



WEDM Errors in Straight and Arced Paths: Analysis of Spark Angles on the Roughing and Finishing Stages

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Abyar Firouzabadi H.¹ MSc,
Abdullah A.*¹ PhD

How to cite this article

Abyar Firouzabadi H, Abdullah A. WEDM Errors in Straight and Arced Paths: Analysis of Spark Angles on the Roughing and Finishing Stages. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(6):1519-1528.

ABSTRACT

Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) is known as an advanced manufacturing process, especially for producing delicate and intricate shapes and cutting difficult-to-cut materials. Machining error on small arced path is an important problem associated with this process. The current paper investigates experimentally the machining errors of three-stage WEDM on the small straight and arced paths. To reveal the reason behind these errors and to compensate them, residual materials of each cutting stage on the straight and arced corner paths were separately measured and analyzed. Machining errors of each WEDM stage in both paths were accurately considered and the causes of these errors in the straight and small arced paths were experimentally and theoretically determined and discussed. Experiments showed that the roughing stage has such a serious deteriorating influence on the machining errors on the arced paths that it cannot be compensated in the following finishing stages. The spark angle domains of the roughing stage on the arced paths were calculated and the effects of these domains on the machining errors due to wire diversion from the programmed path were analyzed. In addition, this research proposes a novel guide in multi-stage WEDM by defining some machining concepts and developing equations for error calculation of WEDM finishing stages on these paths. The machining errors estimated by equations have consistency with the related experimental ones. Results of this study can be employed in the accurate WEDM cuttings.

Keywords WEDM; Error; Spark; Path; Angle

¹Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Phone: -

Fax: -

amirah@aut.ac.ir

Article History

Received: June 19, 2018

Accepted: December 29, 2018

ePublished: June 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Statistical analysis and optimization of process parameters for cutting rate ... [2] Accuracy of small radius corners in multi stage WEDM ... [3] Experimental investigation on die corner accuracy for ... [4] Geometrical accuracy of Wire ... [5] Study on machining accuracy in Wire-EDM ... [6] Study on machining accuracy in Wire-EDM ... [7] High-precision Wire-EDM by online wire positioning ... [8] A study of corner control strategy of Wire-EDM based ... [9] Combined power and path control method to ... [10] Combined power and path control method to improve ... [11] An analysis and optimisation of the geometrical inaccuracy ... [12] A computer-aided system for the optimization ... [13] On the influence of cutting speed limitation ... [14] Corner error simulation of rough cutting ... [15] Thermo-mechanical analysis and optimal tension ... [16] Using wire electrical discharge machining for ... [17] Analysis of kerf width in micro ... [18] A novel method of determination of wire ... [19] An analysis and optimization of the geometrical ... [20] Unknown Publisher City: Charmilles ... [21] Accurate machining of small-radius ... [22] ASM handbook: Heat ...

خطاهای ماشینکاری مسیرهای مستقیم و قوسی در برش وایرکات: تحلیل زاویای جرقه مراحل خشنکاری و پرداختکاری

حمید آبیاری فیروزآبادی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

امیر عبدالله* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی یا وایرکات یکی از فرآیندهای پیشرفته تولید به‌ویژه برای ساخت قطعات ظریف با شکل‌های پیچیده و مواد سخت است. خطاهای ماشینکاری روی مسیرهای قوسی کوچک شعاع یکی از مهم‌ترین مشکلات این فرآیند است. در این تحقیق، خطاهای ماشینکاری برش سه‌مرحله‌ای وایرکات روی مسیرهای مستقیم و قوسی با استفاده از آزمون‌های تجربی بررسی شده است. برای شناسایی دلایل ایجاد این خطاها و جبران آنها، بار باقیمانده روی این مسیرها بعد از هر مرحله ماشینکاری به‌طور جداگانه اندازه‌گیری و تحلیل شد. سپس خطاهای ماشینکاری روی مسیرهای مذکور و عوامل ایجاد آنها به‌صورت تئوری و تجربی ریشه‌یابی و بحث شد. آزمون‌های تجربی نشان دادند که مرحله خشنکاری، اثر مخرب قابل ملاحظه‌ای روی خطاهای ماشینکاری مسیرهای قوسی دارد و مراحل پرداختکاری که بعد از مرحله خشنکاری انجام می‌شوند قادر نیستند این اثر مخرب را جبران کنند. گستره‌های زاویه‌ای جرقه‌زنی در مرحله خشنکاری مسیرهای قوسی محاسبه و اثر این گستره‌ها روی انحراف سیم از مسیر برنامه‌نویسی‌شده و خطاهای ناشی از آن تجزیه و تحلیل شد. همچنین، این تحقیق با تعریف مفاهیم و توسعه معادلات مربوط به محاسبه خطاهای مراحل پرداختکاری، دستورالعمل نوینی برای ماشینکاری چندمرحله‌ای وایرکات این مسیرها پیشنهاد نموده است. خطاهای تخمین‌زده‌شده (به‌وسیله معادلات مذکور) با خطاهای حاصل از آزمون‌های تجربی همخوانی دارند. نتایج این تحقیق می‌تواند در کاربردهای دقیق وایرکات استفاده شوند.

کلیدواژه‌ها: وایرکات، خطا، جرقه، مسیر، زاویه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۸

*نویسنده مسئول: amirah@aut.ac.ir

۱- مقدمه

ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی یا وایرکات، یک فرآیند ماشینکاری پیشرفته است که در روند روبه‌رشد صنعت، جایگاه ویژه‌ای در تولید قطعات نازک و پیچیده و ماشینکاری مواد سخت دارد^[1]. در این فرآیند، شکل هندسی مورد نظر از طریق حرکت یک سیم نازک و انعطاف‌پذیر روی مسیرهای پیش‌بینی‌شده ایجاد می‌شود. یکی از مهم‌ترین ضعف‌های فرآیند وایرکات، وجود خطاهای ماشینکاری قابل توجه روی گوشه‌ها و مسیرهای قوسی کوچک شعاع است^[2, 3]. تاکنون چندین تحقیق توسط محققان مختلف در زمینه بررسی خطای ماشینکاری گوشه‌ها و قوس‌ها انجام شده است.

دکسر و همکاران، سه عامل اصلی ایجاد خطای برش در گوشه‌های تیز را واماندگی سیم، افزایش ارتعاشات سیم و افزایش احتمال تخلیه الکتریکی معرفی نمودند. همچنین خطای برش روی یال دوم این گوشه‌ها را به‌کمک آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری کردند^[4]. ماگارا و همکاران نشان دادند که با تغییر شرایط ماشینکاری نظیر زمان خاموشی پالس، خیز سیم می‌تواند به‌طور موثری کاهش و دقت هندسی و مستقیم‌بودن در طول ارتفاع قطعه کار بهبود یابد^[5].^[6] دلو و بلترامی با اندازه‌گیری خیز سیم به‌کمک تجهیزات خاص در حین فرآیند، سیستمی برای اصلاح موقعیت‌های راهنمای سیم

براساس خیز سیم اندازه‌گیری‌شده ارائه نمودند^[7]. برای تغییر پارامترهای فرآیند به‌منظور کاهش خیز سیم، هسو و همکاران، الگویی پیشنهاد کردند که به موجب آن، با کاهش توان در گوشه، خیز سیم کاهش می‌یابد. براساس این الگو، هنگامی که دقت بالا در گوشه مورد نیاز باشد، زمان ماشینکاری طولانی می‌شود^[8]. /ویار/ و همکاران، روش کنترل توان منبع تغذیه برای کاهش خیز سیم و به‌طور همزمان ویرایش مسیر برنامه براساس میزان انحراف سیم را مطالعه نمودند تا خطاهای ماشینکاری گوشه‌ها را کاهش دهند^[9]. /ویار/ و همکاران در مقاله دیگری نتیجه‌گیری نمودند که امکان حذف کامل خطاهای ناشی از خیز سیم روی گوشه‌ها به‌وسیله افزایش زمان خاموشی پالس (کاهش سرعت ماشینکاری به نزدیک صفر) وجود ندارد. بنابراین کنترل پارامترهای فرآیند به‌تنهایی نمی‌تواند خطاهای مربوطه را حذف نماید و باید حتماً از روش ترکیبی کنترل پارامترها و اصلاح مسیر استفاده شود^[10].

پوری و بهاتچاریا ضمن بررسی اثر واماندگی سیم روی دقت هندسی ماشینکاری، پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و جریان پالس برای خشنکاری و ولتاژ پالس، کشش سیم و ولتاژ گپ، افسست سیم و سرعت برش ثابت برای پرداختکاری را به‌عنوان پارامترهای تاثیرگذار در ایجاد خطاهای ماشینکاری معرفی نمودند^[11]. امکان استفاده از کامپیوتر برای بهینه‌سازی دقت گوشه‌ها توسط سانچز و همکاران مطرح شد. آنها سیستم جامع کامپیوتری برای پیش‌بینی خطا و اصلاح مسیر سیم را ارائه کردند که تلفیقی از یافته‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی بود^[12]. همچنین سانچز و همکاران، خطاها در نواحی مختلف گوشه در برش‌های متوالی (خشن و پرداخت) و اثر محدودیت سرعت برشی روی این خطاها در حالت‌های متفاوت ضخامت قطعه، شعاع گوشه و تعداد مراحل برش را مطالعه نمودند^[13]. روش شبیه‌سازی و پیش‌بینی مسیر واقعی خشنکاری گوشه‌های تیز ارائه‌شده توسط هان و همکاران، تنها روی گوشه‌ها با زوایای قائم و باز، انطباق نسبتاً خوبی با نتایج تجربی مربوطه داشت^[14]. هان و همکاران در تحقیق دیگری، رابطه بین انرژی تخلیه وارد بر سیم و کشش بهینه سیم را بررسی کردند^[15]. دودان و همکاران، دقت ماشینکاری گوشه‌ها در ورق‌های نازک و تاثیر نیروی الکترومغناطیس روی آنها را تحلیل نمودند^[16]. اثرات ارتعاش سیم بر پهنای شیار ایجادشده در وایرکات توسط دی و همکاران تحلیل شد^[17]. سرکار و همکاران، مدلی را برای اندازه‌گیری شدت نیروی گپ و واماندگی سیم ارائه نمودند و همچنین روشی برای حذف بی‌دقتی برش با استفاده از روش جبران واماندگی سیم پیشنهاد کردند^[18]. چن و همکاران، روش برازش بیضوی را برای پیش‌بینی مسیر حرکت سیم برای گوشه‌های قائمه و باز، تدوین و با آزمون‌های تجربی صحت‌سنجی نمودند^[19].

در تحقیق حاضر، خطاها روی این مسیرها در برش چندمرحله‌ای (شامل مرحله خشنکاری و مراحل پرداختکاری) به‌صورت تجربی و تئوری مطالعه و تحلیل شده و با تعریف مفاهیم و بسط معادلات مربوطه، راهکارهایی برای کاهش و جبران خطاهای این مسیرها ارائه شده است.

۲- تحلیل دقت ماشینکاری چندمرحله‌ای وایرکات

۲-۱- اصول فرآیند وایرکات

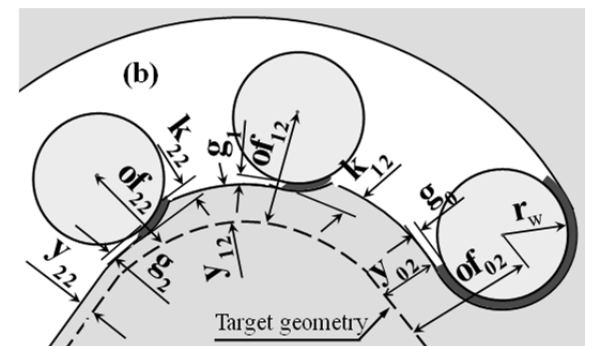
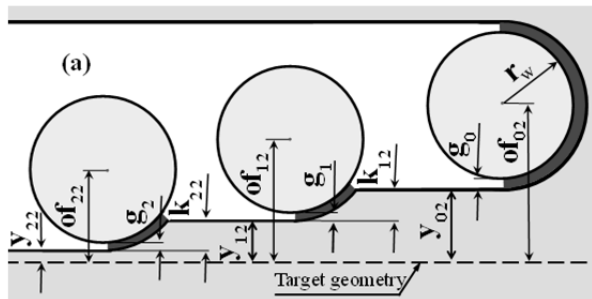
برای ساخت قطعات دقیق به‌وسیله وایرکات ابتدا لازم است پرداخت سطح بالایی حاصل شود که این امر با انجام چند مرحله ماشینکاری و کاهش انرژی جرقه‌ها در هر مرحله نسبت به مرحله

ماشین‌کاری ایجاد می‌شود. در این تحقیق، بالانویس St و Cr به ترتیب به پارامترهای مرتبط با مسیر مستقیم و قوسی شکل اختصاص یافته است. در یک برش سه مرحله‌ای دقیق، روابط ۱ تا ۳ با توجه به شکل ۱ باید برقرار باشد:

$$y_{02}^{st} = y_{02}^{cr} \quad (۱)$$

$$y_{12}^{st} = y_{12}^{cr} \quad (۲)$$

$$y_{22}^{st} = y_{22}^{cr} = 0 \quad (۳)$$



شکل ۱ (الف) ماشین‌کاری سه مرحله‌ای وایرکات؛ (ب) روی مسیر قوسی شکل

۲-۳- معرفی نمونه و شرایط آزمون‌های تجربی

در این تحقیق با انجام آزمایش‌ها، خطای ماشین‌کاری سه مرحله‌ای وایرکات روی مسیرهای مستقیم و قوسی شکل مطالعه و تحلیل شده است. آزمایش‌ها روی نمونه‌های فولاد ابزار ۱/۲۵۱۰ به ابعاد ۵۴×۴۹×۹ میلی‌متر انجام شدند. نمونه‌ها از طریق فرزکاری، انجام عملیات حرارتی تنش‌گیری (مطابق استاندارد ASM) و عملیات سنگ‌زنی سطوح آنها به دقت توازی ۰.۰۲± دقیقه (با بار کم و مایع خنک‌کاری زیاد) آماده‌سازی شدند [22]. از ماشین وایرکات شارمیلز روبوفیل ۲۰۰ و سیم پیشنهادی سازنده SW25X برای انجام ماشین‌کاری شکل هندسی مطابق شکل ۲ استفاده شد. حین انجام آزمایش‌ها سعی شد که شرایط محیطی، پایدار و ثابت بماند. تکنولوژی ماشین‌کاری و مقادیر پارامترهای تنظیمی و افسست‌ها مطابق مقادیر پیشنهادی سازنده ماشین (جدول ۱) انتخاب شد. همچنین برای اندازه‌گیری بار باقیمانده از کمپراتور مکانیکی شرایط اتاق تمیز استفاده شد [20].

۲-۴- مراحل و نتایج آزمون‌های تجربی

در اولین گروه از آزمایش‌ها، مرحله خشن‌کاری از برش سه مرحله‌ای به‌تنهایی انجام شد و مقادیر بار باقیمانده بعد از این مرحله روی مسیرهای مستقیم و قوسی شکل (با شعاع‌های هدف ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میکرون) و خطای ماشین‌کاری مسیرهای قوسی شکل نسبت به مسیر مستقیم مطابق جدول ۲ اندازه‌گیری شد.

از نتایج جدول ۲ مشخص است که بار باقیمانده روی مسیر مستقیم و قوسی شکل بعد از مرحله خشن‌کاری با هم اختلاف

قابل امکان‌پذیر می‌شود [20]. ماشین‌کاری در سه مرحله یا بیشتر (که معمولاً پرداخت سطح کمتر از یک میکرون را ممکن می‌سازد [20]) برای دستیابی به دقت‌های ابعادی و هندسی بالا مناسب است.

فرآیند وایرکات به‌طور کلی شامل دو نوع برش است. نخست، برشی که علاوه بر پیشانی سیم در راستای پیشروی، هر دو طرف جانبی سیم به‌وسیله ماده قطعه کار احاطه شده است و عملیات باربرداری روی آنها انجام می‌شود که اصطلاحاً مرحله خشن‌کاری گفته می‌شود و دیگری برشی است که باربرداری روی سطوح آزاد داخلی یا خارجی انجام می‌شود و اصطلاحاً مرحله پرداخت‌کاری نامیده می‌شود. هر یک از این دو مرحله، ویژگی‌های خاص خود را دارند و عوامل ایجادکننده خطای ماشین‌کاری در آنها متفاوت است. تحلیل دقت ماشین‌کاری و شناسایی عوامل ایجاد خطاها در ماشین‌کاری چندمرحله‌ای وایرکات، کاری سخت و دشوار است. زیرا هر یک از مراحل ماشین‌کاری، خطاهای مرتبط به خود را ایجاد می‌کنند که به‌سادگی نمی‌توان متوجه شد سهم هر مرحله در خطای نهایی قطعه چقدر است و چگونه و با چه روش‌هایی می‌توان خطاهای هر مرحله را حذف یا جبران نمود.

همان گونه که اشاره شد، تاکنون تحقیقات بسیار محدودی در زمینه برش مسیرهای قوسی کوچک‌شعاع در وایرکات انجام گرفته که اکثر آنها جنبه آماری و تجربی داشته است. تاثیر تحلیلی عوامل موثر در خطای برش این نواحی هنوز مجهول است و نیاز به تحقیقات بیشتری در این زمینه وجود دارد. در این مقاله، ماشین‌کاری سه مرحله‌ای وایرکات که در صنعت برای ساخت قطعات دقیق، بسیار کاربردی و متداول بوده، مطالعه شده است. با ریشه‌یابی و تحلیل تجربی و تئوری خطاهای مراحل مختلف (شامل خشن‌کاری، پرداخت اول و پرداخت دوم)، میزان تاثیر متفاوت بودن زاویه جرقه هر مرحله بر خطای ماشین‌کاری آن مرحله (در ماشین‌کاری مسیرهای قوسی شکل نسبت به مسیر مستقیم) محاسبه و بحث شده است. با اندازه‌گیری بار باقیمانده و محاسبه خطای ماشین‌کاری هر مرحله، دلایل این بار باقیمانده متفاوت و در نتیجه خطای ماشین‌کاری مربوط به مراحل خشن‌کاری و پرداخت‌کاری بررسی و تحلیل خواهد شد. اثر زاویه جرقه روی این خطاها، محاسبه و با نتایج آزمون‌های تجربی، مقایسه و صحت‌گذاری می‌شود.

۲-۲- تعریف مساله

با توجه به شکل ۱، برای داشتن یک برش دقیق، سه پارامتر عمق باربرداری (k)، گپ کناری جرقه (فاصله کناری بین سیم و قطعه کار؛ g) و بار باقیمانده (اختلاف ضخامت ماده بین شکل هندسی واقعی بعد از ماشین‌کاری و شکل هندسی هدف، y) باید در مراحل مختلف ماشین‌کاری کنترل شود. میزان عمق باربرداری و گپ کناری جرقه وابسته به انرژی و خصوصیات جرقه‌ها و مقدار بار باقیمانده وابسته به افسست ماشین‌کاری (فاصله بین مرکز سیم و شکل هندسی هدف؛ of) است. با داشتن شعاع سیم (r_w) و افسست ماشین‌کاری می‌توان برای هر مرحله ماشین‌کاری، گپ کناری جرقه، عمق برش و بار باقیمانده محاسبه نمود [21].

با توجه به شکل ۱، برای دستیابی به دقت ابعادی و هندسی بالا در یک برش سه مرحله‌ای وایرکات، y_22 باید برابر صفر باشد، ولی در واقعیت معمولاً این پارامتر برابر صفر نمی‌شود. روی مسیرهای مستقیم با تمهیدات مشخصی مانند تغییر مقادیر افسست می‌توان به دقت ابعادی و هندسی بالا دست یافت، ولی این کار روی قوس‌ها و گوشه‌های کوچک‌شعاع کار بسیار سخت و پیچیده‌ای است و در این محل‌ها همواره یک اضافه ماده باقیمانده یا اضافه

تمهیدات لازم به منظور داشتن بار باقیمانده مطلوب مرحله خشن‌کاری باید لحاظ شود. نخست اینکه افست مرحله خشن‌کاری باید به اندازه اختلاف میانگین بار باقیمانده روی مسیر مستقیم در آزمون‌های تجربی و بار باقیمانده مطلوب (۲۵=۳۳-۵۸ میکرون) تغییر داده شود، یعنی افست مرحله خشن‌کاری باید از ۱۹۸ به ۱۷۳ میکرون کاهش یابد. در این صورت، میانگین بار باقیمانده روی مسیر مستقیم با بار باقیمانده مطلوب برابر خواهد شد. دوم اینکه شعاع هر یک از گوشه‌های قوس‌دار باید به اندازه اختلاف میانگین بار باقیمانده روی آن گوشه قوس‌دار و میانگین بار باقیمانده روی مسیر مستقیم در آزمون‌های تجربی افزایش داده شود. با انتخاب افست ۱۷۳ میکرون و اصلاح شعاع گوشه‌های قوس‌دار براساس نتایج جدول ۲، آزمون‌های مرحله خشن‌کاری تکرار شد. نتایج این آزمون‌ها نشان می‌دهد که با اصلاحات صورت‌گرفته، میانگین بار باقیمانده در روی مسیر مستقیم و گوشه‌های قوس‌دار به مقدار مطلوب نزدیک شده و بین ۳۳ تا ۳۴ میکرون است.

برای تعیین خطای مرحله پرداخت اول ماشین‌کاری سه‌مرحله‌ای، در دومین گروه از آزمایش‌ها، ابتدا مرحله خشن‌کاری و جبران خطای این مرحله براساس یافته‌های گروه اول آزمایش‌ها انجام شد. سپس مرحله پرداخت اول با پارامترها و افست (۱۴۳ میکرون) پیشنهادی سازنده انجام شد و مقادیر بار باقیمانده بعد از این مرحله، روی مسیرهای مستقیم و قوسی‌شکل با شعاع‌های مذکور و خطای ماشین‌کاری مسیرهای قوسی‌شکل مطابق جدول ۳ اندازه‌گیری شد. با افست ۱۴۳ میکرون، بار باقیمانده مطلوب در همه جای مسیر باید برابر با ۹ میکرون باشد.

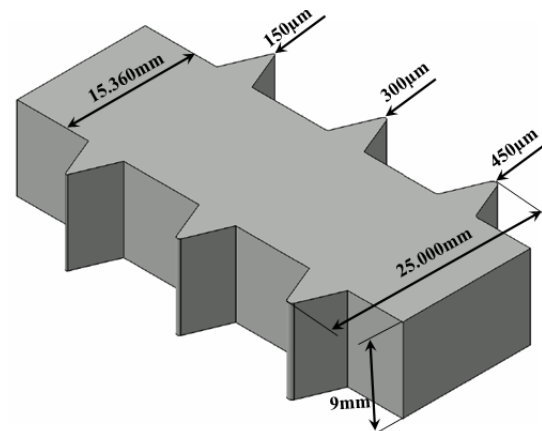
نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که هم در روی مسیر مستقیم و هم روی گوشه‌های قوس‌دار خطاهای ماشین‌کاری وجود دارد. برای جبران این خطاها و عدم انتقال آنها به مرحله بعدی ماشین‌کاری، همانند روش جبران خطاهای مرحله خشن‌کاری عمل شد؛ یعنی نخست، افست مرحله پرداخت اول به اندازه اختلاف میانگین بار باقیمانده روی مسیر مستقیم در آزمون‌های تجربی و بار باقیمانده مطلوب (۴-۹=۵ میکرون) تغییر داده شد (افست مرحله پرداخت اول از ۱۴۳ به ۱۴۷ افزایش یافت). دوم، شعاع هر یک از گوشه‌های قوس‌دار به اندازه اختلاف میانگین بار باقیمانده روی آن گوشه قوس‌دار و میانگین بار باقیمانده روی مسیر مستقیم در آزمون‌های تجربی افزایش داده شد.

جدول ۳ نتایج آزمون‌های تجربی برای بار باقیمانده و خطاهای ماشین‌کاری مربوط به مرحله پرداخت اول روی مسیر مستقیم و قوس‌ها

پ پرداخت اول	R_a (میکرون)	میانگین بار باقیمانده (میکرون)	میانگین خطا (میکرون)
	۱۵۰	-۱	-۶
مسیر قوسی	۳۰۰	-۰/۳	-۵/۳
	۴۵۰	۰	-۵
مسیر مستقیم	-	۵	-

آزمون‌های تجربی، دوباره با انجام مرحله خشن‌کاری (براساس یافته‌ها و اصلاحات بخش قبل) و پیروی آن مرحله پرداخت اول (با انتخاب افست ۱۴۷ میکرون و اصلاح شعاع گوشه‌های قوس‌دار براساس نتایج جدول ۳) تکرار شد. نتایج این آزمون‌ها نشان می‌دهد که با اصلاحات صورت‌گرفته، میانگین بار باقیمانده در روی مسیر مستقیم و روی گوشه‌های قوس‌دار به مقدار مطلوب نزدیک و بین ۸/۵ تا ۹/۵ میکرون است. با کمک رابطه ۴ می‌توان اندازه گپ تجربی (واقعی) کناری جرقه را برای مرحله پرداخت اول

دارند. برای اینکه ابعاد قطعه ماشین‌کاری‌شده بعد از مراحل پرداخت‌کاری دقیق باشد، لازم است نخست خطاهای مرحله خشن‌کاری جبران شوند. اگر خطاهای مرحله خشن‌کاری جبران نشوند و هنگام انجام مراحل پرداخت باقی مانده باشند، نمی‌توان انتظار داشت که قطعه کار بعد از انجام مراحل پرداخت‌کاری، ابعاد دقیق و مطلوب داشته و فاقد خطای ماشین‌کاری باشد. بنابراین به‌عنوان اولین قدم، خطاهای مرحله خشن‌کاری باید محاسبه و جبران شوند. با توجه به شکل ۱ و مقادیر افست جدول ۱، بار باقیمانده مطلوب (مورد نظر سازنده ماشین) بعد از انجام مرحله خشن‌کاری برش سه‌مرحله‌ای در همه جای مسیر برش باید کاملاً یکسان و برابر ۳۳ میکرون باشد. به بیان بهتر، بار باقیمانده بعد از مرحله خشن‌کاری باید اندازه‌ای باشد که دقیقاً به همان اندازه (نه کمتر، نه بیشتر) توسط دو مرحله پرداخت‌کاری باربرداری شود تا بعد از انجام دو مرحله پرداخت‌کاری، ابعاد دقیق و مطلوب حاصل شود.



شکل ۲) شکل و اندازه نمونه‌های آزمون‌های تجربی

جدول ۱) مقادیر پارامترها و افست‌های مورد استفاده در آزمون‌های تجربی

پارامترها	خشن‌کاری	پرداخت اول	پرداخت دوم
خازن (میکروفاراد)	۳/۳	۰	۰
ولتاژ مدار باز (ولت)	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
توان تخلیه (A)	۳۲	۱۶	۸
زمان روشنی پالس (میکروثانیه)	۶/۴	۱/۶	۰/۸
کشش سیم (N)	۱۰	۱۲	۱۲
سرعت سیم (متر بر دقیقه)	۶	۶	۶
متوسط ولتاژ گپ (ولت)	۵۰٪	۳۵٪	۳۳٪
سرعت تغذیه پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	۶/۱۴	۲۹/۲۸	۲۱/۹۶
فرکانس تخلیه (کیلوهرتز)	۱۸	۱۲۵	۲۰۰
افست یک‌مرحله‌ای (میکرون)	۱۶۵	-	-
افست‌های دومرحله‌ای (میکرون)	۱۸۹	۱۳۴	-
افست‌های سه‌مرحله‌ای (میکرون)	۱۹۸	۱۴۳	۱۳۴

جدول ۲ نتایج آزمون‌های تجربی برای بار باقیمانده و خطاهای ماشین‌کاری مربوط به مرحله خشن‌کاری روی مسیر مستقیم و قوس‌ها

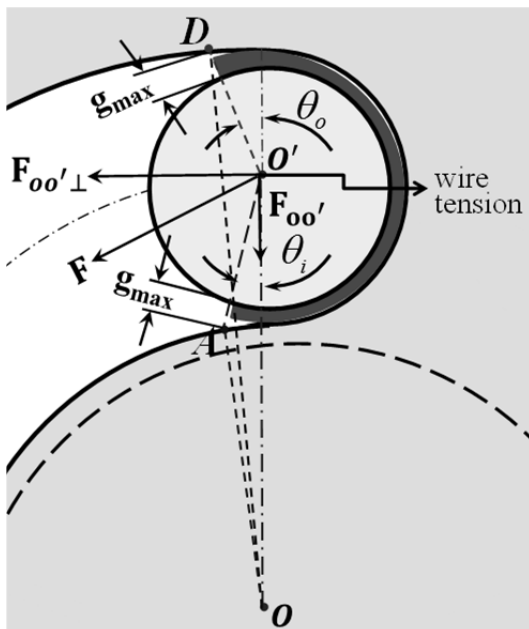
خشن‌کاری	R_a (میکرون)	میانگین بار باقیمانده (میکرون)	میانگین خطا (میکرون)
	۱۵۰	۳۲	-۲۶
مسیر قوسی	۳۰۰	۳۳/۷	-۲۴/۳
	۴۵۰	۳۴/۳	-۲۳/۷
مسیر مستقیم	-	۵۸	-

به هم می‌خورد. این عدم تعادل و ناپایداری نیروها، سیم را به سمت مرکز قوس مسیر هل می‌دهد. بنابراین در نهایت، سیم به سمت داخل قوس مسیر، کشیده و مسیر حرکت سیم از مسیر برنامه‌ریزی شده منحرف می‌شود و خطای ماشین‌کاری ایجاد می‌کند. وجود این خطا با انجام آزمایش‌های مختلف اثبات شده است [2, 14, 21].

۳-۱- تحلیل خطای مرحله خشن‌کاری قوس‌ها به وسیله وایرکات و تاثیر زاویه جرقه

همان گونه که اشاره شد در مرحله خشن‌کاری، سیم از سه جهت (پیشانی و دو سطح جانبی) از قطعه، باربرداری می‌نماید. با توجه به اینکه حجم باربرداری هم قابل توجه است، نیروهای فرآیندی بزرگی در اثر این باربرداری به کمر سیم (در کل ارتفاع درگیر قطعه) وارد می‌شود. انعطاف‌پذیری سیم و همچنین بزرگی این نیروهای اعمالی سبب می‌شود سیم دچار خیز و انحراف از مسیر برنامه‌ریزی شده شود [9, 15, 18]. این اتفاق عامل اصلی ایجاد خطا در مرحله خشن‌کاری وایرکات است. نیروهای مذکور در اثر جرقه‌ها به وجود می‌آیند که ممکن است در هر نقطه از سطح پیرامون سیم ایجاد شوند. در مرحله خشن‌کاری، جرقه‌ها عمدتاً در امتداد یک کمان دایره‌ای در مقابل سیم در راستای پیشروی توزیع می‌شوند، چرا که میدان الکتریکی ایجاد شده میان سیم و قطعه کار همواره در نزدیک‌ترین فاصله می‌شکند. شکل ۳ مرحله خشن‌کاری مسیر قوسی به وسیله وایرکات را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، اگر ولتاژ مدار باز (V) و شدت میدان الکتریکی شکست دی‌الکتریک (E_b) باشد، مقدار حداکثر فاصله بین سیم و قطعه کار (گپ) که می‌تواند جرقه در آن زده شود، برابر g_{max} است.

$$g_{max} = \frac{V}{E_b} \quad (6)$$



شکل ۳ گستره زاویه جرقه‌زنی در اطراف سیم روی مسیر قوسی شکل در مرحله خشن‌کاری وایرکات

مطابق شکل ۳، محوطه اطراف سیم که جرقه‌ها می‌توانند در آن ایجاد شوند، دارای زاویه مرکزی ($\theta_o + \pi + \theta_i$) است. این زاویه به عنوان گستره زاویه‌ای جرقه‌زنی در اطراف سیم تعریف می‌شود.

$$g_1 = 147 - 25 - 9 = 13 \mu m \quad (4)$$

در گروه سوم آزمایش‌ها برای تعیین خطای مرحله پرداخت دوم، نخست مراحل خشن‌کاری و پرداخت اول و جبران خطای آنها براساس یافته‌های دو گروه قبلی آزمایش‌ها انجام شد. سپس مرحله پرداخت دوم انجام و مقادیر بار باقیمانده بعد از این مرحله روی مسیرهای مستقیم و قوسی شکل با شعاع‌های مختلف و خطای ماشین‌کاری مسیرهای قوسی شکل مطابق جدول ۴ اندازه‌گیری شد. بعد از انجام مرحله پرداخت دوم، باید شکل هندسی و ابعاد دقیق قطعه کار حاصل شود. بنابراین بار باقیمانده در همه جای مسیر باید برابر با صفر باشد.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که در روی مسیر مستقیم و گوشه‌های قوس‌دار، بار باقیمانده صفر نیست و در نتیجه، خطاهای ماشین‌کاری وجود دارد. برای جبران این خطاها، نخست افست مرحله پرداخت دوم به اندازه اختلاف میانگین بار باقیمانده روی مسیر مستقیم در آزمون‌های تجربی و بار باقیمانده مطلوب ($1/5 = 0.2$ میکرون) تغییر داده شد، یعنی افست مرحله پرداخت دوم از 134 به 132.5 میکرون کاهش یافت. همچنین شعاع هر یک از گوشه‌های قوس‌دار به اندازه اختلاف میانگین بار باقیمانده روی آن گوشه قوس‌دار و میانگین بار باقیمانده روی مسیر مستقیم در آزمون‌های تجربی افزایش داده شد.

جدول ۴ نتایج آزمون‌های تجربی برای بار باقیمانده و خطاهای ماشین‌کاری مربوط به مرحله پرداخت دوم روی مسیر مستقیم و قوس‌ها

پرداخت اول	R_t (میکرون)	میانگین بار باقیمانده (میکرون)	میانگین خطا (میکرون)
مسیر قوسی	۱۵۰	-۰/۸	-۲/۳
	۳۰۰	-۰/۳	-۱/۸
	۴۵۰	۰	-۱/۵
مسیر مستقیم	-	۱/۵	-

آزمون‌ها دوباره با انجام مرحله خشن‌کاری و مرحله پرداخت اول (براساس یافته‌ها و اصلاحات دو بخش قبل) و پیروی آن مرحله پرداخت دوم با انتخاب افست 132.5 میکرون و همچنین اصلاح شعاع گوشه‌های قوس‌دار براساس نتایج جدول ۴ تکرار شد. نتایج این آزمون‌ها نشان می‌دهد که با اصلاحات صورت گرفته، میانگین بار باقیمانده در روی مسیر مستقیم و روی گوشه‌های قوس‌دار به مقدار صفر، نزدیک و خطای ماشین‌کاری کمتر از یک میکرون است. با کمک رابطه ۵ می‌توان اندازه گپ تجربی (واقعی) کناری جرقه را برای مرحله پرداخت دوم محاسبه نمود.

$$g_2 = 132.5 - 125 = 7.5 \mu m \quad (5)$$

۳- تحلیل تئوری خطای ماشین‌کاری چند مرحله‌ای وایرکات

در ماشین‌کاری وایرکات، سیم تحت تاثیر نیروی کشش و برآیند نیروهای حاصل از فرآیند (مانند نیروی الکترواستاتیک، نیروی الکترومغناطیس، فشار دی‌الکتریک و نیروی انفجار حباب‌های بخار و پلاسما) قرار دارد. با وجود اینکه سیم تحت کشش است، نازکی و انعطاف‌پذیری آن باعث می‌شود تا در اثر مجموعه نیروهای فرآیندی تغییر شکل دهد و از مسیر برنامه‌ریزی شده منحرف شود [4, 11]. در مرحله خشن‌کاری، مسیرهای مستقیم نیروها در جلو، عقب و کناره‌های سیم متعادل‌اند. ولی زمانی که سیم در روی مسیر قوسی حرکت می‌کند، تعادل نیروها در جلو، عقب و کناره‌های سیم

در این مقاله، زاویه مذکور به صورت ریاضی محاسبه و اثر آن بر خطای مرحله خشن‌کاری ارزیابی شده است.

در فرآیند تخلیه الکتریکی قبل از تشکیل هر جرقه، یک کانال پلاسما میان سیم و قطعه کار ایجاد می‌شود. این کانال پلاسما، نیرویی به صورت موضعی به محل اصابت جرقه روی سیم وارد می‌کند. این نیروهای موضعی، مولفه‌هایی در راستای موازی با پاره خط OO' (خط واصل بین مرکز سیم و مرکز قوس مسیر) و عمود بر پاره خط OO' (در راستای مماس بر قوس مسیر) دارند. همان گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، مساحت پیرامونی سیم که تحت تاثیر جرقه هستند شامل زاویه π یعنی کل نیمه جلویی سیم و دو زاویه θ_o و θ_i در نیمه عقبی سیم است. مولفه‌های موازی با پاره خط OO' در نیمه جلویی سیم در تقابل با یکدیگر هستند (از نظر جهت مخالف و از نظر مقدار، یکدیگر را خنثی می‌کنند) و مولفه‌های عمود بر پاره خط OO' در این نیمه با یکدیگر همسو بوده‌اند و با هم جمع می‌شوند.

۳-۱-۱- محاسبه زاویه جرقه در خشن‌کاری وایرکات

در نیمه عقبی سیم، قسمت‌های سیم متاثر از جرقه‌ها شامل بخش‌هایی است که تحت پوشش زوایای θ_o و θ_i قرار دارند. اگر گپ میان سیم و قطعه کار در اطراف سیم برابر g باشد، با توجه به شکل ۳ می‌توان روابط ۷ و ۸ را به ترتیب برای مثلث‌های $OO'A$ و $OO'B$ نوشت:

$$\cos\theta_i = \frac{O'A^2 + OO'^2 - OA^2}{2(O'A)(OO')} \quad (7)$$

$$\cos\theta_o = \frac{OD^2 - O'D^2 - OO'^2}{2(O'D)(OO')} \quad (8)$$

در این دو مثلث، روابط ذیل برقرار است:

$$OA = R_c - (r_w + g) \quad (9)$$

$$OD = R_c + r_w + g \quad (10)$$

$$O'A = O'D = r_w + g_{max} \quad (11)$$

$$OO' = R_c \quad (12)$$

با جای‌گذاری روابط ۹ تا ۱۲ در روابط ۷ و ۸، روابط ۱۳ و ۱۴ حاصل می‌شوند. به کمک این روابط می‌توان زوایای θ_o و θ_i را محاسبه نمود. به کمک تفاضل این دو رابطه اثبات می‌شود که زاویه $\theta_o > \theta_i$ بوده، چرا که گپ $g_{max} > g$ است.

$$\cos\theta_i = \frac{(r_w + g_{max})^2 + R_c^2 - (R_c - r_w - g)^2}{2R_c(r_w + g_{max})} \quad (13)$$

$$\cos\theta_o = \frac{(R_c + r_w + g)^2 - (r_w + g_{max})^2 - R_c^2}{2R_c(r_w + g_{max})} \quad (14)$$

در فرآیند وایرکات در هر لحظه فقط یک جرقه اتفاق می‌افتد و نیروی ایجادشده توسط آن جرقه در نزدیکی نقطه اصابتش روی سیم متمرکز می‌شود. به دلیل زیادبودن تعداد جرقه‌های اصابت‌کننده در ثانیه به سیم (فرکانس جرقه)، بعد از هر جرقه، سیم فرصت برگشت به حالت مستقیم را ندارد و یک پیوستگی تقریبی نیرو در ناحیه جرقه روی سیم وجود دارد. همچنین می‌توان نیروی جرقه‌ها را به صورت توزیع‌شده روی همه سطح درگیر سیم در نظر گرفت.

در نواحی تحت پوشش زوایای θ_o و θ_i ، جرقه‌زنی تا رسیدن به مقدار g_{max} ادامه می‌یابد. به دلیل اینکه $\theta_o > \theta_i$ است، سطح

بیشتری از سیم در θ_o در معرض جرقه قرار دارد، مولفه‌های نیروی موازی با پاره خط OO' در دو ناحیه تحت پوشش زوایای θ_o و θ_i نمی‌توانند همدیگر را در این راستا به طور کامل خنثی کنند و سیم را به سمت مرکز قوس مسیر منحرف می‌کنند. البته مولفه برآیند نیروها در راستای عمود بر پاره خط OO' ، سیم را در جهت خلاف

پیشروی نیز منحرف می‌کند (تقابل نیروی قوس π به سمت خلاف پیشروی و نیروهای مربوط به زوایای θ_o و θ_i در جهت پیشروی) که این انحراف تأثیری در دقت برش مسیر قوسی ندارد.

شکل ۳ مولفه‌های نیروی برآیند در راستای پاره خط OO' و عمود بر این پاره خط را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، نیروهای وارد بر سیم، آن را به سمت عقب و همچنین مرکز قوس مسیر منحرف می‌کند. این نیروها همراه با انعطاف‌پذیری سیم به‌ویژه در برش قطعات ضخیم عامل انحراف سیم از مسیر برنامه‌ریزی‌شده هستند. در ماشین‌کاری مسیرهای مستقیم، این نیروها باعث واماندگی و خیز سیم در راستای شیار برش می‌شود و روی دقت ماشین‌کاری این مسیرها تأثیری ندارد. ولی در نواحی که سیم در آنها تغییر جهت حرکت دارد (مانند روی قوس‌ها)، این انحراف سیم (از مسیر برنامه‌ریزی‌شده) تأثیر مستقیمی روی دقت ماشین‌کاری می‌گذارد و باعث ایجاد خطای ماشین‌کاری می‌شود. در این بخش از مقاله، خطای خشن‌کاری قوس‌ها به وسیله وایرکات، ریشه‌یابی و تحلیل شد و امید است نتایج حاصل به تحقیقات آینده کمک نماید تا با استفاده از معادلات تحلیلی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بتوان مقادیر لازم برای جبران خطای انحراف سیم از مسیر برنامه‌ریزی‌شده را محاسبه و جبران نمود.

۳-۲- تحلیل خطاهای مراحل پرداخت‌کاری قوس‌ها به وسیله وایرکات و تاثیر زاویه جرقه

نتایج آزمون‌های تجربی نشان داد چنانچه بعد از مرحله خشن‌کاری به وسیله وایرکات، بار باقیمانده روی مسیرهای مستقیم و قوس‌ها برابر باشد، بعد از انجام مراحل پرداخت، همواره بار باقیمانده در روی مسیر قوسی کمتر از بار باقیمانده در روی مسیر مستقیم است. این مساله نشان‌دهنده وجود عوامل ایجاد خطاهای ماشین‌کاری در مراحل پرداخت‌کاری است. دلیل این خطاها را باید در خطای ماشین‌کاری ناشی از متفاوت‌بودن زاویه جرقه روی مسیرهای مستقیم و قوسی جست‌وجو کرد. زاویه جرقه در مراحل پرداخت‌کاری به زاویه مرکزی سیم گفته می‌شود که در آن جرقه‌ها بین سیم و قطعه کار ایجاد می‌شوند. اندازه این زاویه روی میزان بار برداشته‌شده توسط جرقه‌ها و عمق ماشین‌کاری بسیار موثر است.

۳-۲-۱- محاسبه زاویه جرقه در پرداخت‌کاری وایرکات

به کمک روابط ارائه‌شده در این بخش می‌توان اندازه زاویه جرقه در روی مسیرهای مستقیم و قوس‌ها با شعاع‌هایی مختلف و همچنین خطای عمق باربرداری ناشی از متفاوت‌بودن این زوایا را محاسبه نمود. شکل ۴ مراحل پرداخت اول و دوم یک برش سه‌مرحله‌ای روی مسیر مستقیم را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ می‌توان زاویه جرقه در روی مسیر مستقیم برای مرحله پرداخت اول (θ_{1S}^{st}) و پرداخت دوم (θ_{2S}^{st}) را به ترتیب از روابط ۱۵ و ۱۶ محاسبه نمود:

$$\theta_{1S}^{st} = \cos^{-1}\left(\frac{r_w + g_1 - k_{12}}{r_w + g_1}\right) \quad (15)$$

$$\theta_{2S}^{st} = \cos^{-1}\left(\frac{r_w + g_2 - k_{22}}{r_w + g_2}\right) \quad (16)$$

سیم جرقه‌ای زده نمی‌شود، با توجه به ثابت بودن فرکانس جرقه (f) در هر مرحله ماشین‌کاری، می‌توان چگالی تعداد جرقه اصابت‌کننده روی سطح قطعه کار در ثانیه آن مرحله (نسبت تعداد جرقه در واحد زمان به سطحی از قطعه کار که جرقه روی آن عمل می‌کند) را برای هر یک از مسیرهای مستقیم یا قوسی از رابطه ۲۰ محاسبه نمود:

$$d_s = \frac{f}{S_s} \quad (20)$$

d_s چگالی تعداد جرقه در واحد زمان بر واحد سطح است. هرچه چگالی تعداد جرقه روی سطح قطعه کار افزایش یابد، مقدار باربرداری نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در زاویه کوچک جرقه، به علت چگالی بیشتر تعداد جرقه، عمق باربرداری افزایش می‌یابد. اگر سرعت تغذیه پیشروی (S) و شعاع موثر جرقه ($r_w + g$) اجازه دهد، عمق باربرداری تا جایی افزایش می‌یابد که این چگالی (نسبت تعداد جرقه در واحد زمان به مساحت سطح) برای تمام مسیر ماشین‌کاری یکسان شود (یعنی این نسبت برای مسیر قوسی برابر نسبت مسیر مستقیم شود). ولی سرعت تغذیه پیشروی سیم و شعاع موثر جرقه، مانع این امر می‌شوند. سرعت تغذیه پیشروی سیم بالاتر به سیم اجازه نمی‌دهد تا شعاع موثر جرقه، حداکثر مقدار خود را داشته باشد و در نتیجه باعث کاهش عمق باربرداری و افزایش بار باقیمانده می‌شود.

از آنجایی که فرآیند وایرکات و تشکیل جرقه، یک فرآیند کاملاً تصادفی بوده و به عوامل متعددی مانند ذرات رسانا و نیمه‌رسانای شناور در دی‌الکتریک، دما و فشار پاشش دی‌الکتریک و غیره وابسته است، با اینکه پارامتر سرعت تغذیه پیشروی سیم روی ماشین‌کاری وایرکات تنظیم می‌شود، ولی سرعت پیشروی واقعی سیم به احتمال تشکیل جرقه در پیشانی سیم (در جهت پیشروی) و عوامل تصادفی متعدد بستگی دارد. به هر حال می‌توان گفت که افزایش عمق باربرداری به این دو پارامتر سرعت تغذیه پیشروی سیم و شعاع موثر جرقه وابسته است. با توجه به این شرایط، محاسبه افزایش عمق باربرداری، کار دشواری است، ولی با یک تقریب ساده می‌توان نتیجه گرفت که در مراحل پرداخت، رابطه زیر بین عمق باربرداری در روی مسیر مستقیم و قوسی برقرار است:

$$\frac{k_s^{st}}{d_s^{st}} = \frac{k_s^{cr}}{d_s^{cr}} \quad (21)$$

با جای‌گذاری روابط ۱۹ و ۲۰ در رابطه ۲۱، میزان عمق باربرداری از روی مسیر قوسی به صورت زیر است:

$$k_{12}^{cr} = \frac{\theta_s^{st} k_{12}^{st}}{\theta_s^{cr}} \quad (22)$$

خطای ماشین‌کاری مرحله اول ($E_{k12}^{\theta_s}$) از تفاضل عمق باربرداری روی مسیر قوسی و عمق باربرداری مسیر مستقیم از رابطه ۲۳ حاصل می‌شود:

$$E_{k12}^{\theta_s} = k_{12}^{cr} - k_{12}^{st} \quad (23)$$

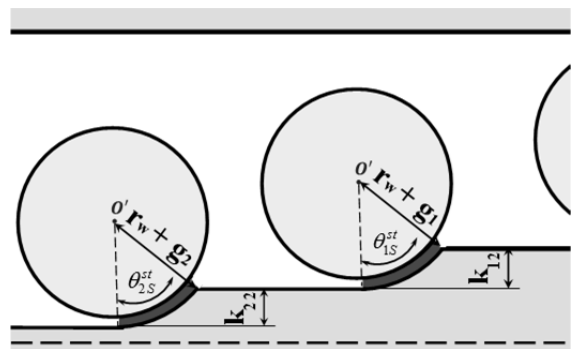
با جبران این خطا می‌توان بار باقیمانده بعد از مرحله پرداخت اول روی مسیرهای مستقیم (y_{12}^{st}) و قوسی (y_{12}^{cr}) را یکسان یا بسیار به هم نزدیک نمود. در نتیجه، خطای ماشین‌کاری مرحله پرداخت اول را حذف یا به شکل قابل توجهی کاهش داد. خطای ماشین‌کاری مرحله اول پرداخت برای مسیرهای قوسی با شعاع‌های مختلف از طریق رابطه تئوری ۲۳ محاسبه و در جدول ۵ ارائه شده است. محاسبات مربوط به مسیر قوسی با شعاع هدف ۴۵۰ میکرون به عنوان نمونه محاسبات به صورت زیر است:

شکل ۵ مراحل پرداخت اول و دوم یک ماشین‌کاری سه مرحله‌ای وایرکات روی مسیر قوسی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵، زاویه جرقه روی مسیر قوسی برای مرحله پرداخت اول (θ_{1s}^{cr}) و پرداخت دوم (θ_{2s}^{cr}) به ترتیب از روابط ۱۷ و ۱۸ قابل محاسبه است. برای پرداخت اول روی مسیر قوسی، رابطه زیر را داریم:

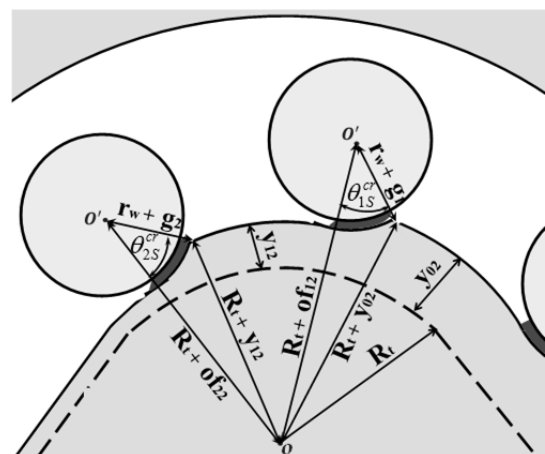
$$\begin{aligned} (R_t + y_{02})^2 &= (R_t + of_{12})^2 + (r_w + g_1)^2 \\ &\quad - 2(R_t + of_{12})(r_w + g_1)\cos\theta_{1s}^{cr} \rightarrow \\ \theta_{1s}^{cr} &= \cos^{-1} \left(\frac{(R_t + of_{12})^2 + (r_w + g_1)^2 - (R_t + y_{02})^2}{2(R_t + of_{12})(r_w + g_1)} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

برای پرداخت دوم روی مسیر قوسی:

$$\begin{aligned} (R_t + y_{12})^2 &= (R_t + of_{22})^2 + (r_w + g_2)^2 \\ &\quad - 2(R_t + of_{22})(r_w + g_2)\cos\theta_{2s}^{cr} \rightarrow \\ \theta_{2s}^{cr} &= \cos^{-1} \left(\frac{(R_t + of_{22})^2 + (r_w + g_2)^2 - (R_t + y_{12})^2}{2(R_t + of_{22})(r_w + g_2)} \right) \end{aligned} \quad (18)$$



شکل ۴) زاویای جرقه مراحل پرداخت اول و دوم روی مسیر مستقیم



شکل ۵) زاویای جرقه مراحل پرداخت اول و دوم روی مسیر قوسی

با استفاده از زاویه جرقه می‌توان مساحت تحت تاثیر جرقه روی قطعه کار را از رابطه ۱۹ به دست آورد:

$$S_s = 2H(r_w + g)\theta_s \quad (19)$$

S_s مساحت تحت تاثیر جرقه روی قطعه کار، $2H$ ارتفاع (ضخامت) برش و θ_s زاویه جرقه به طور کلی است. اگر فرض شود جرقه‌ها فقط در محدوده زاویه جرقه ایجاد می‌شوند و در سایر قسمت‌های

خطا را می‌توان در دو پارامتر سرعت تغذیه پیشروی سیم و شعاع موثر جرعه یافت. همانند مرحله قبل، برای مرحله دوم پرداخت نیز محاسبات مربوط به خطای مسیر قوسی با شعاع مورد هدف ۴۵۰ میکرون به‌عنوان نمونه محاسبات آورده شده است:

$$\theta_{2S}^{cr=450} = \cos^{-1} \left(\frac{(450 + 132.5)^2 + (125 + 7.5)^2 - (450 + 9)^2}{2(450 + 132.5)(125 + 7.5)} \right)$$

$$\rightarrow \theta_{2S}^{cr=450} = 18.74^\circ$$

$$S_{2S} = 9 \times (125 + 7.5) \times \frac{18.74 \times \pi}{180} = 390.04 \text{ mm}^2$$

$$d_{2S} = \frac{f}{S_{2S}} = \frac{200000}{390.04} = 512.77 \frac{\text{sparks}}{\text{s.mm}^2}$$

$$\theta_{2S}^{st} = \cos^{-1} \left(\frac{125 + 7.5 - 9}{125 + 17.5} \right) = 21.24^\circ$$

$$k_{22}^{cr} = \frac{21.24 \times 9}{18.74} = 10.20 \mu\text{m}$$

$$E_{k_{22}}^{\theta_s} = 10.20 - 9 = 1.20 \mu\text{m}$$

در این بخش به‌کمک روابط تحلیلی، میزان خطاهای مراحل پرداخت‌کاری مسیرهای قوسی با شعاع‌های مختلف محاسبه شد. با کمک نتایج این بخش، محاسبه و پیش‌بینی خطای مراحل پرداخت‌کاری وایرکات میسر شد. با پیش‌بینی و جبران این خطاها، دقت ماشین‌کاری قوس‌ها افزایش خواهد یافت و ساخت قطعات بسیار دقیق ممکن می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

دستیابی به دقت‌های بالا در ماشین‌کاری قوس‌ها و گوشه‌های کوچک‌شعاع، یکی از مشکلات بزرگ فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی یا وایرکات است. تحلیل و محاسبه خطاهای ماشین‌کاری قوس‌های کوچک‌شعاع در ماشین‌کاری چندمرحله‌ای وایرکات کار بسیار سخت و البته ارزشمندی است. زیرا هر مرحله ماشین‌کاری، خطاهای ابعادی و هندسی خاص خود را ایجاد می‌کند که تجمیع این خطاها و انتقال آنها به مراحل بعدی ماشین‌کاری باعث پیچیده‌تر شدن تحلیل و ریشه‌یابی خطاهای این نوع ماشین‌کاری می‌شود. در این تحقیق، خطاهای مراحل خشن‌کاری، پرداخت اول و پرداخت دوم ماشین‌کاری سه‌مرحله‌ای وایرکات روی مسیرهای مستقیم و قوس‌ها (با شعاع‌های مختلف) به‌کمک معادلات تئوری و تحلیلی، ریشه‌یابی و محاسبه شده و به‌وسیله انجام آزمون‌های تجربی، ارزیابی و صحت‌گذاری شده است. نتایج حاصل از این تحقیق عبارت از موارد زیر است:

۱- به‌کمک آزمون‌های تجربی مشخص شد که دقت نهایی فرآیند ماشین‌کاری چندمرحله‌ای وایرکات به‌ویژه در قوس‌های کوچک‌شعاع به میزان خطاها و دقت ماشین‌کاری هر مرحله بالاخص مرحله خشن‌کاری بسیار وابسته است. باید شیوه‌ای اتخاذ شود تا ضخامت بار باقیمانده، بعد از هر مرحله در کل مسیر برش مستقیم و قوسی کاملاً یکسان باشد و خطاهای هر مرحله ماشین‌کاری نباید به مراحل بعدی منتقل شوند.

۲- به‌کمک معادلات ریاضی، مفهوم گستره زاویه جرعه‌زنی در خشن‌کاری مسیرهای قوسی، تعریف و محاسبه شد و تاثیر آن روی انحراف سیم از مسیر برنامه‌ریزی‌شده و خطای ماشین‌کاری این مرحله تحلیل شد.

$$\theta_{1S}^{cr=450} = \cos^{-1} \left(\frac{(450 + 147)^2 + (125 + 13)^2 - (450 + 33)^2}{2(450 + 147)(125 + 13)} \right)$$

$$\rightarrow \theta_{1S}^{cr=450} = 30.37^\circ$$

$$S_{1S} = 9 \times (125 + 13) \times \frac{30.37 \times \pi}{180} = 658.33 \text{ mm}^2$$

$$d_{1S} = \frac{f}{S_{1S}} = \frac{117000}{658.33} = 177.72 \frac{\text{sparks}}{\text{s.mm}^2}$$

$$\theta_{1S}^{st} = \cos^{-1} \left(\frac{125 + 13 - 24}{125 + 13} \right) = 34.3^\circ$$

$$k_{12}^{cr} = \frac{34.3 \times 24}{30.37} = 27.11 \mu\text{m}$$

$$E_{k_{12}}^{\theta_s} = 27.11 - 24 = 3.11 \mu\text{m}$$

جدول ۵ خطاهای ماشین‌کاری تئوری محاسبه‌شده برای مراحل پرداخت اول و دوم مسیرهای قوسی با شعاع‌های مختلف

مرحله	R_t (میکرون)	میانگین بار باقیمانده (میکرون)	میانگین خطا (میکرون)
پرداخت اول			
مسیر قوسی	۱۵۰	۲۵/۸۶	-۷/۸۳
	۳۰۰	۲۸/۹۴	-۴/۴۴
مسیر مستقیم	۴۵۰	۳۰/۳۷	-۳/۱۱
	-	۳۴/۳	-
پرداخت دوم			
مسیر قوسی	۱۵۰	۱۵/۶۷	-۳/۲
	۳۰۰	۱۷/۷۹	-۱/۷۴
مسیر مستقیم	۴۵۰	۱۸/۷۴	-۱/۲۰
	-	۲۱/۲۴	-

همان گونه که نتایج جدول‌های ۳ و ۵ نشان می‌دهند، مقادیر تئوری محاسبه‌شده برای خطاهای مرحله اول پرداخت روی مسیرهای قوسی با شعاع مختلف با مقادیر مرتبط حاصل از آزمایش‌ها همخوانی نسبتاً خوبی دارند. برای میزان مرحله دوم پرداخت نیز عمق ماشین‌کاری روی مسیر قوسی با استفاده از رابطه بین زاویه جرعه و عمق باربرداری مسیر مستقیم از طریق رابطه ۲۴ قابل محاسبه است:

$$k_{22}^{cr} = \frac{\theta_S^{st} k_{22}^{st}}{\theta_S^{cr}} \quad (24)$$

بنابراین خطای تئوری ماشین‌کاری مرحله پرداخت دوم روی مسیر قوسی ($E_{k_{22}}^{\theta_s}$) طبق رابطه ۲۵ به‌صورت زیر است:

$$E_{k_{22}}^{\theta_s} = k_{22}^{cr} - k_{22}^{st} \quad (25)$$

با جبران این خطا می‌توان بعد از مرحله پرداخت دوم، بار باقیمانده روی مسیر مستقیم (γ_{22}^{st}) و روی مسیر قوسی (γ_{22}^{cr}) را یکسان یا بسیار به هم نزدیک نمود و خطای ماشین‌کاری مرحله پرداخت دوم را حذف یا به‌شکل قابل توجهی کاهش داد. خطاهای ماشین‌کاری مرحله پرداخت دوم برای مسیرهای قوسی با شعاع‌های مختلف که از طریق رابطه تئوری ۲۵ محاسبه شده، در جدول ۵ ارایه شده است. مقایسه این خطاهای تئوری با خطاهای تجربی حاصل از آزمون‌ها (جدول ۴) نشان می‌دهد که مقادیر تئوری محاسبه‌شده برای خطاها با مقادیر حاصل از آزمون‌ها همخوانی نسبتاً خوبی دارند. همان گونه که اشاره شد، دلیل اندکی اختلاف بین این دو

زیرنویس‌ها: زیرنویس $i = 0, 1, 2$ در پارامترهای y_{ij} , of_{ij} , ok_{ij} و g_i به ترتیب اشاره به مراحل خشن‌کاری، پرداخت اول و پرداخت دوم دارد و زیرنویس j نشانگر تعداد مرحله پرداخت در برش‌های چندمرحله‌ای است.

منابع

- 1- Nikravan AR, Kolahan F. Statistical analysis and optimization of process parameters for cutting rate and surface roughness in wire cut machining of Ti-6Al-4V alloy. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(9):141-152. [Persian]
- 2- Parviziyan J, Abyar H, Abdullah A, Ghadiri Zahrani E. Accuracy of small radius corners in multi stage WEDM: Roughing parameters and geometrical analysis. Modares Mechanical Engineering. 2013;13(7):87-101. [Persian]
- 3- Selvakumar G, Sarkar S, Mitra S. Experimental investigation on die corner accuracy for wire electrical discharge machining of Monel 400 alloy. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture. 2012;226(10):1694-1704.
- 4- Dekeyser W, Snoeys R, Jean-Pierre. Geometrical accuracy of Wire-EDM. International Symposium for Electromachining, 1 January, 1989, Nagoya, Japan. Unknown Publisher City?: Unknown Publisher; 1989.
- 5- Magara T, Yatomi T, Yamada H, Kobayashi K. Study on machining accuracy in Wire-EDM: Improvement of machining accuracy of corner parts in rough-cutting. Journal of the Japan Society of Electrical Machining Engineers. 1991;25(49):23-32. [Japanese]
- 6- Magara T, Yatomi T, Yamada H, Kobayashi K. Study on machining accuracy in Wire-EDM: Improvement of machining accuracy of corner parts in finish-cutting. Journal of the Japan Society of Electrical Machining Engineers. 1992;26(52):1-15. [Japanese]
- 7- Dauw DF, Beltrami I. High-precision Wire-EDM by online wire positioning control. CIRP Annals. 1994;43(1):193-197.
- 8- Hsue WJ, Liao YS, Lu SS. A study of corner control strategy of Wire-EDM based on quantitative MRR analysis. International Journal of Electrical Machining. 1999;4:33-39.
- 9- 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). International Journal of Electrical Machining. 2003;8:27-32.
- 10- Obara H, Ohsumi T, Imai W, Yamagishi Y, Hatano M. Combined power and path control method to improve corner accuracy of rough cuts by Wire EDM (2nd report). International Journal of Electrical Machining. 2003;8:33-38.
- 11- Puri AB, Bhattacharyya B. An analysis and optimisation of the geometrical inaccuracy due to wire lag phenomenon in WEDM. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003;43(2):151-159.
- 12- Sanchez JA, López De Lacalle LN, Lamikiz A. A computer-aided system for the optimization of the accuracy of the wire electro-discharge machining process. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2004;17(5):413-420.
- 13- Sanchez JA, Rodil JL, Herrero A, Lopez De Lacalle LN, Lamikiz A. On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of Wire-EDM corner-cutting. Journal of Materials Processing Technology. 2007;182(1-3):574-579.

۳- برای مراحل پرداخت‌کاری، مفهوم زاویه جرقه برای مسیرهای مستقیم و قوسی به صورت ریاضی تعریف و محاسبه شد و تاثیر این پارامتر روی تفاوت بار باقیمانده و خطای ماشین‌کاری هر یک از این مسیرها بررسی و ارزیابی شد.

۴- در مراحل پرداخت‌کاری، چگالی متفاوت جرقه بر واحد سطح قطعه کار روی مسیرهای مستقیم و قوسی باعث می‌شود که عمق ماشین‌کاری روی هر یک از این مسیرها متفاوت باشد و در نتیجه، بار باقیمانده روی مسیر مستقیم همواره بیشتر از بار باقیمانده روی مسیر قوسی باشد.

۵- مقایسه و صحت‌سنجی نتایج معادلات تئوری ارائه شده در این مقاله برای تخمین خطاهای مراحل پرداخت‌کاری مسیرهای قوسی با نتایج آزمون‌های تجربی نشان داد که این معادلات با دقت بسیار خوبی می‌توانند خطاهای مذکور را محاسبه و پیش‌بینی نمایند و می‌توان از این معادلات در کاربردهای دقیق صنعتی وایرکات استفاده نمود.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تابیدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: حمید آبیاری (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ امیر عبدالله (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)
منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

۴- پی‌نوشت

A	زمان روشنی پالس (میکروثانیه)
A _j	متوسط ولتاژ گپ (ولت)
C	خازن (میکروفاراد)
d _s	چگالی تعداد جرقه در واحد زمان بر واحد سطح (Sparks/s.mm ²)
E _k ^{θs}	خطای ماشین‌کاری روی مسیر قوسی در مرحله پرداخت ناشی از تفاوت زاویه جرقه نسبت به مسیر مستقیم (میکرون)
E _b	شدت میدان الکتریکی شکست دی‌الکتریک (ولت بر میلی‌متر)
f	فرکانس تخلیه (کیلوهرتز)
g	اندازه گپ جانبی جرقه (میکرون)
g _{max}	ماکزیمم گپی که در آن احتمال تشکیل جرقه وجود دارد (میکرون)
2H	ارتفاع (ضخامت) برش (میلی‌متر)
k	عمق ماشین‌کاری (میکرون)
of	افست ماشین‌کاری (میکرون)
P	توان تخلیه (A)
r _w	شعاع سیم (میکرون)
R _c	شعاع مرکزی مسیر قوسی (میکرون)
R _t	شعاع هدف مسیر قوسی (میکرون)
S	سرعت تغذیه پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)
S _s	مساحت تحت تاثیر جرقه روی قطعه کار (mm ²)
V	ولتاژ مدار باز (ولت)
w _b	کشش سیم (N)
w _s	سرعت سیم (متر بر دقیقه)
y	بار باقیمانده (میکرون)

علامه یونانی

زاویه جرقه روی قوس داخلی مسیر روی نیمه عقبی سیم در مرحله خشن‌کاری (رادیان)	θ _i
زاویه جرقه روی قوس بیرونی مسیر روی نیمه عقبی سیم در مرحله خشن‌کاری (رادیان)	θ _o
زاویه جرقه در مراحل پرداخت‌کاری (رادیان)	θ _s

بالانویس‌ها

معرف پارامترهای مرتبط با مسیر قوسی	cr
معرف پارامترهای مرتبط با مسیر مستقیم	st

method of determination of wire lag for enhanced profile accuracy in WEDM. Precision Engineering. 2011;35(2):339-347.

19- Chen Z, Huang Y, Zhang Z, Li H, Yi Ming W, Zhang G. An analysis and optimization of the geometrical inaccuracy in WEDM rough corner cutting. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014;74(5-8):917-929.

20- Charmilles Company. User manual Robofil 200. Unknown Publisher City: Charmilles Technologies; 1989.

21- Abyar Firoozabadi H, Abdullah A, Parvizian J. Accurate machining of small-radius corners by Wire EDM. Journal of Mechanical Engineering. 2012;42(2):1-12. [Persian]

22- ASM International, Handbook Committee. ASM handbook: Heat treating. 10th Edition. 4th Volume. Russell Township: ASM International; 1991.

14- Han F, Zhang J, Soichiro I. Corner error simulation of rough cutting in Wire EDM. Precision Engineering. 2007;31(4):331-336.

15- Han F, Cheng G, Feng Z, Isago S. Thermo-mechanical analysis and optimal tension control of micro wire electrode. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2008;48(7-8):922-931.

16- Dodun O, Gonçalves-Coelho AM, Slătineanu L, Nagit G. Using wire electrical discharge machining for improved corner cutting accuracy of thin parts. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009;41(9):858-864.

17- Di Sh, Chu X, Wei D, Wang Z, Chi G, Liu Y. Analysis of kerf width in micro-WEDM. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2009;49(10):788-792.

18- Sarkar S, Sekh M, Mitra S, Bhattacharyya B. A novel