیمانده در روی قسمت‌های مختلف آن استخراج گردید.



شکل ۵- شکل هندسی قطعات برش خورده

بررسی‌های اولیه و انجام چند آزمایش نشان داد که با اجرای برش در سه مرحله (یا بیشتر) و به کمک تنظیمات پیشنهادی سازنده می‌توان به زبری سطح کمتر از میکرون در کل مسیر و دقت ابعادی در حد یک میکرون در روی مسیرهای مستقیم (البته با تغییر افست) دست یافت. با این حال، در قوس‌ها و انحناها خطای ابعادی بیشتر از ده میکرون بود. شکل ۶ نمایی از برش سه مرحله‌ای را در روی قوس محدب نشان می‌دهد.



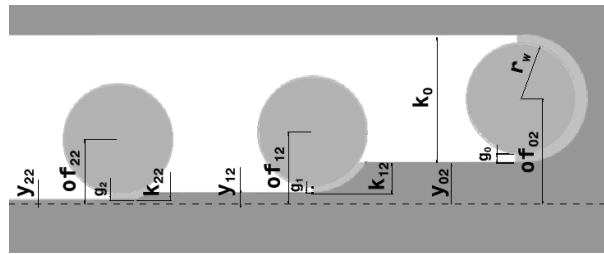
شکل ۶- نمایی از برش سه مرحله‌ای در روی قوس محدب (نز)

اگر بار باقیمانده بعد از مرحله سوم (y_{22}) در روی مسیر مستقیم با y_2^{st} و در روی قوس با y_2^{cr} نشان داده شود برای امکان حذف خطای ماشینکاری باید رابطه (۱۰) برقرار باشد.

$$y_2^{st} = y_2^{cr} \quad (10)$$

با رسیدن به رابطه (۱۰) و با یک تغییر افست می‌توان به بار باقیمانده‌ی صفر در روی مسیر مستقیم و قوس گوشه دست یافت. در این حالت خطای ماشینکاری برابر صفر خواهد شد.

$$of_{22} = r_w + g_2 + y_{22} \quad (9)$$



شکل ۴- برش سه مرحله‌ای و ایرکات

ایجاد برش دقیق و دستیابی به شکل هندسی مطلوب در برش یک، دو و سه مرحله‌ای باید به ترتیب مقادیر y_{11} ، y_{00} و y_{22} برابر صفر گردند. معمولاً در برش‌هایی که به کمک تنظیمات پیشنهادی سازنده انجام می‌شوند مقادیر پارامترهای فوق همه جا برابر صفر نمی‌گردد و یک اضافه بار برداشت شده یا یک بار باقیمانده وجود دارد. در این تحقیق با انجام آزمایش‌هایی سعی شده است تا تأثیر پارامترهای جرقه بر روی دقت ابعادی در روی مسیر مستقیم و قوس گوشه (شعاع گوشه) مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳- مواد، شرایط انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری

در این تحقیق آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های فولاد ابزار به ابعاد (۹×۴۹×۵۴) میلی‌متر از جنس ۱۰۲۵۱۰ (AISI:O1) انجام شدند. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، پس از فرزکاری، طبق استاندارد ASM عملیات حرارتی تنش‌گیری اجرا [۱۱] و سپس کلیه سطوح آنها با دقت توازی ± 2 دقیقه سنگ‌زده شدند. برای جلوگیری از ایجاد تنش پسماند، عملیات سنگ‌زنی با بار کم و مایع خنک‌کاری زیاد انجام پذیرفت. نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی با استفاده از ساعت میکرونی روی میز ماشین و ایرکات تنظیم و بسته شدند. همه‌ی آزمایش‌های این تحقیق به وسیله‌ی ماشین و ایرکات Charmilles Robofil 200 و با سیم Sw25X (با قطر ۰/۲۵ میلی‌متر) انجام گردیدند. سیم مورد استفاده همان سیم پیشنهادی سازنده در کاتالوگ ماشین بود. با در نظر گرفتن حداقل فاصله کنگی‌های بالا و پایین ماشین تا سطح بالا و پایین قطعه‌کار، نمونه‌ها مطابق آزمایش‌های طراحی شده، بریده شدند. در حین انجام آزمایش‌ها سعی شد که شرایط محیطی پایدار و ثابت بماند. برای اندازه‌گیری بار باقیمانده از کمپراتور مکانیکی Peacock در شرایط اتاق تمیز استفاده شد.

مسیر برش به صورت متقارن مطابق شکل ۵ به گونه‌ای برنامه‌نویسی شد که ضخامت قطعه در روی مسیر مستقیم برابر ۱۵/۳۶۰ میلی‌متر و روی قوس گوشه برابر ۲۵ میلی‌متر، و شعاع قوس برابر ۳۰۰ میکرون باشد. بعد از برش قطعه، این ابعاد به

$$(۹) \Rightarrow g_2 = 134 - 125 = 9 \mu m$$

در فرآیند تخلیه الکتریکی با تغییر پارامترهای جرقه، اندازه‌ی گپ جرقه تغییر می‌کند. بنابراین با کنترل گپ جرقه می‌توان مقدار بار باقیمانده در روی مسیر مستقیم و قوس گوشه را کنترل نمود. جدول ۲ تنظیمات پیشنهادی سازنده برای برش سه مرحله‌ای با ماشین مورد آزمایش برای فولاد به ضخامت ۱۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

در آزمایش‌های اولیه‌ای که با تنظیمات جدول ۲ (برش سه مرحله‌ای) و شکل ۵ انجام شد اختلاف بین y_2^{st} و y_2^{cr} حدود ۱۰ میکرون به دست آمد. از آنجا که روشن نبود این اختلاف در کدام مرحله‌ی برش ایجاد شده، و با توجه به آنکه بار باقیمانده در مرحله‌ی خشن‌کاری در برش سه مرحله‌ای $33 \mu m$ $y_{02} =$ است، به نظر می‌رسید که می‌توان با بهینه‌سازی پارامترها در دو مرحله‌ی پرداخت از میزان این اختلاف کاست. با مطالعه‌ی منابع و بررسی قابلیت‌های ماشین وایرکات به نظر می‌رسد که پارامترهای فرکانس تخلیه، سرعت پیشروی و ولتاژ گپ می‌توانند بیشترین تاثیر را بر میزان بار باقیمانده در فرآیند وایرکات داشته باشند. از کاتالوگ شرکت سازنده (جدول ۲) برای تعیین سطح پارامترها کمک گرفته شد [۱۲].

$$y_2^{st} = y_2^{cr} = 0 \Rightarrow error = 0$$

بررسی‌ها نشان می‌دهند که در ماشینکاری به وسیله وایرکات معمولاً رابطه (۱۰) حاصل نشده و در ماشین‌کاری یک قوس محدب $y_2^{cr} < y_2^{st}$ است در حالی که در یک قوس مقعر $y_2^{cr} > y_2^{st}$ است. جدول ۱ مقادیر افست پیشنهادی سازنده‌ی ماشین مورد آزمایش در برش یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و سه مرحله‌ای برای فولاد به ضخامت ۱۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد

با فرض ماشینکاری ایده‌آل (مقادیر y_{00} ، y_{11} و y_{22} برابر با صفر)، به کمک مقادیر جدول ۱ و روابط (۱) - (۹) می‌توان بار باقیمانده، گپ جرقه و عمق باربرداری را برای هر مرحله‌ی برش تعیین نمود:

$$(۱) \Rightarrow g_0 = 165 - 125 = 40 \mu m$$

$$(۲) \Rightarrow y_{01} = 189 - 125 - 40 = 24 \mu m$$

$$(۳) \Rightarrow k_{11} = 189 - 125 - 40 = 24 \mu m$$

$$(۴) \Rightarrow g_1 = 134 - 125 = 9 \mu m$$

$$(۵) \Rightarrow y_{02} = 198 - 125 - 40 = 33 \mu m$$

طبق شکل‌های (۳) و (۴) داریم:

$$k_{12} = k_{11} = 24 \mu m$$

$$(۶) \Rightarrow k_{22} = 198 - 125 - 40 - 24 = 9 \mu m$$

$$(۷) \Rightarrow y_{12} = 143 - 125 - 9 = 9 \mu m$$

جدول ۱- مقادیر افست پیشنهادی سازنده برای برش یک، دو و سه مرحله‌ای برای فولاد به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (μm) [۱۲]

مرحله	تعداد مرحله	یک مرحله‌ای	دو مرحله‌ای	سه مرحله‌ای
خشن‌کاری		$of_{00} = 165$	$of_{01} = 189$	$of_{02} = 198$
پرداخت اول		-	$of_{11} = 134$	$of_{12} = 143$
پرداخت دوم		-	-	$of_{22} = 143$

جدول ۲- مقادیر پیشنهادی سازنده برای پارامترهای مختلف وایرکات در ماشینکاری سه مرحله‌ای برای فولاد به ضخامت ۱۰ میلی‌متر

[۱۲]

پارامتر	خشن‌کاری		پرداخت اول		پرداخت دوم	
	کد	مقدار	کد	مقدار	کد	مقدار
M	۱	-	۷	-	۷	-
C	۶	$33 \mu F$	۰	۰	۰	۰
V	-۳	$120 V$ سیم قطب منفی	-۳	$120 V$ سیم قطب منفی	-۳	$120 V$ سیم قطب منفی
P	۱۱	$32 A$	۹	$16 A$	۷	$8 A$
A	۴	$64 \mu s$	۲	$16 \mu s$	۱	$0.8 \mu s$
w_b	۱	$10 N$	۱/۲	$12 N$	۱/۲	$12 N$
w_s	۶	$6 m/min$	۶	$6 m/min$	۶	$6 m/min$
A_j	۵۰	۵۰ درصد ولتاژ مدار باز	۳۵	۳۵ درصد ولتاژ مدار باز	۳۳	۳۳ درصد ولتاژ مدار باز
S	۰.۸۴	$614 mm/min$	۴	$2928 mm/min$	۳	$2196 mm/min$
f	۱۸	$18 kHz$	۱۲۵	$125 kHz$	۲۰۰	$200 kHz$

جدول ۴- پارامترهای متغیر در مرحله پرداخت اول. مقادیر پرننگ توصیه‌ی سازنده می‌باشند

پارامترها	تعداد سطح	مقادیر پارامترها		
		۱۰۹	۱۱۷	۱۲۵
f (kHz)	۳	۳۵ (۴۲)	۳۶ (۴۳,۲)	۳۷ (۴۴,۴)
A_j % (V)	۳	۲,۵ (۱,۸,۳)	۴ (۲۹,۲۸)	۵,۵ (۴۰,۲۶)
S code (mm/min)	۳			

۴-۱- تحلیل بار باقیمانده روی مسیر مستقیم برای پارامترهای مرحله پرداخت اول

ابتدا پاسخ y_2^{st} در حالت درجه دوم کامل^۲ با سطح اطمینان^۳ ۹۵ درصد تجزیه و تحلیل گردید. با این سطح اطمینان، مقدار احتمال (P) برای اثر متقابل پارامترها بیشتر از ۰,۰۵ به دست آمد. این تحلیل نشان داد که اثرات متقابل پارامترها در معادله رگرسیون تاثیر ناچیزی^۴ دارند و مدل بدون در نظر گرفتن این اثرات می‌تواند پیش‌بینی بهتری را ارائه دهد. بنابراین برای افزایش برازش^۵ مدل، این عبارات غیرموثر را تک تک از تحلیل حذف و تحلیل مجددی بدون در نظر گرفتن آنها انجام شد. مدل رگرسیون رابطه (۱۱) برای پاسخ y_2^{st} حاصل شده است.

$$y_2^{st} = -1491.77 + 4.02 f + 69.97 A_j - 2.71 S - 0.02 f^2 - 0.97 A_j^2 + 0.38 S^2 \quad (11)$$

معادله رگرسیونی (۱۱) ارتباط بین خروجی y_2^{st} با پارامترهای ورودی را نشان می‌دهد. به بیانی دیگر، این معادله به کمک یک چند جمله‌ای پارامترهای ورودی مستقل را به خروجی مرتبط می‌سازد. جدول ۵ ضرایب مدل رگرسیون (۱۱) و آماره‌های کیفیت آن را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، تمام پارامترها (سه پارامتر مورد مطالعه) و همچنین توان دو آنها با سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P \leq 0.05$) تاثیر قابل توجهی در معادله رگرسیون دارند و به عنوان اثرات بحرانی و مهم فرآیند شناخته می‌شوند.

نمودارهای اثرات پارامترهای متغیر در شکل ۷ نشان از آن دارد که تغییر سطوح پارامترهای مورد مطالعه تغییر قابل توجه در مقدار y_2^{st} ایجاد می‌کنند. با توجه به این نمودارها، سطح فرکانس برابر ۱۰۹ کیلوهرتز، ولتاژ سروو برابر ۳۵ درصد (۴۲۷)

برای استخراج پارامترهای بهینه‌ی مرحله‌ی پرداخت اول، نخست خشن‌کاری با همان پارامترهای پیشنهادی سازنده انجام شد. سپس طبق آزمایش‌های طراحی شده، سطوح مختلف پارامترهای متغیر در پرداخت اول آزموده شدند. آنگاه پرداخت دوم با پارامترهای پیشنهادی سازنده انجام گرفت. در نهایت خروجی‌های y_2^{st} و y_2^{CF} بعد از انجام پرداخت دوم اندازه‌گیری شدند. با تحلیل این خروجی‌ها، پارامترهای بهینه‌ی مرحله‌ی پرداخت اول استخراج شدند. برای مشخص کردن پارامترهای بهینه‌ی مرحله‌ی پرداخت دوم، نخست خشن‌کاری با همان پارامترهای پیشنهادی سازنده اجرا و سپس پرداخت اول با پارامترهای بهینه‌ی به دست آمده از بررسی قبل انجام شد. بعد از آن در مرحله‌ی پرداخت دوم، مطابق آزمایش‌های طراحی شده، سطوح مختلف پارامترهای متغیر بررسی و خروجی‌های y_2^{st} و y_2^{CF} اندازه‌گیری شدند. با تحلیل این خروجی‌ها، پارامترهای بهینه‌ی مرحله‌ی پرداخت دوم هم استخراج شدند. در تحقیق حاضر، برای شناسایی و توصیف دقیق اثر متقابل بین متغیرها (زمانی که آنها به طور همزمان تغییر می‌کنند [۱۳-۱۵]) روش رویه‌ی پاسخ (RSM) طرح باکس-بنکن^۱ و برای تحلیل داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزار آماری Minitab® 15.1.0.0 استفاده شده است.

به منظور کاهش انرژی جرقه‌ها و در نتیجه افزایش بار باقیمانده، در مراحل پرداخت اول و دوم مقدار پارامتر Power تا حد ممکن کوچک انتخاب گردید (جدول ۳). برای انتخاب این مقدار به پایدار بودن جرقه‌ها و پیوسته بودن باربرداری توجه شد.

جدول ۳- مقادیر Power در مراحل پرداخت

پرداخت اول	کد	۸
		مقدار
پرداخت دوم	کد	۶
	مقدار	۶A

۴-۲ تجزیه و تحلیل آزمایش‌های مرحله پرداخت اول

در این جا تاثیر پارامترهای f (فرکانس)، A_j (ولتاژ گپ یا سروو) و S (سرعت پیشروی یا همان سرعت جبران فاصله ایجاد شده‌ی ناشی از تخلیه الکتریکی به وسیله سروکنترلر) در مرحله‌ی پرداخت اول روی پاسخ‌های y_2^{st} و y_2^{CF} بررسی می‌گردد. جدول ۴ سطوح مختلف پارامترها در مرحله پرداخت اول را نشان می‌دهد. بعد از انجام آزمایش‌ها، بار باقیمانده روی مسیر مستقیم (y_2^{st}) و روی قوس گوشه (y_2^{CF}) اندازه‌گیری شد و به عنوان پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفت.

2. Full quadratic

3. Confidence level

4. Insignificant

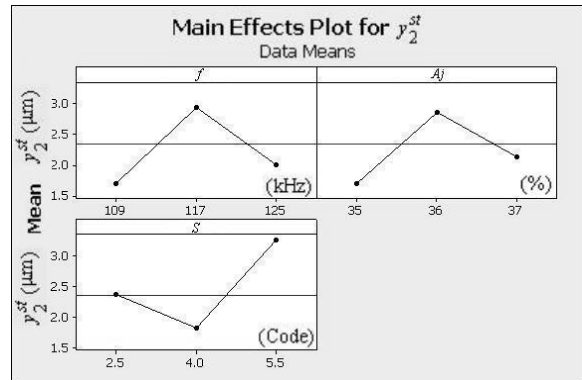
5. Fit

1. Box and-Behnken

۴-۲- تحلیل بار باقیمانده روی قوس گوشه برای پارامترهای مرحله پرداخت اول

پاسخ y_2^{CR} در حالت درجه دوم کامل با سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P \leq 0.05$) تجزیه و تحلیل شد. جدول ۶ ضرایب مدل رگرسیون حاصل از این تحلیل و آماره‌های کفایت آن را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول می‌توان نتیجه گرفت که در این تحلیل، تمام پارامترها و اثرات متقابل آنها مگر S^2 ، تأثیر شاخصی در معادله رگرسیون نداشته و غیر مؤثر می‌باشند. بنابراین با سطح اطمینان ۹۵ درصد، مدل رگرسیونی برای پاسخ y_2^{CR} حاصل نمی‌شود.

و سرعت پیشروی کد ۴ (۲۹,۲۸mm/min) کمترین مقدار y_2^{st} را ایجاد نموده‌اند.



شکل ۷- نمودار اثرات پارامترهای متغیر بر روی پاسخ y_2^{st}

جدول ۵- ضرایب مدل رگرسیون برای پاسخ y_2^{st} و آماره‌های کفایت آنها

Term	Coef.	SE Coef.	T	P
Constant	-۱۴۹۱,۷۷	۲۲۸,۸۸۶	-۶,۵۱۸	۰,۰۰۰
f	۴,۰۲	۰,۶۲۹	۶,۳۸۴	۰,۰۰۰
A_j	۶۹,۹۷	۱۲,۳۹۳	۵,۶۴۶	۰,۰۰۰
S	-۲,۷۱	۰,۶۱۷	-۴,۳۹۰	۰,۰۰۲
f^2	-۰,۰۲	۰,۰۰۳	-۶,۳۵۵	۰,۰۰۰
A_j^2	-۰,۹۷	۰,۱۷۲	-۵,۶۲۹	۰,۰۰۰
S^2	۰,۳۸	۰,۰۷۶	۴,۹۰۲	۰,۰۰۱
S = ۰,۳۳۰۷۱۹ PRESS = ۲,۶۲۵ $R^2 = ٪۹۳,۷۴$ $R^2 (adj) = ٪۸۹,۰۴$				

جدول ۶- ضرایب مدل رگرسیون برای پاسخ y_2^{CR} و آماره‌های کفایت آنها

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-۲۵۰,۳۴۱	۲۲۹,۷۸۵	-۱,۰۸۹	۰,۳۲۶
f	۰,۵۳۴	۰,۹۱۴	۰,۵۸۴	۰,۵۸۴
A_j	۱۰,۷۱۹	۱۱,۸۲۶	۰,۹۰۶	۰,۴۰۶
S	۸,۵۴۳	۴,۰۵۱	۲,۱۰۹	۰,۰۸۹
f^2	-۰,۰۰۳	۰,۰۰۳	۱,۰۳۵	۰,۳۴۸
A_j^2	-۰,۰۸۳	۰,۱۶۱	-۰,۵۱۷	۰,۶۲۷
S^2	۰,۳۴۱	۰,۰۷۲	۳,۳۶۲	۰,۰۲۰
$f \times A_j$	-۰,۰۳۱	۰,۰۱۹	-۱,۶۱۵	۰,۱۶۷
$f \times S$	-۰,۰۰۱	۰,۰۱۳	-۰,۸۰۸	۰,۴۵۶
$A_j \times S$	-۰,۲۵۰	۰,۱۰۳	-۲,۴۲۳	۰,۰۶۰
S = ۰,۳۰۹۵۷۰ PRESS = ۵,۳۷۵ $R^2 = ٪۸۸,۰۲$ $R^2 (adj) = ٪۶۶,۴۶$				

جدول ۷- پارامترهای متغیر در مرحله پرداخت دوم. مقادیر تیره توصیه‌ی سازنده می‌باشند

پارامترها	تعداد سطح	مقادیر پارامترها		
		۱۶۵	۲۰۰	۲۳۵
f (kHz)	۳	۱۶۵	۲۰۰	۲۳۵
A_j % (v)	۳	۳۳ (۳۹,۶)	۳۴ (۴۰,۸)	۳۵ (۴۲)
S code(mm/min)	۳	۲ (۱۴,۶۴)	۳ (۲۱,۹۶)	۴ (۲۹,۲۸)

با اندازه‌گیری و تحلیل خروجی‌های y_2^{st} و y_2^{cr} پارامترهای بهینه‌ی پرداخت دوم استخراج گردیده است.

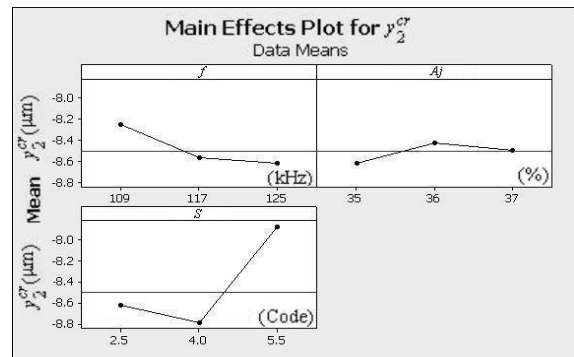
۵-۱- تحلیل بار باقیمانده روی مسیر مستقیم برای پارامترهای مرحله پرداخت دوم

چون پیش، در این مرحله نیز ابتدا پاسخ y_2^{st} در حالت درجه دوم کامل با سطح اطمینان ۹۵ درصد تجزیه و تحلیل شد. در این تحلیل مقدار احتمال (P) برای اثر متقابل پارامترها بیشتر از ۰/۰۵ به دست آمد. بنابراین برای افزایش برازش مدل رگرسیون، اثر متقابل پارامترها تک تک از تحلیل حذف و تحلیل مجددی بی در نظر گرفتن آنها انجام شد. در نتیجه مدل رگرسیون رابطه (۱۲) برای پاسخ y_2^{st} به دست آمد.

$$y_2^{st} = -739.806 + 0.32 f + 41.646 A_j - 4.813 S - 0.001 f^2 - 0.604 A_j^2 + 0.896 S^2 \quad (12)$$

از جدول ۸ می‌توان دید که، در این مدل، تمام اثرات پارامترها و همچنین توان دوم آنها معنی‌دار بوده، در نتیجه اثرات بحرانی و مهم فرآیند می‌باشند. همچنین شاخص‌های آماری این جدول نشان می‌دهند که با سطح اطمینان ۹۵ درصد، مدل به دست آمده از قدرت پیش‌بینی و برازش خوبی برخوردار است.

روند تأثیر پارامترهای متغیر بر روی خروجی y_2^{cr} در شکل ۸ آشکار است. تأثیر پارامترها روی خروجی‌های y_2^{st} و y_2^{cr} به دلیل ماهیت یکسان آنها، در آزمایش‌های مشابه باید تقریباً یکسان باشد؛ یعنی به ازای هر مقدار افزایش در y_2^{st} باید به همان مقدار کاهش در y_2^{cr} مشاهده گردد چرا که مقدار y_2^{cr} منفی است. ولی نتایج حاصل از بررسی پارامترها در مرحله پرداخت اول (آزمایش‌های بالا) این موضوع را تأیید نمی‌کنند. مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ مشخص می‌کند که بعضی از پارامترها بر خلاف اینکه اثر قابل توجهی روی y_2^{st} داشته‌اند روی y_2^{cr} مؤثر نبودند. سطح بهینه‌ی پارامترها سطحی است که بتواند مقادیر بار باقیمانده در روی مسیر مستقیم و قوس را به هم نزدیک کند. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل y_2^{st} و y_2^{cr} ، سطوح ۱۰۹ کیلوهرتز برای فرکانس، ۳۶ درصد (۴۳/۲۷) برای ولتاژ سروو و کد ۵/۵ (۴۰/۲۶ mm/min) برای سرعت پیشروی به عنوان سطوح بهینه برای مرحله‌ی پرداخت اول مشخص شدند.



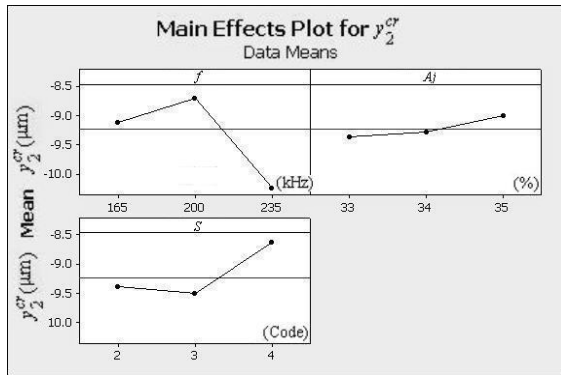
شکل ۸- نمودار اثرات پارامترهای متغیر بر روی پاسخ y_2^{cr}

۵- تجزیه و تحلیل آزمایش‌های مرحله پرداخت دوم

برای مشخص کردن پارامترهای بهینه‌ی مرحله پرداخت دوم، آزمایش‌ها طبق روندی که قبلاً توضیح داده شد انجام گرفت. جدول ۷ سطوح مختلف پارامترهای متغیر در مرحله پرداخت دوم را نشان می‌دهد.

جدول ۸- ضرایب مدل رگرسیون برای پاسخ y_2^{st} و آماره‌های کیفیت آن

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-۷۳۹,۸۰۶	۲۸۵,۵۲۰	-۲,۵۹۱	۰,۰۳۲
f	۰,۳۲۰	۰,۰۸۱	۳,۹۶۹	۰,۰۰۴
A_j	۴۱,۶۴۶	۱۶,۷۴۸	۲,۴۸۷	۰,۰۳۸
S	-۴,۸۱۳	۱,۴۸۷	-۳,۲۳۶	۰,۰۱۲
f^2	-۰,۰۰۱	۰,۰۰۰	-۲,۹۷۶	۰,۰۰۴
A_j^2	-۰,۰۰۴	۰,۰۰۰	-۲,۴۵۳	۰,۰۴۰
S^2	۰,۸۹۶	۰,۲۴۶	۳,۶۳۷	۰,۰۰۷
S = ۰,۴۷۳۲۴۲		PRESS = ۶	$R^2 = ۰,۸۸۲۴$	R^2 (adj) = ۰,۷۹۴۲



شکل ۱۰- نمودار اثرات پارامترهای متغیر بر روی پاسخ y_2^{cr}

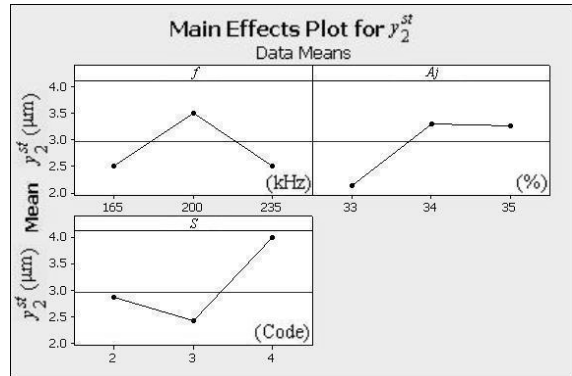
۶- بحث و بررسی نتایج

نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که در ماشین‌کاری وایرکات میزان بار باقیمانده در کل مسیر برش یکسان نیست و در برش سه مرحله‌ای گوشه‌ی کوچک-شعاع محدب، سیم بار بیشتری (حدود ده میکرون) نسبت به مسیر مستقیم برداشت می‌کند. برای کاهش این اختلاف، با انجام آزمایش‌ها، میزان تأثیر پارامترهای فرکانس تخلیه، ولتاژ گپ و سرعت پیشروی دو مرحله‌ی پرداخت بر روی پاسخ‌های y_2^{cr} و y_2^{st} به کمک نمودارهای آماری مشخص گردید.

پارامتر فرکانس مشخص‌کننده تعداد جرقه (تخلیه) در واحد زمان می‌باشد. بنابراین با افزایش فرکانس تخلیه، تعداد جرقه در واحد زمان افزایش می‌یابد. با فرض اینکه میزان ماده برداشت‌شده توسط هر جرقه ثابت و مشخص باشد با افزایش فرکانس تخلیه، میزان ماده برداشت‌شده در واحد زمان نیز افزایش می‌یابد. پارامتر ولتاژ گپ یا ولتاژ کنترل فاصله، میانگین حداقل و حداکثر مقدار ولتاژ گپ می‌باشد. فاصله بین سیم و قطعه بر اساس این ولتاژ تعیین می‌شود. با افزایش ولتاژ گپ، فاصله بین سیم و قطعه‌کار نیز افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله‌ی گپ، زمان پیدایش پلاسما طولانی‌تر شده و در نتیجه نرخ باربرداری کاهش می‌یابد. با انجام هر تخلیه الکتریکی، مقداری ماده از پیش روی سیم برداشته می‌شود و فاصله‌ی بین سیم و قطعه‌کار افزایش می‌یابد.

برای جبران این فاصله، از پارامتر سرعت پیشروی کمک گرفته می‌شود. در حقیقت این پارامتر، سرعت جبران فاصله‌ی بین سیم و قطعه‌کار برای رسیدن به فاصله‌ی تعادلی است. افزایش پارامتر سرعت پیشروی، سرعت جبران این فاصله را افزایش داده، باعث حرکت سریع‌تر سیم روی مسیر برش و کاهش برداشت ماده از سطح جانبی در عملیات نیمه‌پرداخت و پرداخت می‌شود. منظور از سطح جانبی، سطحی از قطعه است که در هنگام باربرداری، مقابل سطح جانبی سیم قرار گرفته است.

شکل ۹ اثرات اصلی پارامترها بر روی خروجی y_2^{st} را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان چگونگی تأثیر تغییرات ورودی‌های مستقل در تعیین مقدار y_2^{st} را مشاهده نمود. با توجه به این نمودار سطح فرکانس ۱۶۵ کیلوهرتز، ولتاژ سروو ۳۳ درصد (۳۹،۶۷) و سرعت پیشروی کد ۳ (۲۱،۹۶mm/min) کمترین مقدار y_2^{st} را ایجاد کرده‌اند.



شکل ۹- نمودار اثرات پارامترهای متغیر بر روی پاسخ y_2^{st}

۵-۲- تحلیل بار باقیمانده روی قوس گوشه برای پارامترهای مرحله پرداخت دوم

پاسخ y_2^{cr} در حالت درجه دوم کامل تجزیه و تحلیل گردید. آماره‌های کفایت مدل رگرسیون حاصل از این تحلیل نشان می‌دهند که با سطح اطمینان ۹۵ درصد، تمام پارامترها و اثرات متقابل آنها مگر f^2 ، غیر موثر می‌باشند (جدول ۹). بنابراین با این سطح اطمینان برای پاسخ y_2^{cr} نمی‌توان مدل رگرسیونی با قدرت برازش مناسب ارائه نمود.

به دلیل اینکه تنها پارامتر f^2 (در جدول ۹) موثر می‌باشد مدل حاصل از این تحلیل نمی‌تواند پیش‌بینی خوبی از پاسخ y_2^{cr} را ارائه نماید. اثرات پارامترهای متغیر، شکل ۱۰، نشان می‌دهند که سطح فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز، ولتاژ سروو ۳۵ درصد و سرعت پیشروی کد ۴ بیشترین مقدار y_2^{cr} را سبب شده‌اند با توجه به شکل ۱۰ بیشترین مقدار y_2^{cr} در فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز، ولتاژ سروو ۳۵ درصد (۴۲۷) و سرعت پیشروی کد ۴ (۲۹،۲۸mm/min) حاصل شده است.

جدول ۹- ضرایب مدل رگرسیون برای پاسخ Y_2^{cr} و آماره‌های کفایت آنها

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	۱۰۵۱۴۷	۲۲۷۴۱۱	۰.۴۶۲	۰.۶۶۳
f	-۰.۰۷۴	۰.۱۹۲	-۰.۳۸۸	۰.۷۱۴
Aj	-۶۲۰۵	۱۳۱۷۷	-۰.۴۷۱	۰.۶۵۸
S	-۲۲۵۰	۶۴۹۸	-۰.۳۴۶	۰.۷۴۳
f^2	-۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	-۴.۸۵۸	۰.۰۰۵
Aj^2	۰.۰۶۲	۰.۱۹۳	۰.۳۲۴	۰.۷۵۹
S^2	۰.۴۳۸	۰.۱۹۳	۲.۲۶۷	۰.۰۷۳
$f \times Aj$	۰.۰۱۱	۰.۰۰۵	۲.۰۲۳	۰.۰۹۹
$f \times S$	۰.۰۰۰	۰.۰۰۵	۰.۰۰۰	۱.۰۰۰
$Aj \times S$	۰.۰۰۰	۰.۱۸۵	۰.۰۰۰	۱.۰۰۰
$S = ۰.۳۷۰۸۱۰$	$PRESS = ۴۱۲۵$	$R^2 = ٪۹۲.۷۱$	$R^2 (adj) = ٪۷۹.۵۹$	

چنان‌که گفته شد با کنترل چگالی اصابت جرقه بر سطح جانبی قطعه کار می‌توان بار باقیمانده در روی مسیر مستقیم و قوس را کنترل نمود ولی نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با کنترل پارامترهای مراحل پرداخت نمی‌توان اختلاف بار باقیمانده‌ی مسیر مستقیم و قوس را به طور کامل از بین برد. این نتایج همچنین نشان می‌دهند که تأثیر کنترل پارامترهای مراحل پرداخت روی بار باقیمانده‌ی مسیر مستقیم بیشتر از بار باقیمانده روی قوس است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مرحله‌ی خشن‌کاری در ایجاد بار باقیمانده‌ی کمتر در روی قوس محدب گوشه تأثیر بسزایی داشته است و در نتیجه کنترل پارامترهای مراحل پرداخت نمی‌تواند تأثیر خود را به طور کامل نشان دهد. از این رو پیشنهاد می‌گردد برای کاهش حذف اختلاف بار باقیمانده‌ی مسیر مستقیم و قوس مرحله‌ی خشن‌کاری بررسی شود.

۷- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق کاهش اختلاف بین بار باقیمانده روی مسیر مستقیم (Y_2^{sf}) و قوس گوشه (Y_2^{cr}) در برش سه مرحله‌ای وایرکات بود و تأثیر پارامترهای فرکانس تخلیه، ولتاژ گپ و سرعت پیشروی در دو مرحله‌ی پرداخت مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های این دو مرحله بر اساس روش رویه پاسخ طرح (RSM)، انجام، و سطوح بهینه‌ی پارامترهای فوق مشخص شدند. نمودارهای اثرات اصلی پارامترها و نمودارهای رویه پاسخ برای هر دو مرحله بررسی استخراج گردیدند. در مجموع به کمک بهینه‌سازی پارامترها، بار باقیمانده روی قوس محدب حدود ۱۲ درصد افزایش و در نتیجه خطای ماشینکاری کاهش یافت. نتایج حاصل از این تحقیق چنین‌اند:

پس به‌طور کلی با کاهش مقدار فرکانس تخلیه و افزایش سرعت پیشروی سیم می‌توان میزان بار باقیمانده را افزایش داد. دیگر عامل موثر در تعیین میزان بار باقیمانده، پایدار و پیوسته بودن ماشینکاری است. در این تحقیق برای انجام آزمایش‌ها، سطوح پارامترها با توجه به محدودیت‌های ماشین و فرآیند انتخاب شده‌اند. انتخاب سطح نامناسب برای این پارامترها (نظیر کاهش بیش از اندازه‌ی فرکانس) باعث ایجاد برش ناپیوسته و ناپایدار می‌شود. انجام ماشینکاری ناپیوسته و ناپایدار سبب افزایش ارتعاش سیم و در نتیجه افزایش برداشت ماده از سطح جانبی برش می‌گردد. این مطلب را می‌توان به روشنی از نمودارهای حاصل از آزمایش‌ها در شکل‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ مشاهده نمود.

این نمودارها نشان می‌دهند که در مرحله‌ی پرداخت دوم، همانگونه که پیش‌بینی می‌شد سطح پایین فرکانس بار باقیمانده‌ی بیشتری را ایجاد کرده‌است در حالی که در مرحله‌ی پرداخت اول، به دلیل ایجاد برش ناپیوسته و ناپایدار سطح پایین فرکانس بار باقیمانده‌ی کمتری را ایجاد نموده‌است. همچنین این نمودارها این پیش‌بینی را تایید می‌کنند که افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش بار باقیمانده روی سطح جانبی شیار می‌شود. با تغییر فرکانس و سرعت پیشروی، بیشترین بار باقیمانده در سطحی از ولتاژ گپ ایجاد می‌شود که در آن حرکت سیم پیوسته، و در نتیجه انجام ماشینکاری یکنواخت باشد.

مقایسه این نتایج با تحقیقاتی که توسط پوری و بهاتاهاریا بر پایه روش تاگوچی انجام شده نشان می‌دهد که افزایش ولتاژ گپ در ابتدا خطای برش گوشه را کاهش و سپس افزایش داده‌است. بنابراین، یک سطح میانی ولتاژ گپ شرایط ماشینکاری پایداری را ایجاد کرده است [۱۶].

μm	مرحله‌ای عمق باربرداری مرحله پرداخت دوم در برش سه	k_{22}
-	مرحله‌ای مد ماشینکاری	M
μm	افست سیم	of
μm	افست خشن کاری در برش یک مرحله‌ای	of_{00}
μm	افست خشن کاری در برش دو مرحله‌ای	of_{01}
μm	افست پرداخت اول در برش دو مرحله‌ای	of_{11}
μm	افست خشن کاری در برش سه مرحله‌ای	of_{02}
μm	افست پرداخت اول در برش سه مرحله‌ای	of_{12}
μm	افست پرداخت دوم در برش سه مرحله‌ای	of_{22}
-	مقدار احتمال	P
A	قدرت تخلیه الکتریکی	P
-	مجموع مربعات خطای پیش‌بینی	PRESS
μm	شعاع سیم	r_w
-	روش رویه پاسخ	RSM
-	ضریب تعیین	R^2
-	ضریب تعیین تعدیل شده	$R^2(\text{adj})$
mm/m in	سرعت پیشروی	S
-	ریشه میانگین مربعات	S
-	خطای استاندارد	SE Coef.
-	ضرایب	
-	مقدار آماره‌ی T	T
V	ولتاژ مدار باز	V
N	کشش سیم	w_b
m/min	سرعت تغذیه سیم	w_s
μm	بار باقیمانده	y
μm	بار باقیمانده بعد از مرحله خشن کاری در برش یک مرحله‌ای	y_{00}
μm	بار باقیمانده بعد از مرحله خشن کاری در برش دو مرحله‌ای	y_{01}
μm	بار باقیمانده بعد از مرحله پرداخت اول در برش سه	y_{11}

- ۱- برای شناخت تأثیر پارامترهای فرکانس تخلیه، ولتاژ گپ و سرعت پیشروی روی بار باقیمانده مسیر مستقیم و قوس محدب گوشه در هر یک از مراحل پرداخت در یک برش سه مرحله‌ای، یک مدل تجربی ارائه گردید. همچنین سطح بهینه‌ی این پارامترها برای دو مرحله‌ی پرداخت تعیین شدند.
- ۲- در ماشین کاری گوشه‌ی کوچک-شعاع محدب، سیم بار بیشتری نسبت به مسیر مستقیم برمی‌دارد.
- ۳- با کنترل چگالی اصابت جرقه (تعداد جرقه بر واحد سطح) بر سطح جانبی قطعه کار می‌توان بار باقیمانده در روی مسیر مستقیم و قوس را کنترل نمود. به شرط حفظ پایداری فرآیند با کاهش فرکانس و افزایش سرعت پیشروی مقدار بار باقیمانده افزایش می‌یابد. سطح مناسب پارامتر ولتاژ گپ، ماشینکاری پایدار و پیوسته را تضمین می‌کند.
- ۴- تأثیر کنترل پارامترهای مراحل پرداخت روی بار باقیمانده‌ی مسیر مستقیم بیشتر از بار باقیمانده روی قوس است.
- ۵- خشن کاری عامل اصلی خطا در برش قوس‌ها و انحناها می‌باشد.

نمادها

μs	زمان روشنی پالس	A
V	ولتاژ سروو (ولتاژ گپ)	A_j
μF	ظرفیت خازن	C
-	ضریب فاکتورهای رگرسیون	Coef.
-	طراحی آزمایش‌ها	DOE
spark/sec	فرکانس تخلیه	f
μm	اندازه گپ جرقه	g
μm	گپ جرقه در مرحله خشن کاری	g_0
μm	گپ جرقه در مرحله پرداخت اول	g_1
μm	گپ جرقه در مرحله پرداخت دوم	g_2
μm	پهنای ماشینکاری در مرحله خشن کاری	k_0
μm	عمق باربرداری مرحله پرداخت اول در برش دو مرحله‌ای	k_{11}
μm	عمق باربرداری مرحله پرداخت اول در برش سه	k_{12}

[7] Mingqi, L., Minghui, L., Guangyao, X., "Study on the Variations of Form and Position of the Wire Electrode in WEDM-HS", Int J. Adv. Manuf Technol, Vol. 25, pp. 929–934, 2005.

[8] Sanchez, J. A., Rodil, J. L., Herrero, A., DeLacalle, L. N. L., Lamikiz, A., "on the Influence of Cutting Speed Limitation on the Accuracy of Wire-EDM Corner-Cutting", J Mater Process Technol, Vol. 182(1–2): pp. 574–579, 2007.

[9] Han, F., Cheng, G., Feng, Z., Isago, S., "Thermo- Mechanical Analysis and Optimal Tension Control of Micro Wire Electrode", Int. J. Mach Tools Manuf, Vol. 48, pp. 922–931, 2008.

[10] Dodun, O., Gonçalves-Coelho, A. M., Slătineanu, L., Nagîț, G., "Using Wire Electrical Discharge Machining for Improved Corner Cutting Accuracy of Thin Parts", Int J. Adv. Manuf Technol, DOI:10.1007/s00170-008-1531-4.

[11] ASM Handbook Committee. "ASM Handbook", Volume 4, Heat Treating, 1991.

[12] Charmilles Company. "User Manual ROBOFIL 200", Charmilles Technologies, Switzerland, 1989.

[13] Myers, R. H., Montgomery, D. C. "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", Wiley, New York, 1995.

[14] Khuri, A. I., Cornell, J. A., Response surfaces, designs and analyses, Marcel Dekker, New York, 1996.

[15] Montgomery, D. C. "Design and Analysis of Experiments", Wiley, New York, 2001.

[16] Puri, A. B., Bhattaharyya, B., "An Analysis and Optimization of the Geometrical Inaccuracy due to Wire Lag Phenomenon in WEDM", Int J Mach Tools Manuf, Vol. 43, pp. 151–159, 2003

	پرداخت اول در برش دو مرحله‌ای	
μm	بار باقیمانده بعد از مرحله	y_{02}
	خشن کاری در برش سه مرحله‌ای	
μm	بار باقیمانده بعد از مرحله پرداخت اول در برش سه مرحله‌ای	y_{12}
	پرداخت دوم در برش سه مرحله‌ای	
μm	بار باقیمانده بعد از مرحله پرداخت دوم در برش سه مرحله‌ای	y_{22}
	پرداخت دوم در برش سه مرحله‌ای	
μm	بار باقیمانده بعد از مرحله پرداخت دوم در برش سه مرحله‌ای در روی قوس گوشه	y_2^{cr}
	پرداخت دوم در برش سه مرحله‌ای در روی مسیر مستقیم	
μm	بار باقیمانده بعد از مرحله پرداخت دوم در برش سه مرحله‌ای در روی مسیر مستقیم	y_2^{sf}

توجه: اندیس‌های $i = 0, 1, 2$ در پارامترهای of_{ij} ، y_{ij} و k_{ij} به ترتیب اشاره به مراحل خشن کاری، پرداخت اول و پرداخت دوم دارد و اندیس j نشانگر تعداد مرحله پرداخت در برش‌های چند مرحله‌ای است.

مراجع

[1] Han, F., Zhang, J., Soichiro, I., "Corner Error Simulation of Rough Cutting in Wire EDM", Precis Eng, Vol. 31(4), pp. 331–336, 2007, DOI:10.1016/j.precisioneng.2007.01.005

[2] Dekeyser, W. L., Snoeys, R., "Geometrical Accuracy of Wire-EDM", 9th Int. Symp. on ElectroMachining (ISEM-9), pp. 226–232, Japan, 1989.

[3] Hsue, W. J., Liao, Y. S., Lu, S. S., "A study of Corner Control Strategy of Wire-EDM Based on Quantitative MRR Analysis", Int J Elect Machining, No.4, pp. 33-39, 1999

[4] Obara, H., Kawai, T., Ohsumi, T., Hatano, M., "Combined power and path control method to improve corner accuracy of rough cuts by wire EDM (1st report)", Int J Elect Machining, Vol. 8, pp. 27–32, 2003.

[5] Obara, H., Kawai, T., Ohsumi, T., Hatano, M., "Combined power and path control method to improve corner accuracy of rough cuts by wire EDM (2nd report)", Int J Elect Machining, Vol. 8, pp 33–38, 2003.

[6] Sanchez, J. A., De Lacalle, L. N. L., Lamikiz, A., "A computer aided system for the optimization of the accuracy of the wire electro-discharge machining process", Int J of Comp Integrated Manufact, Vol. 17(5), pp 413–420, 2004.