دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۷، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۲۱ تا ۳۲
Vol. 47, No. 2, Winter 2015, pp. 21-32

نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)
AmirKabir Jounrnal of Science & Research
(Mechanical Engineering)
(ASJR-ME)

تحلیل اثر متغیرهای خشن‌کاری وایرکات بر پهنای شیار و گپ ماشین‌کاری مسیر مستقیم و قوس گوشه

حمید آبیار فیروزآبادی[۱]، امیر عبداله[۲]، جمشید پرویزیان[۳*]

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: ۱۳۹۰/۸/۸ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰)

چکیده

از مهمترین مشکلات فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی (وایرکات)، دقیق‌نبودن هندسه‌ی برش گوشه و قوس گوشه است. دستیابی به شکل هندسی صحیح و دقت ابعادی بالا می‌تواند برتری این فرآیند را استوار نماید. مطالعه‌ی شیار برش می‌تواند به تحلیل و پیش‌بینی خطا در برش وایرکات کمک نماید. در این تحقیق، شکاف واقعی برش روی مسیر مستقیم و قوس گوشه در مرحله‌ی خشن‌کاری بررسی شده است. آزمایش‌ها بر اساس سه متغیر فرکانس تخلیه، کشش سیم و شعاع قوس توسط روش فاکتوریل کامل طراحی شده‌اند. به کمک تحلیل‌های آماری اثر این متغیرها بر پهنای شیار برش روی مسیر مستقیم و قوس گوشه ارزیابی شده‌است. مقادیر تجربی گپ ماشین‌کاری روی مسیر مستقیم و گپ متوسط ماشین‌کاری روی قوس گوشه برای شرایط مختلف آزمون به دست آمده‌اند. تقعر دیواره‌ی قوس داخلی و تحدب دیواره‌ی قوس بیرونی مسیر در روی قوس گوشه، در اندازه‌گیری پهنای شیار خطا ایجاد می‌نماید. در محل خروج سیم از مسیر قوس انباشتگی مواد دیده می‌شود. با توجه به آزمایش‌ها و محاسبه‌ی گپ متغیر ماشین‌کاری روی قوس گوشه، مقادیر تجربی انحراف سیم و خطای ماشینکاری قوس محدب گوشه محاسبه می‌شوند.

کلمات کلیدی:

ماشینکاری وایرکات، خطای ماشینکای، قوس گوشه، پهنای شیار، انحراف سیم

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات، Email: japa@cc.iut.ac.ir

۱- مقدمه

از بین روش‌های ماشینکاری غیرسنتی، وایرکات به عنوان یک روش اقتصادی و موثر برای تولید دسته‌ی بزرگی از قطعات شناخته شده است. قابلیت تولید قطعات نازک و پیچیده با پروفیل‌های دقیق، این روش را به روشی ایده‌آل برای تولید قطعات صنعتی و آزمایشگاهی تبدیل‌نموده است. یکی از زمینه‌های مهم تحقیقاتی فرآیند وایرکات، مطالعه مسیرهای حرکتی برای بهبود دقت ابعادی قطعات تولیدی است. در برش‌های دقیق وایرکات ارتعاش و خیز سیم، مشکل بحرانی است. ارتعاش و خیز سیم باعث تغییر شکل و واماندگی[1] آن می‌شوند. به‌هرحال، یکی از متغیرهایی که اثر مستقیم روی دقت ساخت قطعات به وسیله وایرکات دارد تغییر شکل سیم[2] است. این عامل در مرحله‌ی خشن‌کاری علت اصلی بی‌دقتی‌های گوشه‌ها و انحناهاست. در ماشینکاری گوشه‌ها زمانی که شعاع مسیر کوچکتر از نصف پهنای شیار برش باشد تخلیه الکتریکی روی بخشی از سطح سیم رخ می‌دهد (تخلیه‌ی جزیی[3]). درنتیجه سیم در اثر نیروی انفجار پلاسما، هم در جهت معکوس جهت برش و هم در جهت عمود بر آن خم می‌شود. زمانی که شعاع مسیر بزرگتر از نصف پهنای شیار برش باشد تخلیه در تمام سطح جلوی سیم انجام می‌شود (تخلیه‌ی کامل[4]). در این حالت سیم تنها در جهت معکوس جهت برش خم‌می‌شود [۱-۲]. افزایش دما و افزایش شدت میدان الکتریکی نیز از متغیرهای ایجاد خطا در برش گوشه‌ها هستند [۳-۴].

خطای ماشینکاری گوشه‌ها و انحناها در وایرکات توسط محققین مختلف مورد توجه قرارگرفته است. این محققین با کنترل متغیرهای ماشین و تغییر مسیر (جابه‌جایی مسیر) سعی نموده‌اند تا میزان انحراف سیم از مسیر برنامه‌ریزی شده را کاهش و در نتیجه بی‌دقتی برش گوشه‌ها را کاهش‌دهند. نتایج این تحقیقات در مراجع [۵-۱۰] آورده شده‌اند.

همان‌گونه که گفته شد گوشه‌ها بر حسب شکل هندسی به گوشه‌های تیز[5]، گوشه‌های بزرگ-شعاع[6] و گوشه‌های کوچک-شعاع[7] تقسیم می‌شوند [۱]. بررسی ماشینکاری گوشه‌های کوچک-شعاع از اهمیت زیادی برخوردار است. در تحقیق حاضر، پهنای شیار برش روی مسیر مستقیم و قوس گوشه در برش یک مرحله‌ای وایرکات بررسی‌شده، اثر متغیرهای ماشینکاری روی آنها و همچنین ارتباط آنها با خطای ماشینکاری بحث می‌شود.

پهنای شیار برش از جمله متغیرهایی است که می‌تواند به تحلیل و پیش‌بینی خطا در برش وایرکات کمک نماید. ثابت بودن پهنای شیار در طول مسیر برش منجر به بار باقیمانده یکنواخت و کاهش خطای برش می‌شود. پهنای شیار ایجاد شده در فرآیند وایرکات به متغیرهای مختلفی مانند فرکانس تخلیه‌ی الکتریکی، کشش سیم، انرژی جرقه‌ها، فشار پاشش دی‌الکتریک، دور نمودن ناکارآمد براده‌ها و سرعت تغذیه سیم بستگی دارد. برخی تحقیقات گذشته، اثر متغیرهای ماشینکاری روی پهنای شیار برش را بررسی نموده‌اند. بررسی اثر متغیرهای ولتاژ مدار باز، زمان روشنی پالس، سرعت سیم و پاشش دی‌الکتریک روی پهنای شیار به روش تاگوچی نشان‌می‌دهد که از میان این متغیرها، ولتاژ مدار باز مؤثرترین است [۱۱]. در حالی که تحقیق روی ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی سیمی[8] با کار تجربی نشان‌می‌دهد که افزایش کشش، باعث راستی[9] شیار و افزایش فرکانس منبع قدرت، باعث یکنواختی شیار برش می‌شود [۱۲]. با تشکیل یک مدل ارتعاش عرضی سیم میکرو وایرکات و به وسیله‌ی کار تجربی می‌توان رابطه‌ی بین متغیرهای ماشینکاری و دامنه‌ی ارتعاش سیم را تحلیل نمود [۱۳]. محقق در این مطالعه به نقش کلیدی ارتعاش سیم در تعیین پهنای شیار، اشاره و ادعا نموده که به وسیله‌ی سیم ۳۰ میکرونی شیار برش ۳۰/۸ میکرون قابل دستیابی است.

۲- مواد، شرایط انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری

در این تحقیق آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های فولاد ۱/۲۵۱۰ (AISI:O1) به ابعاد ۹ × ۴۹ × ۵۴ میلی‌متر انجام شدند. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، پس از فرزکاری، طبق استاندارد ASM عملیات حرارتی تنش‌گیری اجرا شد و سپس کلیه سطوح آنها با دقت توازی ۲± دقیقه سنگ‌زده شدند. برای جلوگیری از ایجاد تنش پسماند، عملیات سنگ‌زنی با بار کم و مایع خنک‌کاری زیاد انجام شد. نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی با استفاده از ساعت میکرونی روی میز ماشین وایرکات تنظیم و بسته شدند. همه‌ی آزمایش‌های این تحقیق به وسیله‌ی ماشین وایرکات شارمیلز روبوفیل ۲۰۰[10] و با سیم SW25X (با قطر ۰/۲۵میلی متر) انجام شدند. سیم مورد استفاده همان سیم پیشنهادی سازنده در کاتالوگ ماشین بود. با در نظر گرفتن حداقل فاصله کلگی‌های بالا و پایین ماشین تا سطح بالا و پایین قطعه‌کار، نمونه‌ها طبق آزمایش‌های طراحی شده، بریده شدند. در حین انجام آزمایش‌ها سعی شد که شرایط محیطی پایدار و ثابت بمانند. برای اندازه‌گیری بار باقیمانده از کمپراتور مکانیکی پیکوک[11] در شرایط اتاق تمیز استفاده شد [۱۴]. برای اندازه‌گیری پهنای شیار از سامانه اندازه‌گیری ویدیویی VMS[12] مدل ARCS در شرایط اتاق تمیز استفاده شده‌است.

در ماشین وایرکات تنظیمات متغیرها برای مراحل مختلف برش به وسیله سازنده ماشین پیشنهاد می‌شود. این مقادیر بسته به ضخامت و جنس قطعه‌کار و سیم تغییر می‌نمایند. تنظیمات پیشنهادی سازنده ماشین[13] برای برش یک مرحله‌ای خشن‌کاری برای فولاد به ضخامت

[1] Wire-lag
[2] Wire deflection
[3] Partial discharge
[4] Whole front surface discharge
[5] Sharp corner
[6] Large-radius corner
[7] Small-radius corner
[8] Wire electrochemical discharge machining
[9] Straightness
[10] Charmilles Robofil200
[11] Peacock
[12] Video Measuring System (VMS)
[13] Charmilles Technologies

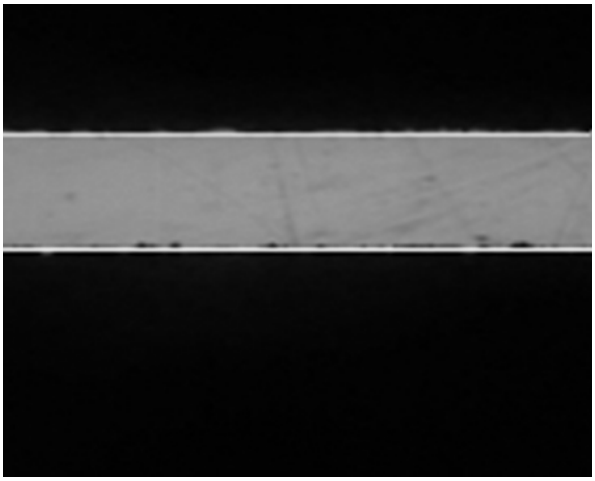
۱۰ میلیمتر در مرجع [۱۵] آورده شده است.

همان‌گونه که اشاره شد در فرآیند وایرکات متغیرهای مختلفی روی پهنای شیار برش اثر دارند. از میان متغیرهای مرجع [۱۵]، متغیرهای فرکانس تخلیه و کشش سیم می‌توانند اثر زیادی روی پهنای شیار برش داشته باشند. در تحقیق حاضر، اثر این دو متغیر روی پهنای شیار مسیر مستقیم و قوس‌های گوشه با شعاع‌های مختلف بررسی شده است. برای انجام آزمایش‌ها، فرکانس تخلیه در دو سطح (۱۳ و ۱۸ کیلو هرتز)، کشش سیم در سه سطح (۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ نیوتن) و شعاع قوس در سه سطح (۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میکرون) در نظر گرفته شد و سایر متغیرها برابر مقدار پیشنهادی سازنده ثابت در نظر گرفته شدند.

با توجه به ماهیت فرآیند تخلیه الکتریکی و تعداد زیاد متغیرهای موثر بر پهنای شیار برش، یافتن مقادیر بهینه‌ی متغیرها از روش‌های تحلیلی امکان‌پذیر نیست. بنابراین باید از روش‌های تجربی همراه با تحلیل‌های آماری برای یافتن مقادیر بهینه‌ی آنها استفاده نمود [۱۶-۱۹]. در این تحقیق از روش طراحی آزمایش‌ها و تحلیل رگرسیون برای بررسی اثر متغیرها بر روی پهنای شیار برش، استخراج شرایط ماشین‌کاری بهینه و رابطه‌ی بین این متغیرها و خروجی استفاده شده است. طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل، اطلاعات جامعی را از فرآیند فراهم می‌آورد. ازاین‌رو، برای انجام آزمایش‌ها از این روش استفاده شده است.

۳- پهنای شیار برش روی مسیر مستقیم

طبق آزمایش‌های طراحی شده، سطوح مختلف متغیرها در مرحله خشن‌کاری آزموده شده‌اند. شکل ۱ یک شیار ایجاد شده به وسیله وایرکات روی مسیر مستقیم توسط سیم SW25X به قطر ۲۵۰ میکرومتر و جدول ۱ مقادیر پهنای شیار روی مسیر مستقیم، k_0^{st} ، در مرحله‌ی خشن‌کاری برای شرایط مختلف آزمون را نشان‌می‌دهد.



شکل ۱: شیار ایجاد شده به وسیله وایرکات روی مسیر مستقیم توسط سیم SW25X به قطر ۲۵۰ میکرومتر

جدول ۲ تحلیل واریانس به‌دست‌آمده برای پاسخ k_0^{st} با سطح اطمینان[14] ۹۵ درصد را نشان‌می‌دهد.

نمودار شکل ۲ نشان‌می‌دهد که مقادیر باقیمانده به طور تصادفی[15] توزیع شده‌اند و از روند خاصی پیروی نمی‌نمایند و درنتیجه شرط مستقل بودن مقادیر باقیمانده به خوبی رعایت شده است. نمودار احتمال نرمال برای پاسخ k_0^{st} در شکل ۳ دلالت بر نرمال‌بودن توزیع مقادیر باقیمانده دارد. نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده لازمه‌ی تحلیل واریانس است.

جدول ۲ نشان‌می‌دهد که با سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P < ۰/۰۵$)، هر دو متغیر فرکانس جرقه و کشش سیم و اثر متقابل آنها روی پاسخ k_0^{st} موثر هستند. معادله رگرسیونی ۱ ارتباط این متغیرها با خروجی k_0^{st} را نشان‌می‌دهد.

$$k_0^{st} = ۳۵۳/۵۲ - ۲/۱۸۳\, f - ۷/۹۴۷\, w_b + ۰/۳۲۶۷\, f \times w_b \qquad (۱)$$

جدول ۱: پهنای شیار در مرحله خشن روی مسیر مستقیم

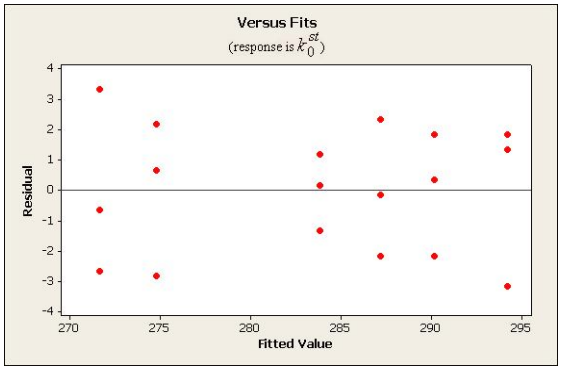
	f (kHz)	w_b (N)	k_0^{st} (μm)			
			نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین
۱	۱۳	۱۰	۲۹۰/۵	۲۸۸	۲۹۲	۲۹۰/۱۶
۲	۱۳	۱۲/۵	۲۷۵/۵	۲۷۲	۲۷۷	۲۷۴/۸۴
۳	۱۳	۱۵	۲۷۵	۲۷۱	۲۶۹	۲۷۱/۶۶
۴	۱۸	۱۰	۲۹۱	۲۹۵/۵	۲۹۶	۲۹۴/۱۶
۵	۱۸	۱۲/۵	۲۸۵	۲۸۷	۲۸۹/۵	۲۸۷/۱۶
۶	۱۸	۱۵	۲۸۵	۲۸۲/۵	۲۸۴	۲۸۳/۸۴

[14] Confidence level
[15] Random

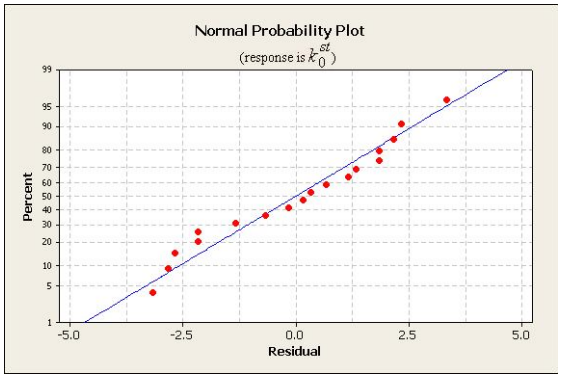
جدول ۲: تحلیل واریانس (ANOVA) برای پهنای شیار مستقیم، k_0^{st}

	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
f	۱	۴۰۶/۱۲	۴۰۶/۱۲	۴۰۶/۱۲	۷۱/۱۵	۰/۰۰۰
w_b	۲	۶۸۶/۱۹	۶۸۶/۱۹	۳۴۳/۱	۶۰/۱	۰/۰۰۰
$f \times w_b$	۲	۶۸/۰۸	۶۸/۰۸	۳۴/۰۴	۵/۹۶	۰/۰۱۶
Error	۱۲	۶۸/۵	۶۸/۵	۵/۷۱		
Total	۱۷	۱۲۲۸/۹				

S = ۲/۳۸۹۲۱ | R^2 = %۹۴/۴۳ | R^2 (adj) = %۹۲/۱

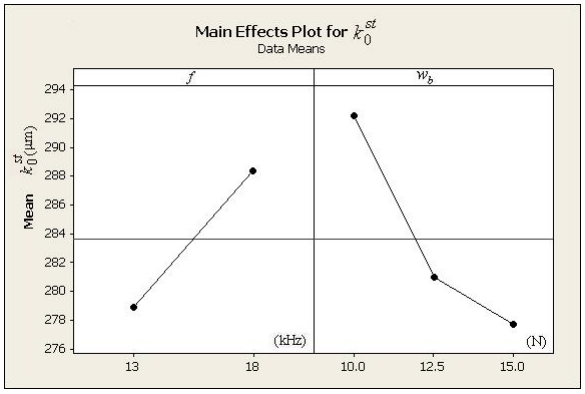


شکل ۲: نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده برای پهنای شیار مستقیم، k_0^{st}

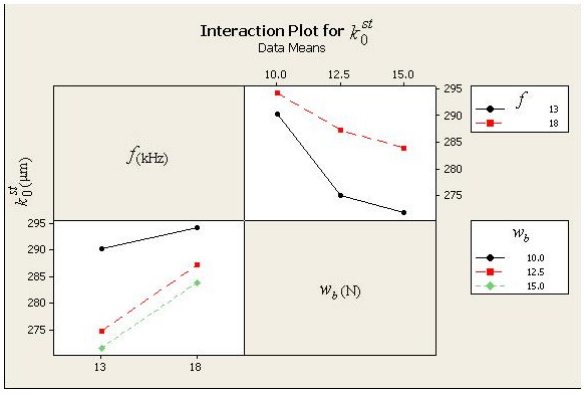


شکل ۳: نمودار احتمال نرمال برای پهنای شیار مستقیم، k_0^{st}

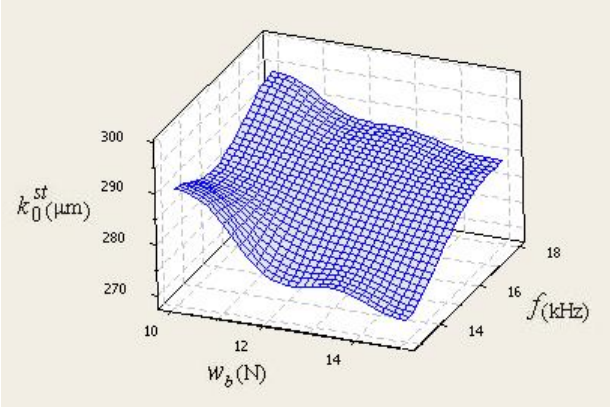
نمودار اثرات اصلی متغیرهای فرکانس جرقه و کشش سیم بر روی پهنای شیار مستقیم، k_0^{st}، در شکل ۴، مشخص می‌نماید که مقدار k_0^{st} رابطه مستقیم با فرکانس جرقه و رابطه عکس با کشش سیم دارد. شکل ۵ نمودار اثرات متقابل متغیرهای فرکانس جرقه و کشش سیم بر روی خروجی k_0^{st} را مشخص می‌نماید. با توجه به شکل ۵ می‌توان گفت که در مقادیر بالای کشش سیم، افزایش فرکانس جرقه اثر بیشتری روی افزایش پهنای شیار داشته است. همچنین در سطح پایین فرکانس جرقه، کاهش کشش سیم از سطح ۱۲/۵ N به سطح ۱۰ N باعث افزایش ناگهانی پهنای شیار شده‌است.



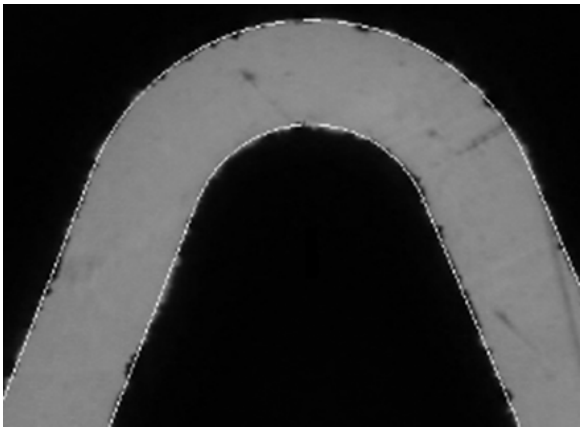
شکل ۴: نمودار تاثیر تغییر فرکانس جرقه (در کشش ۱۵ N) و کشش سیم (در فرکانس جرقه ۱۳ kHz) بر روی پهنای شیار مستقیم، k_0^{st}



شکل ۵: نمودار اثرات متقابل فرکانس جرقه و کشش سیم بر روی پهنای شیار مستقیم، k_0^{st}



شکل ۶: شکل فضایی پهنای شیار مستقیم، k_0^{st} به ازای فرکانس جرقه وکشش سیم



شکل ۷: شیار ایجاد شده روی قوس گوشه

شکل فضایی پهنای شیار مستقیم، k_0^{st}، برای فرکانس جرقه-کشش سیم در شکل ۶ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس جرقه و کاهش کشش سیم، مقدار k_0^{st} به بیش‌ترین مقدار می‌رسد.

٤- پهنای شیار برش روی قوس

در این قسمت اثر متغیرهای فرکانس جرقه، کشش سیم و شعاع قوس روی پهنای شیار به کمک تحلیل آماری ارزیابی شده است. شکل ۷ یک شیار ایجاد شده روی قوس گوشه با شعاع ۳۰۰ میکرون و با سیم SW25X به قطر ۲۵۰ میکرون را نشان‌می‌دهد.

جدول ۳ مقادیر پهنای شیار برش روی قوس گوشه، k_0^{cr}، و شعاع داخلی مسیر، R_i، برای آزمون‌های مختلف متغیرها را نشان‌می‌دهد.

با تجزیه و تحلیل داده‌های بالا، جدول تحلیل واریانس ۴ برای پاسخ حاصل شده‌است.

جدول ۳: پهنای شیار حاصل از مرحله‌ی خشن‌کاری در روی قوس گوشه

	f (kHz)	w_b (N)	R (μm)	k_0^{cr} (μm)	R_i (μm)
۱	۱۳	۱۰	۱۵۰	۲۸۱	۱۷۲
۲	۱۳	۱۰	۳۰۰	۲۷۸/۵	۳۲۳/۵
۳	۱۳	۱۰	۴۵۰	۲۸۳	۴۷۳
۴	۱۳	۱۲/۵	۱۵۰	۲۷۰	۱۸۸
۵	۱۳	۱۲/۵	۳۰۰	۲۷۱	۳۳۷
۶	۱۳	۱۲/۵	۴۵۰	۲۶۷/۵	۴۸۴/۵
۷	۱۳	۱۵	۱۵۰	۲۶۶	۱۸۷
۸	۱۳	۱۵	۳۰۰	۲۶۹	۳۳۶
۹	۱۳	۱۵	۴۵۰	۲۶۷	۴۹۱
۱۰	۱۸	۱۰	۱۵۰	۲۸۹/۵	۱۷۱/۵
۱۱	۱۸	۱۰	۳۰۰	۲۸۶	۳۲۴/۵
۱۲	۱۸	۱۰	۴۵۰	۲۸۶	۴۷۴
۱۳	۱۸	۱۲/۵	۱۵۰	۲۷۸	۱۷۶
۱۴	۱۸	۱۲/۵	۳۰۰	۲۷۶	۳۲۵
۱۵	۱۸	۱۲/۵	۴۵۰	۲۸۲	۴۷۶/۵
۱۶	۱۸	۱۵	۱۵۰	۲۷۷	۱۸۶/۵
۱۷	۱۸	۱۵	۳۰۰	۲۷۷	۳۳۸
۱۸	۱۸	۱۵	۴۵۰	۲۸۱	۴۸۴

جدول ۴: تحلیل واریانس (ANOVA) برای پهنای شیار مستقیم، k_0^{st}

	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
f	۱	۳۵۱/۱۲۵	۳۵۱/۱۲۵	۳۵۱/۱۲۵	۴۵/۵۵	۰/۰۰۳
w_b	۲	۴۴۹/۱۹۴	۴۴۹/۱۹۴	۲۲۴/۵۹۷	۲۹/۱۴	۰/۰۰۴
R	۲	۶/۷۷۸	۶/۷۷۸	۳/۳۸۹	۰/۴۴	۰/۶۷۲
$f \times w_b$	۲	۱۶/۵۸۳	۱۶/۵۸۳	۸/۲۹۲	۱/۰۸	۰/۴۲۳
$f \times R$	۲	۱۰/۳۳۳	۱۰/۳۳۳	۵/۱۶۷	۰/۶۷	۰/۵۶۱
$w_b \times R$	۴	۱۰/۸۸۹	۱۰/۸۸۹	۲/۷۲۲	۰/۳۵	۰/۸۳۱
Error	۴	۳۰/۸۳۳	۳۰/۸۳۳	۷/۷۰۸		
Total	۱۷	۸۷۵/۷۳۶				

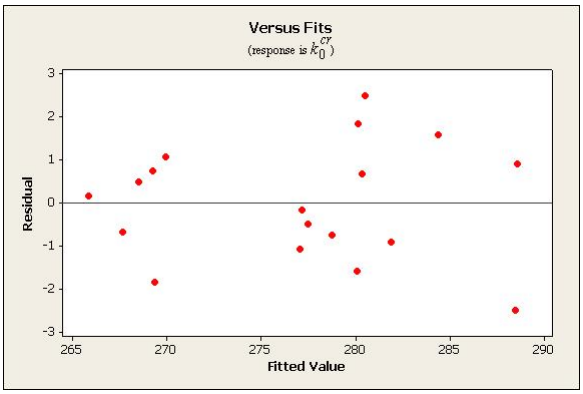
S = ۲/۷۷۶۳۹ | R^2 = %۹۶/۴۸ | R^2 (adj) = %۸۵/۰۴

$$k_0^{cr} = ۲۷۷/۵۰۶ + ۱/۷۶۶۷\, f - ۲/۲۳۳۳\, w_b \quad (۲)$$

جدول ۴ نشان‌می‌دهد که با سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P \leq ۰/۰۵$)، فقط متغیرهای فرکانس جرقه و کشش سیم روی نتایج اثرگذار هستند و متغیر شعاع قوس و اثرات متقابل متغیرها اثر مشخصی روی پاسخ k_0^{cr} ندارند. معادله رگرسیونی ۲ ارتباط بین پاسخ k_0^{cr} با متغیرهای موثر را نشان‌می‌دهد.

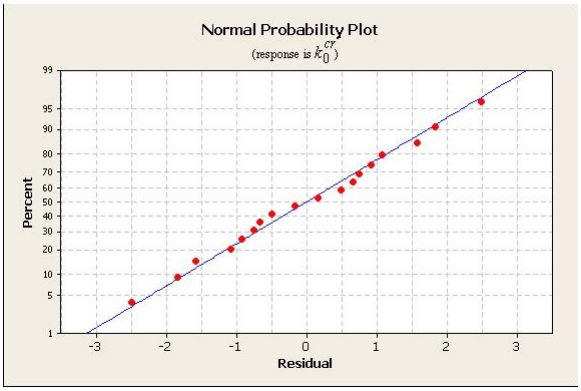
از نمودار شکل ۸ مشخص است که در این مدل شرط مستقل‌بودن مقادیر باقیمانده به خوبی رعایت شده‌است و توزیع مقادیر باقیمانده از روند خاصی پیروی نمی‌نماید. نمودار احتمال نرمال برای پاسخ k_0^{cr} نیز دلالت بر نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده دارد (شکل ۹).

شکل ۱۰ نمودار اثر مستقیم سه متغیر فرکانس جرقه، کشش سیم و شعاع روی پهنای شیار روی قوس گوشه، k_0^{cr} را نشان‌می‌دهد. اثر زیاد دو متغیر کشش سیم و فرکانس و ناچیز بودن اثر شعاع قوس روی مقدار k_0^{cr} مشخص است.

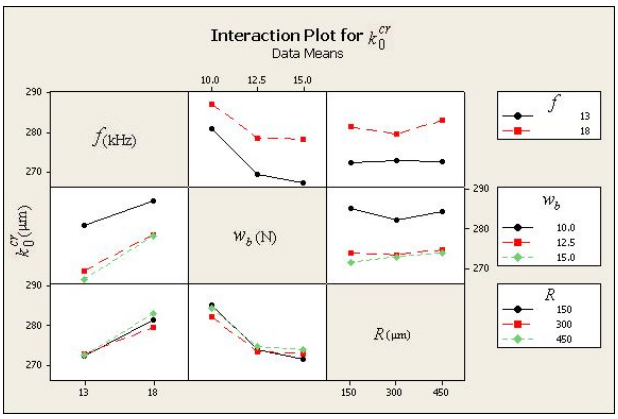


شکل ۸: نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده برای پهنای شیار روی قوس، k_0^{cr}

همچنین این شکل نشان می‌دهد که k_0^{cr} نیز رابطه مستقیم با فرکانس و رابطه عکس با کشش سیم دارد.

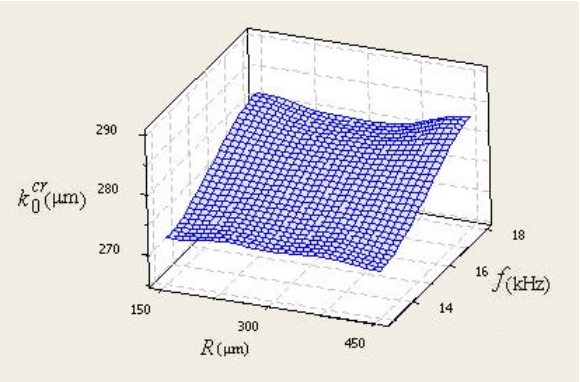


شکل ۹: نمودار احتمال نرمال برای پهنای شیار روی قوس، k_0^{cr}

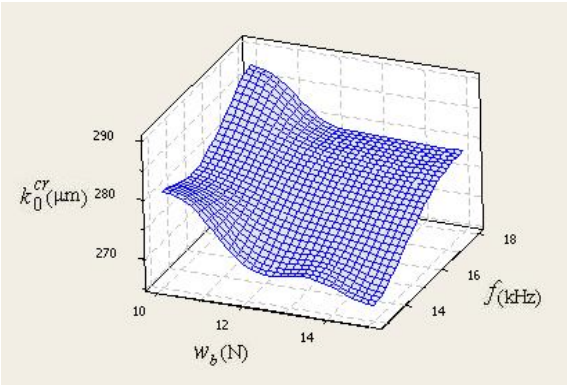


شکل ۱۰: نمودار اثرات متقابل فرکانس جرقه، کشش سیم و شعاع قوس روی پهنای شیار روی قوس، k_0^{cr}

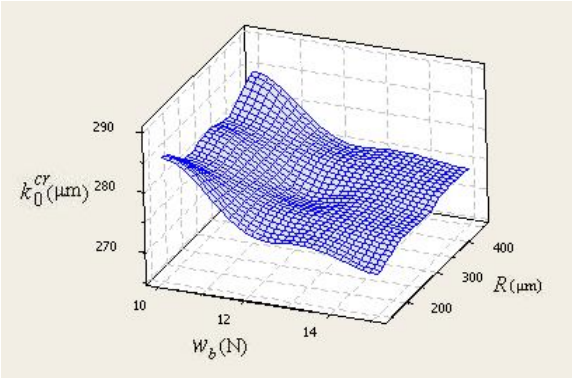
با توجه به نمودار بالا می‌توان گفت کاهش کشش سیم از سطح ۱۰ به ۱۲/۵ اثر زیادی روی مقدار پهنای شیار روی قوس گوشه، k_0^{cr}، دارد. همچنین نتیجه می‌شود افزایش شعاع قوس اثر مهمی روی مقدار پهنای شیار روی قوس گوشه، k_0^{cr}، ندارد.



الف- شکل فضایی خروجی k_0^{cr} به ازای فرکانس جرقه-شعاع قوس



ب- شکل فضایی خروجی k_0^{cr} به ازای فرکانس جرقه-کشش سیم



ج- شکل فضایی خروجی k_0^{cr} به ازای کشش سیم-شعاع قوس

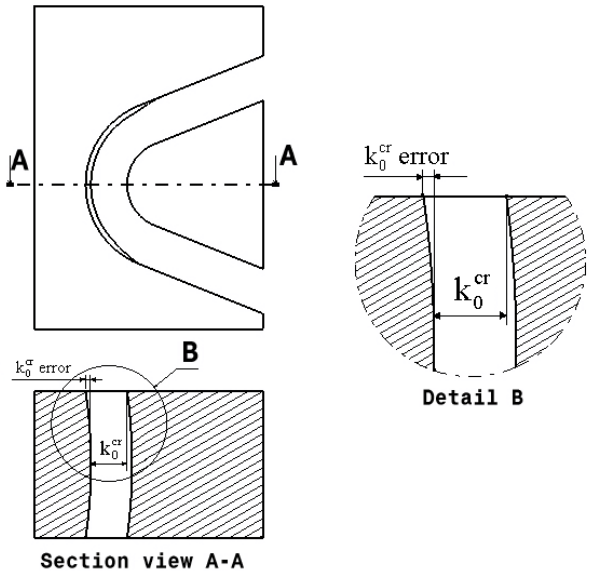
شکل ۱۱: شکل‌های فضایی پهنای شیار روی قوس، k_0^{cr}

شکل‌های فضایی خروجی k_0^{cr} برای فرکانس جرقه-کشش سیم، فرکانس جرقه-شعاع قوس و کشش سیم-شعاع قوس در شکل ۱۱ نشان‌داده شده‌اند. با توجه به نمودارها و نتایج حاصل می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افزایش فرکانس جرقه و کاهش کشش سیم، مقدار k_0^{cr} به بیش‌ترین مقدار می‌رسد.

۵- بحث و بررسی

با انجام آزمایش‌ها و به کمک نمودارهای آماری، اثر متغیرهای فرکانس تخلیه و کشش سیم روی پاسخ k_0^{st}، و اثر متغیرهای فرکانس تخلیه، کشش سیم و شعاع قوس روی پاسخ k_0^{cr} مشخص شد. متغیر فرکانس، بیانگر تعداد جرقه (تخلیه) در واحد زمان است. در دستگاه مورد نظر به دلیل اینکه زمان روشنی پالس ثابت است با افزایش فرکانس تخلیه، زمان خاموشی پالس کاهش‌می‌یابد. بنابراین در فرکانس‌های بالاتر، انرژی بیشتری به صورت جرقه در واحد زمان آزاد و سبب افزایش نرخ باربرداری و انبساط شیار برش می‌شود. تنظیم کشش سیم برای بهبود مستقیم بودن (راستی) و صاف بودن شیار بسیار مهم است. کشش سیم بالاتر، خیز و ارتعاش سیم و در نتیجه پهنای شیار برش را کاهش‌می‌دهد. افزایش شعاع قوس سبب کاهش انحنای مسیر روی قوس می‌شود. در این بخش به کمک نتایج حاصل از آزمایش‌ها و روابط تحلیلی، برخی پدیده‌های اتفاق افتاده در برش مسیر مستقیم و قوس گوشه (مانند گپ ماشین‌کاری، انحراف سیم و خطای ماشینکاری) تجزیه و تحلیل می‌شود.

مقایسه مقادیر k_0^{st} و k_0^{cr} نشان‌می‌دهد که در هر شرایط آزمون، مقدار k_0^{st} کمی از k_0^{cr} بیشتر است. در خشن‌کاری وایرکات به دلیل حجم زیاد باربرداری، نیروی زیادی (ناشی از فشار پلاسما و انفجار آن و انفجار غلاف بخار اطراف آن) تولید شده و به علت درگیر بودن نیمی از محیط سیم، خیز سیم یک پدیده اجتناب‌ناپذیر است. در برش مسیر مستقیم، خیز سیم همواره در راستای برش به سمت عقب است و مولفه‌ای در راستای جانبی شیار ندارد ولی در روی قوس خیز سیم، علاوه بر یک مولفه در راستای مماس بر قوس، مولفه‌ای در راستای شعاعی قوس نیز دارد که جهت این مولفه همواره به سمت داخل قوس است. وجود چنین مولفه‌ای باعث می‌شود سطح دیواره‌ی بیرونی شیار برش محدب و سطح دیواره‌ی داخلی آن مقعر شود. در حالی که در روی مسیر مستقیم به دلیل نبود چنین مولفه‌ای، دیواره‌ی دو طرف شیار کاملا عمودی است. همانگونه که اشاره شد در این مقاله برای اندازه‌گیری پهنای شیار از VMS استفاده شده‌است. این وسیله مطابق شکل ۱۲ در روی دیواره‌ی محدب و مقعر خطای اندازه‌گیری ایجاد می‌نماید. پس اندازه‌ی به‌دست‌آمده برای k_0^{cr} به علت غیر مستقیم بودن دیواره‌ی شیار در روی قوس، کمتر از مقدار واقعی آن است و اختلاف آن با مقدار واقعی وابسته به خیز سیم و ارتفاع قطعه‌کار است. صرف‌نظر از این خطا، پهنای شیار در روی قوس کمتر از پهنای شیار متناظر با آن روی مسیر مستقیم است. دلیل این امر وجود لقی احتمالی راهنماهای سیم و نبود تعادل نیروهای شعاعی وارد بر سیم در روی قوس است. در روی قوس، نیروهای وارد بر سیم آن را به سمت مرکز قوس منحرف می‌نماید. بنابراین در صورت وجود لقی احتمالی راهنماهای سیم، سیم نمی‌تواند مانند مسیر مستقیم در راستای عرضی شیار ارتعاش نماید و درنتیجه ارتعاشات عرضی آن محدود شده و پهنای شیار باریک‌تر می‌شود.



شکل ۱۲: تقعر دیواره‌ی شیار روی قوس و خطای اندازه‌گیری شیار توسط وسایل نوری

۵- ۱- محاسبه گپ ماشین‌کاری روی مسیر مستقیم، g_0^{st}

در روی مسیر مستقیم، به دلیل تعادل نیروهای وارد بر سیم، می‌توان گفت که همواره یک برش متقارن و یکنواخت در راستای عرضی شیار برش در اطراف سیم وجود دارد. بنابراین می‌توان روابط زیر را برای این برش در نظر گرفت:

$$k_0 = 2(r_w + g_0) \qquad (۳)$$

از رابطه‌ی (۳) نتیجه می‌شود که غیر از شعاع سیم برش (r_w) فقط اندازه گپ ماشین‌کاری روی پهنای شیار برش اثر دارد. بنابراین، اگر گپ ماشین‌کاری یکنواخت باشد پهنای شیار برش روی نقاط مختلف مسیر نیز یکنواخت خواهد بود و درنتیجه خطاهای ماشینکاری کاهش خواهدیافت. با توجه به رابطه‌ی (۳) و به کمک پهنای شیار برش روی مسیر مستقیم می‌توان مقدار گپ ماشین‌کاری را برای هر آزمون محاسبه نمود. جدول ۵ مقادیر گپ ماشین‌کاری محاسبه‌شده روی مسیر مستقیم، g_0^{st}، برای آزمون‌های مختلف را نشان‌می‌دهد.

جدول ۵ بیانگر آن است که با افزایش فرکانس جرقه و کاهش کشش سیم مقدار گپ جانبی ماشین‌کاری افزایش یافته است.

۵- ۲- محاسبه‌ی گپ متوسط ماشین‌کاری روی قوس گوشه، $\bar{g}_0^{cr}$

با توجه به مقادیر k_0^{cr} حاصل از آزمایش‌ها و به کمک رابطه‌ی (۳) می‌توان در روی قوس گوشه، گپ متوسط ماشین-کاری، $\bar{g}_0^{cr}$، را محاسبه نمود. جدول ۶ مقادیر $\bar{g}_0^{cr}$ محاسبه شده برای آزمون‌های مختلف را نشان‌می‌دهد.

با توجه به توضیحات بالا پیرامون تقعر و تحدب دیواره‌های شیار در روی قوس و خطای اندازه‌گیری مربوط به آن، با یک ساده‌سازی می‌توان پهنای شیار و گپ ماشین‌کاری در روی قوس گوشه را تقریبا مساوی پهنای شیار و گپ ماشین‌کاری در روی مسیر مستقیم در نظر گرفت.

۵- ۳- محاسبه گپ متغیر ماشین‌کاری برای هر نقطه از محیط سیم در روی قوس

می‌توان گپ ماشین‌کاری روی قوس داخلی و بیرونی را از فرمول‌های زیر محاسبه نمود:

$$g_0^{icr} = \frac{\bar{g}_0^{cr}(R_c + r_w)}{R_c} \approx \frac{g_0^{st}(R_c + r_w)}{R_c} \qquad (۴)$$

$$g_0^{ocr} = \frac{\bar{g}_0^{cr}(R_c - r_w)}{R_c} \approx \frac{g_0^{st}(R_c - r_w)}{R_c} \qquad (۵)$$

۵- ٤- محاسبه میزان انحراف سیم در روی قوس

گپ متغیر ماشین‌کاری در روی قوس باعث برش غیریکنواخت و نامتقارن در اطراف سیم می‌شود. به کمک روابط ۴ و ۵ می‌توان به

جدول ۵: مقادیر g_0^{st} محاسبه شده از k_0^{st}

	f (kHz)	w_b (N)	k_0^{st} mean (μm)	g_0^{st} (μm)
۱	۱۳	۱۰	۲۹۰/۱۶	۲۰/۰۸
۲	۱۳	۱۲/۵	۲۷۴/۸۴	۱۲/۴۲
۳	۱۳	۱۵	۲۷۱/۶۶	۱۰/۸۳
۴	۱۸	۱۰	۲۹۴/۱۶	۲۲/۰۸
۵	۱۸	۱۲/۵	۲۸۷/۱۶	۱۸/۵۸
۶	۱۸	۱۵	۲۸۳/۸۴	۱۶/۹۲

جدول ۶: مقادیر $\bar{g}_0^{cr}$ محاسبه‌شده از k_0^{cr}

	f (kHz)	w_b (N)	R (μm)	$\bar{g}_0^{cr}$ (μm)
۱	۱۳	۱۰	۱۵۰	۱۵/۵
۲	۱۳	۱۰	۳۰۰	۱۴/۲۵
۳	۱۳	۱۰	۴۵۰	۱۶/۵
۴	۱۳	۱۲/۵	۱۵۰	۱۰
۵	۱۳	۱۲/۵	۳۰۰	۱۰/۵
۶	۱۳	۱۲/۵	۴۵۰	۸/۷۵
۷	۱۳	۱۵	۱۵۰	۸
۸	۱۳	۱۵	۳۰۰	۹/۵
۹	۱۳	۱۵	۴۵۰	۸/۵
۱۰	۱۸	۱۰	۱۵۰	۱۹/۷۵
۱۱	۱۸	۱۰	۳۰۰	۱۸
۱۲	۱۸	۱۰	۴۵۰	۱۸
۱۳	۱۸	۱۲/۵	۱۵۰	۱۴
۱۴	۱۸	۱۲/۵	۳۰۰	۱۳
۱۵	۱۸	۱۲/۵	۴۵۰	۱۶
۱۶	۱۸	۱۵	۱۵۰	۱۳/۵
۱۷	۱۸	۱۵	۳۰۰	۱۳/۵
۱۸	۱۸	۱۵	۴۵۰	۱۵/۵

ترتیب گپ ماشین‌کاری در روی قوس داخلی (محدب) و خارجی (مقعر) مسیر را محاسبه نمود. با توجه به شکل ۲، در صورتی‌که سیم از مسیر برنامه‌نویسی‌شده در روی قوس منحرف نشود باید رابطه‌ی (۶) بین مقادیر افست، شعاع سیم، گپ ماشین‌کاری، شعاع داخلی و شعاع برنامه‌نویسی‌شده‌ی مسیر برقرار باشد:

$$of_0 = r_w + g_0^{icr} + R_i - R \qquad (۶)$$

نتایج حاصل از آزمایش‌ها بیانگر آن است که در برش قوس گوشه رابطه‌ی (۶) برقرار نیست. این نتایج نشان می‌دهند که در برش قوس گوشه، سیم به سمت قوس داخلی مسیر (قوس محدب) منحرف می‌شود. بنابراین در برش قوس گوشه، علاوه بر خطای ناشی از گپ متغیر ماشین‌کاری، خطای انحراف سیم به سمت قوس محدب نیز وجود دارد. این دو عامل سبب باربرداری بیشتر از روی قوس محدب و باربرداری کمتر از روی قوس مقعر می‌شود. برای تولید قوس‌های محدب یا مقعر مطلوب رابطه‌ی (۶) باید به‌ترتیب به شکل رابطه‌ی (۷) یا (۸) اصلاح شود:

$$of_0 = r_w + g_0^{icr} + R_i - R + d^{cr} \qquad (۷)$$

$$of_0 = r_w + g_0^{ocr} + R - R_o - d^{cr} \qquad (۸)$$

d^{cr} برابر با میزان انحراف سیم به سمت قوس داخلی مسیر (قوس محدب) در راستای شعاعی است. به کمک روابط ۴ و ۷ و با استفاده از مقادیر g_0^{st} و R_i حاصل از آزمایش‌ها می‌توان برای هر آزمون مقدار d^{cr} در روی قوس محدب را محاسبه نمود. همچنین کل خطای ماشینکاری قوس محدب گوشه نسبت به مسیر مستقیم از رابطه‌ی (۹) و کل خطای ماشینکاری قوس مقعر گوشه نسبت به مسیر مستقیم از رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌شود:

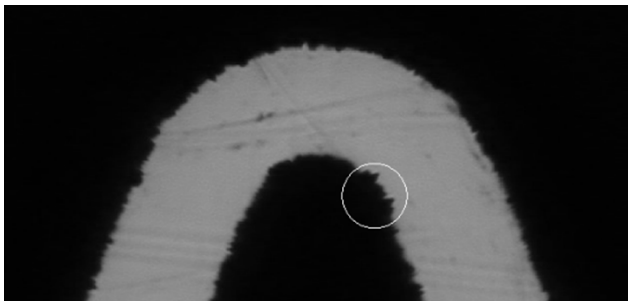
$$E^{cr} = d^{cr} + (g_0^{icr} - g_0^{st}) \qquad (۹)$$

$$E^{cr} = d^{cr} + (g_0^{st} - g_0^{ocr}) \qquad (۱۰)$$

جدول ۷ مقادیر g_0^{icr}، g_0^{ocr}، d^{cr} و E^{cr} حاصل از شرایط مختلف آزمون در روی قوس محدب را نشان‌می‌دهد. با داشتن مقدار E^{cr}، مسیر سیم برای برش قوس‌ها را می‌توان اصلاح نمود.

۵- ۵- انباشتگی مواد در محل خروج سیم از قوس

با توجه به توضیحات بالا، سیم هنگام ورود به قوس به اندازه‌ی خیز سیم محاسبه شده به سمت داخل قوس منحرف می‌شود. این انحراف به تدریج در مقداری از طول ابتدایی قوس انجام می‌شود سپس سیم قوس مسیر را در همان شعاع کوچکتر تا انتهای قوس می‌پیماید و بعد از خروج از قوس به تدریج در مقداری از طول ابتدایی مسیر بعد از قوس به مسیر برنامه‌ریزی شده‌ی خود باز می‌گردد. در ماشینکاری قوس‌ها، هنگام خروج مرکز سیم از روی قوس، نیمه‌ی عقبی سیم هنوز روی قوس قرار دارد. در روی قوس‌ها با شعاع کوچک، به علت نزدیک بودن شعاع قوس و شعاع سیم این نیمه مقدار قابل توجهی از مسیر قوس را پوشش می‌دهد. در همین زمان نیمه جلویی سیم که در روی مسیر مستقیم قرار دارد تمایل دارد به مسیر اصلی بازگردد و اختلاف توزیع سرعت که قبلا روی محیط آن وجود داشت از بین می‌رود و همه نقاط آن سرعت یکسانی می‌یابند. این اختلاف وضعیت نیمه جلویی و عقبی سیم باعث می‌شود که مقداری انباشتگی مواد در هنگام خروج از قوس و در انتهای قوس دیده شود. لقی راهنماهای سیم هم این اثر را بسیار تشدید می‌نماید. این اثر در قوس‌های کوچک به وضوح دیده می‌شود (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: انباشتگی مواد در محل خروج سیم از قوس

جدول ۷: مقادیر g_0^{icr}، g_0^{ocr}، d^{cr} و E^{cr} محاسبه شده برای شرایط مختلف آزمون

	f (kHz)	w_b (N)	R (μm)	g_0^{st} (μm)	g_0^{icr} (μm)	g_0^{ocr} (μm)	d^{cr} (μm)	E^{cr} (μm)
۱	۱۳	۱۰	۱۵۰	۲۰/۰۸	۲۷/۲۹	۱۲/۸۷	۲۳/۷۱	۳۰/۹۲
۲	۱۳	۱۰	۳۰۰	۲۰/۰۸	۲۵/۱۲	۱۵/۰۴	۲۴/۳۸	۲۹/۴۲
۳	۱۳	۱۰	۴۵۰	۲۰/۰۸	۲۳/۹۵	۱۶/۲۱	۲۶/۰۵	۲۹/۹۲
۴	۱۳	۱۲/۵	۱۵۰	۱۲/۴۲	۱۶/۸۸	۷/۹۶	۱۸/۱۲	۲۲/۵۸
۵	۱۳	۱۲/۵	۳۰۰	۱۲/۴۲	۱۵/۵۴	۹/۳	۲۰/۴۶	۲۳/۵۸
۶	۱۳	۱۲/۵	۴۵۰	۱۲/۴۲	۱۴/۸۲	۱۰/۰۲	۲۳/۶۸	۲۶/۰۸
۷	۱۳	۱۵	۱۵۰	۱۰/۸۳	۱۴/۷۲	۶/۹۴	۲۱/۲۸	۲۵/۱۷
۸	۱۳	۱۵	۳۰۰	۱۰/۸۳	۱۳/۵۵	۸/۱۱	۲۳/۴۵	۲۶/۱۷
۹	۱۳	۱۵	۴۵۰	۱۰/۸۳	۱۲/۹۲	۸/۷۴	۱۹/۰۸	۲۱/۱۷
۱۰	۱۸	۱۰	۱۵۰	۲۲/۰۸	۳۰/۰۱	۱۴/۱۵	۲۱/۴۹	۲۹/۴۲
۱۱	۱۸	۱۰	۳۰۰	۲۲/۰۸	۲۷/۶۲	۱۶/۵۴	۲۰/۸۸	۲۶/۴۲
۱۲	۱۸	۱۰	۴۵۰	۲۲/۰۸	۲۶/۳۴	۱۷/۸۲	۲۲/۶۶	۲۶/۹۲
۱۳	۱۸	۱۲/۵	۱۵۰	۱۸/۵۸	۲۵/۲۵	۱۱/۹۱	۲۱/۷۵	۲۸/۴۲
۱۴	۱۸	۱۲/۵	۳۰۰	۱۸/۵۸	۲۳/۲۴	۱۳/۹۲	۲۴/۷۶	۲۹/۴۲
۱۵	۱۸	۱۲/۵	۴۵۰	۱۸/۵۸	۲۲/۱۶	۱۵	۲۴/۳۴	۲۷/۹۲
۱۶	۱۸	۱۵	۱۵۰	۱۶/۹۲	۲۳	۱۰/۸۴	۱۳/۵	۱۹/۵۸
۱۷	۱۸	۱۵	۳۰۰	۱۶/۹۲	۲۱/۱۷	۱۲/۶۷	۱۳/۸۳	۱۸/۰۸
۱۸	۱۸	۱۵	۴۵۰	۱۶/۹۲	۲۰/۱۸	۱۳/۶۶	۱۸/۸۲	۲۲/۰۸

۶- محاسبه‌ی نرخ باربرداری به کمک پهنای شیار

به کمک مقادیر پهنای شیار روی مسیر مستقیم و قوس گوشه می‌توان نرخ بار برداری[16] بر حسب میلیمتر مکعب بر دقیقه را برای مسیر مستقیم و قوس گوشه محاسبه نمود [۱۱]:

$$\mathrm{MRR}^{st} = k_0^{st} v h \quad (۱۱)$$

$$\mathrm{MRR}^{cr} = k_0^{cr} v h \quad (۱۲)$$

v و h به ترتیب برابر سرعت خطی سیم در روی مسیر مستقیم (یا قوس مرکزی گوشه) و ضخامت قطعه است.

۷- نتیجه‌گیری

شکاف واقعی برش روی مسیر مستقیم و قوس گوشه و نیز انحراف سیم روی قوس و گپ کناری در خشن‌کاری وایرکات و اثر متغیرهای فرکانس تخلیه، کشش سیم و شعاع قوس روی آنها بررسی شد. نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

۱) افزایش فرکانس تخلیه و کاهش کشش سیم، پهنای شیار برش و در نتیجه گپ جانبی ماشین‌کاری را در هر دو حالت (روی مسیر مستقیم و قوس گوشه) افزایش‌می‌دهد. در محدوده‌ی بررسی‌شده، تغییر شعاع قوس اثرقابل توجهی روی پهنای شیار برش ندارد.

۲) تقعر دیواره‌ی قوس داخلی و تحدب دیواره‌ی قوس بیرونی مسیر در روی قوس گوشه، در اندازه‌گیری پهنای شیار خطا ایجاد می‌نماید.

۳) گپ ماشین‌کاری برای نقاط مختلف محیط سیم در روی قوس متفاوت است چرا که هنگام حرکت سیم در روی قوس، این نقاط سرعت خطی متفاوت دارند.

۴) در برش قوس گوشه، علاوه بر خطای ناشی از گپ متغیر ماشین‌کاری، خطای انحراف سیم به سمت قوس محدب نیز وجود دارد. با توجه به آزمایش‌ها مقادیر تجربی انحراف سیم و خطای ماشینکاری قوس محدب گوشه برای شرایط مختلف آزمون محاسبه شده است. همچنین انباشتگی مواد در خروج از مسیر قوس روشن می‌شود. بررسی‌ها نشان‌می‌-دهند که پهنای شیار ایجادشده در روی مسیر مستقیم و قوس گوشه چندان تفاوتی ندارند. بنابراین خطای ماشینکاری قوس گوشه، ناشی از تغییرات پهنای شیار نیست.

۵) با داشتن مجموع مقدار خطای ناشی از گپ نامساوی در اطراف سیم و میزان انحراف ناشی از خیز سیم می‌توان مسیر برش را اصلاح نمود تا مقدار قوس‌های محدب و مقعر روی گوشه‌های انحنادار اصلاح شوند.

16 Material Removal Rate (MRR)

۸- فهرست نشانه ها و اختصارات

نشانه	تعریف انگلیسی	تعریف فارسی	واحد
Adj MS	Adjusted mean squares	میانگین مربعات تعدیل شده	-
Adj SS	Adjusted sum of squares	مجموع مربعات تعدیل شده	-
ANOVA Coef	Analysis of Variance Coefficient of factor and interaction factor in regression model	آنالیز واریانس ضریب فاکتورهای رگرسیون	-
d^{cr}	Wire path deviation in curved corner	انحراف سیم در روی قوس گوشه	μm
DF	Degree of freedom	درجه آزادی	-
DOE	Design of experiments	طراحی آزمایش‌ها	-
E^{cr}	Residual material error in a curved corner	خطای بار باقیمانده در روی قوس گوشه	μm
F	F-test value	مقدار آماره‌ی F	-
f	Number of sparks per second	فرکانس تخلیه	$spark/sec$
g	Spark gap size	گپ ماشینکاری	μm
g_0	Spark gap size in the roughing pass	گپ ماشینکاری در مرحله خشن‌کاری	μm
$\overline{g}_0^{cr}$	Average gap size between wire and workpiece at a curved corner	گپ متوسط ماشینکاری بین سیم و قطعه‌کار روی قوس	μm
g_0^{st}	Straight path lateral gap size	گپ کناری ماشینکاری روی مسیر مستقیم	μm
g_0^{icr}	Inner curved corner gap size	گپ ماشینکاری در ناحیه قوس داخلی مسیر	μm
g_0^{ocr}	Outer curved corner gap size	گپ ماشینکاری در ناحیه قوس بیرونی مسیر	μm
k_0	Machining width in a roughing pass	پهنای ماشین‌کاری در مرحله خشن‌کاری	μm
k_0^{cr}	Cutting slot in roughing pass on straight path	پهنای شیار برش در مرحله‌ی خشن‌کاری روی مسیر مستقیم	μm
k_0^{st}	Cutting slot in roughing pass on curved corner	پهنای شیار برش در مرحله‌ی خشن‌کاری روی قوس گوشه	μm
of_0	Wire offset in roughing pass	افست خشن‌کاری	μm
P	Probability value	مقدار احتمال	-
r_w	Wire radius	شعاع سیم	μm
R	Target corner radius	شعاع هدف گوشه	μm
R_i	Path inner corner radius	شعاع داخلی مسیر (قوس محدب مسیر)	μm
R_c	Path central corner radius	شعاع مرکزی مسیر	μm
R_o	Path outer corner radius	شعاع بیرونی مسیر (قوس مقعر مسیر)	μm
R^2	R-squared	ضریب تعیین	-
R^2 (adj)	Adjusted R-squared: correlation coefficient	ضریب تعیین تعدیل‌شده	-
S	Root mean square	ریشه میانگین مربعات	-
Seq. SS	Sequential sum of squares	مجموع مربعات دنباله‌ای	-
SE Coef.	standard errors for coefficients	خطای استاندارد ضرایب	-
T	T-test value	مقدار آماره‌ی T	-
v	Feed speed	سرعت مماس بر مسیر حرکت	m/min
w_b	Wire tension	کشش سیم	N

۹- مراجع

[1] 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.

[2] 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.33–8, 2003.

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

[4] Dodun, O., Gonçalves-Coelho, A. M., Slătineanu, L., Nagîţ, 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

[5] 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.

[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, No. 5, pp. 413–420, 2004.

[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., De Lacalle, 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, No. 1–2: pp. 574–579, 2007.

[9] Han, F., Zhang, J., Soichiro, I., "Corner error simulation of rough cutting in wire EDM", Precis Eng, Vol 31, No. 4: pp. 331–336, 2007.

[10] 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.

[11] Tosun, N., Cogun, C., Tosun, G., "A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on Taguchi method", Journal of Materials Processing Technology, Vol 152, pp. 316–322, 2004.

[12] Yang, C. T., Song, S. L., Yan, B. H., Huang, F. Y., "Improving machining performance of wire electrochemical discharge machining by adding SiC abrasive to electrolyte", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol 46, pp. 2044–2050, 2006.

[13] Shichun, D., Xuyang, C., Dongbo, W., Zhenlong, W., Guanxin, C., Yuan, L., "Analysis of kerf width in micro-WEDM", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol 49, pp. 788–792, 2009.

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

[15] User manual ROBOFIL 200, Charmilles Technologies, Switzerland, 1989.

[16] Montgomery, D. C., Design and analysis of experiments, Wiley, New York, 5th Ed. 2001.

[17] Chelladurai, H., Jain, V. K., Vyas, N. S., "Development of a cutting tool condition monitoring system for high speed turning operation by vibration and strain analysis", Int J Adv Manuf Technol, Vol 37, pp. 471–485, 2008.

[18] Pradhan, M. K., Biswas, C. K., "Neuro-fuzzy and neural network-based prediction of various responses in electrical discharge machining of AISI D2 steel", Int J Adv Manuf Technol, Vol 50, pp. 591–610, 2010.

[19] Jain, V. K., Mote, R. G., "On the temperature and specific energy during electro discharge diamond grinding (EDDG)", Int J Adv Manuf Technol, Vol 26, pp. 56–67, 2005.