



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 Journal of Science & Research  
(Mechanical Engineering)  
(ASJR-ME)

## تحلیل اثر متغیرهای خشن کاری و ایرکات بر پهنای شیار و گپ ماشین کاری مسیر مستقیم و قوس گوشه

حمید آبیاری فیروزآبادی<sup>۱</sup>، امیر عبدالله<sup>۲</sup>، جمشید پرویزیان<sup>۳\*</sup>

- 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 ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی (وایرکات)، دقیق نبودن هندسه ی برش گوشه و قوس گوشه است. دستیابی به شکل هندسی صحیح و دقت ابعادی بالا می تواند برتری این فرآیند را استوار نماید. مطالعه ی شیار برش می تواند به تحلیل و پیش بینی خطا در برش وایرکات کمک نماید. در این تحقیق، شکاف واقعی برش روی مسیر مستقیم و قوس گوشه در مرحله ی خشن کاری بررسی شده است. آزمایش ها بر اساس سه متغیر فرکانس تخلیه، کشش سیم و شعاع قوس توسط روش فاکتوریل کامل طراحی شده اند. به کمک تحلیل های آماری اثر این متغیرها بر پهنای شیار برش روی مسیر مستقیم و قوس گوشه ارزیابی شده است. مقادیر تجربی گپ ماشین کاری روی مسیر مستقیم و گپ متوسط ماشین کاری روی قوس گوشه برای شرایط مختلف آزمون به دست آمده اند. تقعر دیواره ی قوس داخلی و تحدب دیواره ی قوس بیرونی مسیر در روی قوس گوشه، در اندازه گیری پهنای شیار خطا ایجاد می نماید. در محل خروج سیم از مسیر قوس انباشتگی مواد دیده می شود. با توجه به آزمایش ها و محاسبه ی گپ متغیر ماشین کاری روی قوس گوشه، مقادیر تجربی انحراف سیم و خطای ماشین کاری قوس محدب گوشه محاسبه می شوند.

### کلمات کلیدی:

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

## ۱- مقدمه

فشار پاشش دی الکتریک، 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 دی الکتریک روی پهنای شیار به روش تاگوچی نشان می‌دهد که از میان این متغیرها، ولتاژ مدار باز مؤثرترین است [۱۱]. در حالی که تحقیق روی ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی سیمی<sup>۸</sup> با کار تجربی نشان می‌دهد که افزایش کشش، باعث راستی<sup>۹</sup> شیار و افزایش فرکانس منبع قدرت، باعث یکنواختی شیار برش می‌شود [۱۲]. با تشکیل یک مدل ارتعاش عرضی سیم میکرو و ایرکات 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  $\pm 2$  دقیقه سگ‌زده 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 و ایرکات تنظیم و بسته شدند. همه‌ی آزمایش‌های این تحقیق به وسیله‌ی ماشین و ایرکات شارمیلز روبوفیل ۱۲۰۰<sup>۱۰</sup> و با سیم SW25X (با قطر ۰/۲۵ میلی‌متر) 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<sup>۱۱</sup> در شرایط اتاق تمیز استفاده شد [۱۴]. برای اندازه‌گیری پهنای شیار از سامانه اندازه‌گیری ویدیویی VMS<sup>۱۲</sup> مدل ARCS در شرایط اتاق تمیز استفاده شده‌است.

در ماشین و ایرکات 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<sup>۱۳</sup> برای برش یک مرحله‌ای خشن کاری برای فولاد به ضخامت

از بین روش‌های ماشینکاری غیرستتی، 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 تبدیل نموده 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<sup>۱</sup> آن می‌شوند. به‌هرحال، یکی از متغیرهایی که اثر مستقیم روی دقت ساخت قطعات به وسیله وایرکات دارد تغییر شکل سیم<sup>۲</sup> است. این عامل در مرحله‌ی خشن کاری 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 جزئی<sup>۳</sup>). در نتیجه 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<sup>۴</sup>). در این حالت سیم تنها در جهت معکوس جهت برش خم می‌شود [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 قرار گرفته 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 کاهش دهند. نتایج این تحقیقات در مراجع [۵-۱۰] آورده شده‌اند. همان‌گونه که گفته شد گوشه‌ها بر حسب شکل هندسی به گوشه‌های تیز<sup>۵</sup>، گوشه‌های بزرگ-شعاع<sup>۶</sup> و گوشه‌های کوچک-شعاع<sup>۷</sup> 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 بررسی شده، 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 و ایرکات 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،

<sup>1</sup> Wire-lag

<sup>2</sup> Wire deflection

<sup>3</sup> Partial discharge

<sup>4</sup> Whole front surface discharge

<sup>5</sup> Sharp corner

<sup>6</sup> Large-radius corner

<sup>7</sup> Small-radius corner

<sup>8</sup> Wire electrochemical discharge machining

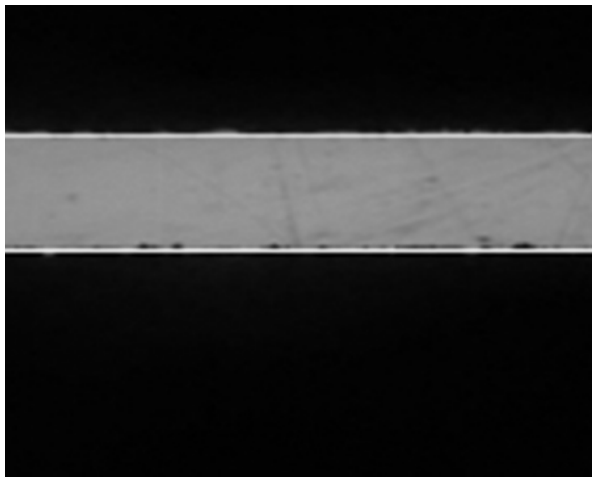
<sup>9</sup> Straightness

<sup>10</sup> Charmilles Robofil200

<sup>11</sup> Peacock

<sup>12</sup> Video Measuring System (VMS)

<sup>13</sup> Charmilles Technologies



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

جدول ۲ تحلیل واریانس به دست آمده برای پاسخ  $k_0^{st}$  با سطح اطمینان<sup>۱۴</sup> ۹۵ درصد را نشان می‌دهد.

نمودار شکل ۲ نشان می‌دهد که مقادیر باقیمانده به طور تصادفی<sup>۱۵</sup> توزیع شده‌اند و از روند خاصی پیروی نمی‌نمایند و در نتیجه شرط مستقل بودن مقادیر باقیمانده به خوبی رعایت شده است. نمودار احتمال نرمال برای پاسخ  $k_0^{st}$  در شکل ۳ دلالت بر نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده دارد. نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده لازمی تحلیل واریانس است.

جدول ۲ نشان می‌دهد که با سطح اطمینان ۹۵ درصد ( $P < 0.05$ ), 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 نشان می‌دهد.

$$k_0^{st} = 353.52 - 2.1183 f \quad (1)$$

$$- 7.947 w_b + 0.3267 f \times w_b$$

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 مسیبر 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. از این رو، برای انجام آزمایش‌ها از این روش استفاده شده است.

### ۳- پهنای شیار برش روی مسیبر مستقیم

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

جدول ۱: پهنای شیار در مرحله خشن روی مسیبر مستقیم

f (kHz)	$w_b$ (N)	$k_0^{st}$ ( $\mu\text{m}$ )				
		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

<sup>۱۴</sup> Confidence level

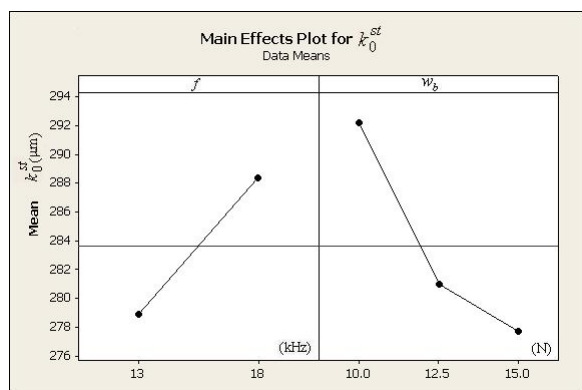
<sup>۱۵</sup> Random

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

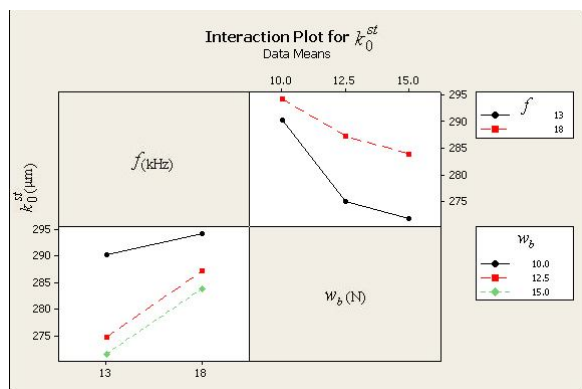
	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
$f$	۱	۴۰۶/۱۲	۴۰۶/۱۲	۴۰۶/۱۲	۷۱/۱۵	۰/۰۰۰
$w_b$	۲	۶۸۶/۱۹	۶۸۶/۱۹	۳۴۳/۱	۶۰/۱	۰/۰۰۰
$f \times w_b$	۲	۶۸/۰۸	۶۸/۰۸	۳۴/۰۴	۵/۹۶	۰/۰۱۶
Error	۱۲	۶۸/۵	۶۸/۵	۵/۷۱		
Total	۱۷	۱۲۲۸/۹				

S = ۲/۳۸۹۲۱      R<sup>2</sup> = %۹۴/۴۳      R<sup>2</sup> (adj) = %۹۲/۱

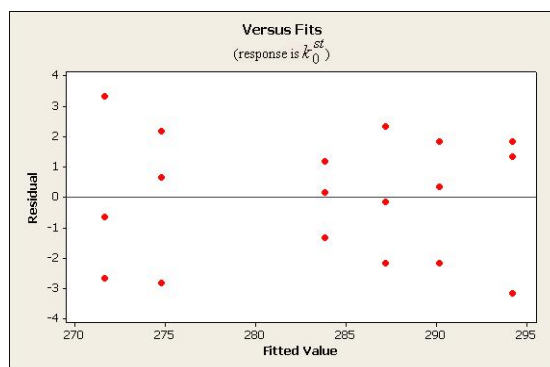
افزایش پهنای شیار داشته است. همچنین در سطح پایین فرکانس جرقه، کاهش کشش سیم از سطح ۱۲/۵ N به سطح ۱۰ N باعث افزایش ناگهانی پهنای شیار شده است.



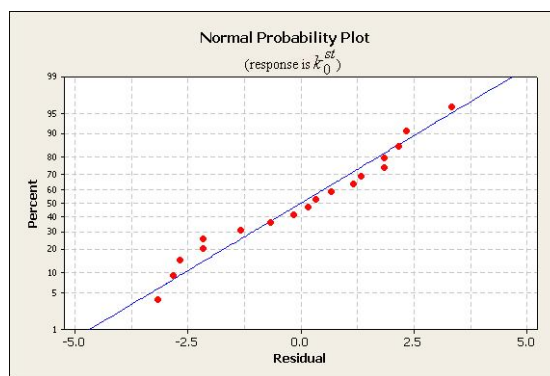
شکل ۴: نمودار تاثیر تغییر فرکانس جرقه (در کشش و کشش سیم (در فرکانس جرقه ۱۳ kHz) بر روی پهنای شیار مستقیم،  $k_0^{st}$



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

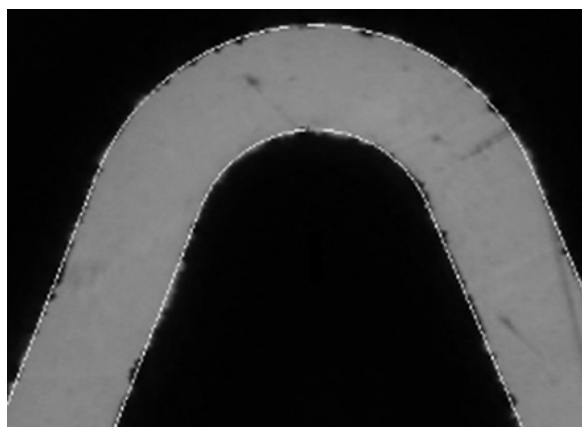


شکل ۲: نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده برای پهنای شیار مستقیم،  $k_0^{st}$



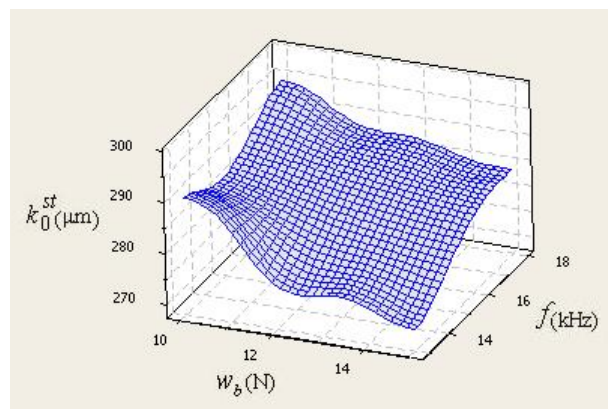
شکل ۳: نمودار احتمال نرمال برای پهنای شیار مستقیم،  $k_0^{st}$

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



شکل ۷: شیار ایجاد شده روی قوس گوشه

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 نشان می‌دهد. جدول ۳ مقادیر پهنای شیار برش روی قوس گوشه،  $k_0^{cr}$ ، و شعاع داخلی مسیر،  $R_i$ ، برای آزمون‌های مختلف متغیرها را نشان می‌دهد. با تجزیه و تحلیل داده‌های بالا، جدول تحلیل واریانس ۴ برای پاسخ حاصل شده است.



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

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.

#### ۴- پهنای شیار برش روی قوس

در این قسمت اثر متغیرهای فرکانس جرقه، کشش سیم و شعاع قوس

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

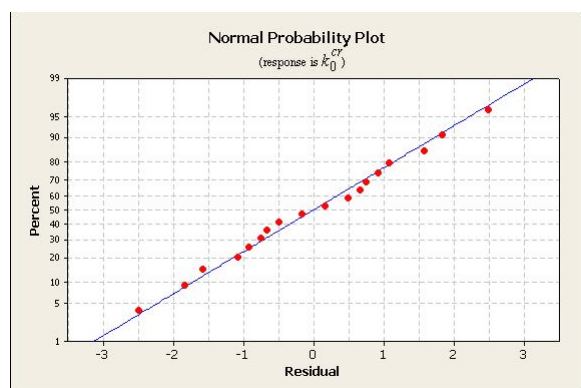
	$f$ (kHz)	$w_b$ (N)	$R$ ( $\mu m$ )	$k_0^{cr}$ ( $\mu m$ )	$R_i$ ( $\mu m$ )
۱	۱۳	۱۰	۱۵۰	۲۸۱	۱۷۲
۲	۱۳	۱۰	۳۰۰	۲۷۸/۵	۳۲۳/۵
۳	۱۳	۱۰	۴۵۰	۲۸۳	۴۷۳
۴	۱۳	۱۲/۵	۱۵۰	۲۷۰	۱۸۸
۵	۱۳	۱۲/۵	۳۰۰	۲۷۱	۳۳۷
۶	۱۳	۱۲/۵	۴۵۰	۲۶۷/۵	۴۸۴/۵
۷	۱۳	۱۵	۱۵۰	۲۶۶	۱۸۷
۸	۱۳	۱۵	۳۰۰	۲۶۹	۳۳۶
۹	۱۳	۱۵	۴۵۰	۲۶۷	۴۹۱
۱۰	۱۸	۱۰	۱۵۰	۲۸۹/۵	۱۷۱/۵
۱۱	۱۸	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،  $k_0^{st}$

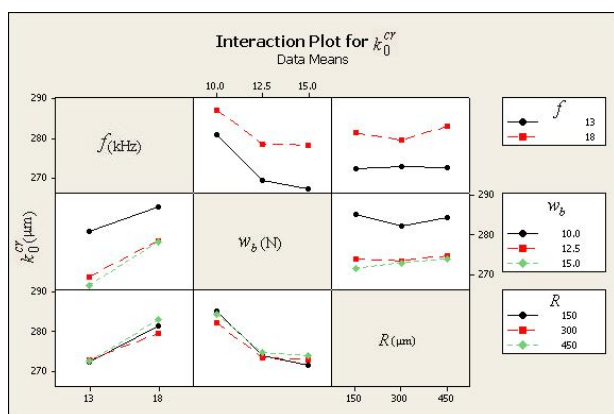
	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
$f$	۱	۳۵۱/۱۲۵	۳۵۱/۱۲۵	۳۵۱/۱۲۵	۴۵/۵۵	۰/۰۰۳
$w_b$	۲	۴۴۹/۱۹۴	۴۴۹/۱۹۴	۲۲۴/۵۹۷	۲۹/۱۴	۰/۰۰۴
$R$	۲	۶/۷۷۸	۶/۷۷۸	۳/۳۸۹	۰/۴۴	۰/۶۷۲
$f \times w_b$	۲	۱۶/۵۸۳	۱۶/۵۸۳	۸/۲۹۲	۱/۰۸	۰/۴۲۳
$f \times R$	۲	۱۰/۳۳۳	۱۰/۳۳۳	۵/۱۶۷	۰/۶۷	۰/۵۶۱
$w_b \times R$	۴	۱۰/۸۸۹	۱۰/۸۸۹	۲/۷۲۲	۰/۳۵	۰/۸۳۱
Error	۴	۳۰/۸۳۳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

S = ۲/۷۷۶۳۹      R<sup>2</sup> = %۹۶/۴۸      R<sup>2</sup> (adj) = %۸۵/۰۴

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،  $k_0^{cr}$



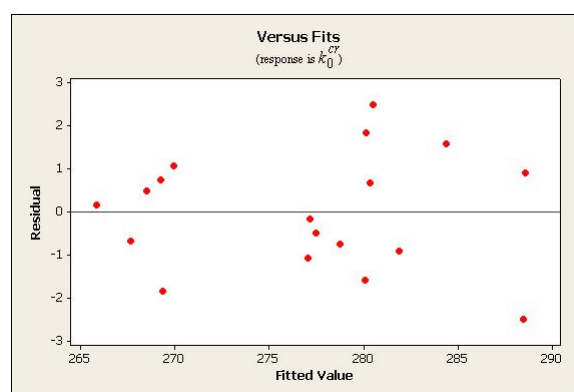
شکل ۱۰: نمودار اثرات متقابل فرکانس جرقه، کشش سیم و شعاع قوس روی پهنای شیار روی قوس،  $k_0^{cr}$

$$k_0^{cr} = 277/506 + 1/7667 f - 2/2333 w_b \quad (2)$$

جدول ۴ نشان می‌دهد که با سطح اطمینان ۹۵ درصد ( $P \leq 0/05$ )، 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 نشان می‌دهد.

از نمودار شکل ۸ مشخص است که در این مدل شرط مستقل بودن مقادیر باقیمانده به خوبی رعایت شده است 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 نشان می‌دهد. 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،  $k_0^{cr}$

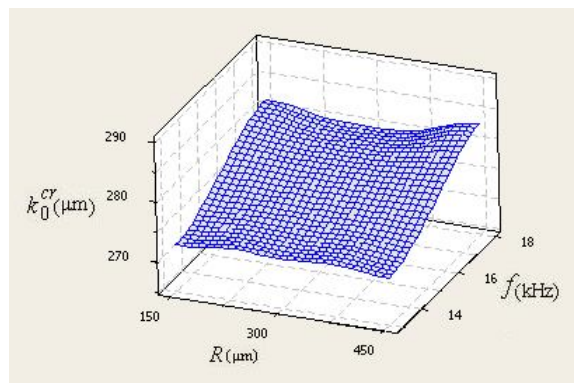
### ۵- بحث و بررسی

با انجام آزمایش‌ها و به کمک نمودارهای آماری، اثر متغیرهای فرکانس تخلیه و کشش سیم روی پاسخ  $k_0^{sf}$ ، 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 کاهش می‌یابد. 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 کاهش می‌دهد. 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،

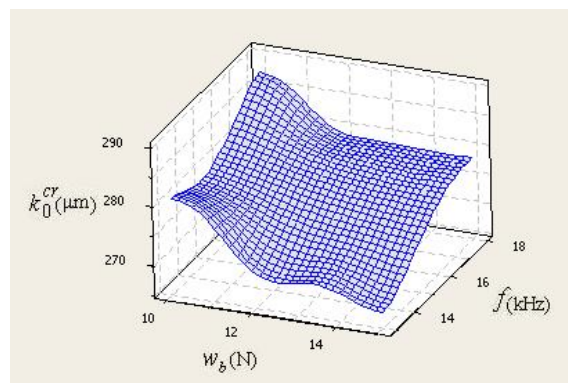
انحراف سیم و خطای ماشین‌کاری) تجزیه و تحلیل می‌شود.

مقایسه مقادیر  $k_0^{cr}$  و  $k_0^{sf}$  نشان می‌دهد که در هر شرایط آزمون، مقدار  $k_0^{sf}$  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 کاملاً عمودی است. همانگونه که اشاره شد در این مقاله برای اندازه‌گیری پهنای شیار از VMS استفاده شده است. 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 قطعه کار 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 در نتیجه ارتعاشات عرضی آن محدود شده و پهنای شیار باریک‌تر می‌شود.

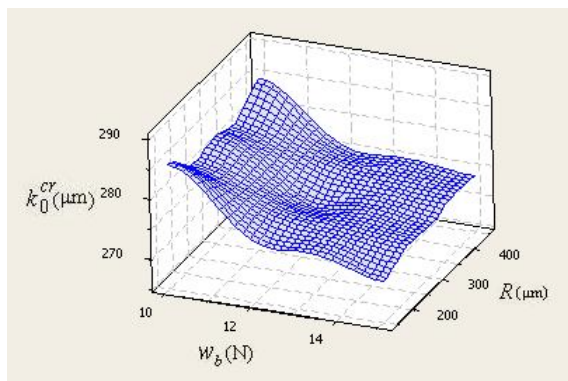
با توجه به نمودار بالا می‌توان گفت کاهش کشش سیم از سطح ۱۰ به ۱۲/۵ اثر زیادی روی مقدار پهنای شیار روی قوس گوشه،  $k_0^{cr}$ ، دارد. همچنین نتیجه می‌شود افزایش شعاع قوس اثر مهمی روی مقدار پهنای شیار روی قوس گوشه،  $k_0^{cr}$ ، ندارد.



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 نشان داده 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.

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

۵-۲- محاسبه‌ی گپ متوسط ماشین کاری 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 نشان می‌دهد.

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

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

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

$$g_0^{icr} = \frac{\bar{g}_0^{cr} (R_c + r_w)}{R_c} \quad (4)$$

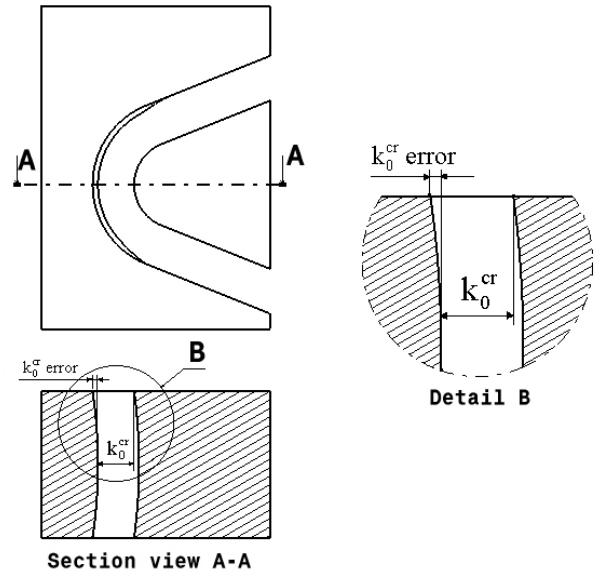
$$\approx \frac{g_0^{st} (R_c + r_w)}{R_c}$$

$$g_0^{ocr} = \frac{\bar{g}_0^{cr} (R_c - r_w)}{R_c} \quad (5)$$

$$\approx \frac{g_0^{st} (R_c - r_w)}{R_c}$$

۵-۴- محاسبه میزان انحراف سیم در روی قوس

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



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

۵-۱- محاسبه گپ ماشین کاری 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:

$$k_0 = 2(r_w + g_0) \quad (3)$$

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

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

	$f$ (kHz)	$w_b$ (N)	$k_0^{st}$ mean ( $\mu m$ )	$g_0^{st}$ ( $\mu m$ )
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  $\bar{g}_0^{cr}$  محاسبه شده از  $k_0^{cr}$

	$f$ (kHz)	$w_b$ (N)	$R$ ( $\mu\text{m}$ )	$\bar{g}_0^{cr}$ ( $\mu\text{m}$ )
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

$d^{cr}$  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  $R_i$  و  $g_0^{st}$  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:

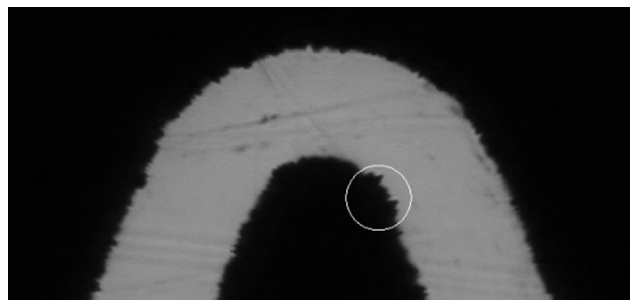
$$E^{cr} = d^{cr} + (g_0^{icr} - g_0^{st}) \quad (9)$$

$$E^{cr} = d^{cr} + (g_0^{st} - g_0^{ocr}) \quad (10)$$

جدول ۷ مقادیر  $g_0^{icr}$ ،  $g_0^{ocr}$ ،  $d^{cr}$  و  $E^{cr}$  حاصل از شرایط مختلف آزمون در روی قوس محدب را نشان می‌دهد. 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 قبلاً 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

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

$$of_0 = r_w + g_0^{icr} + R_i - R \quad (6)$$

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 به ترتیب به شکل رابطه‌ی (۷) یا (۸) اصلاح شود:

$$of_0 = r_w + g_0^{icr} + R_i - R + d^{cr} \quad (7)$$

$$of_0 = r_w + g_0^{ocr} + R - R_0 - d^{cr} \quad (8)$$

جدول ۷: مقادیر  $E^{cr}$  و  $d^{cr}$  محاسبه شده برای شرایط مختلف آزمون

	$f$ (kHz)	$w_b$ (N)	$R$ ( $\mu\text{m}$ )	$g_0^{st}$ ( $\mu\text{m}$ )	$g_0^{icr}$ ( $\mu\text{m}$ )	$g_0^{ocr}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d^{cr}$ ( $\mu\text{m}$ )	$E^{cr}$ ( $\mu\text{m}$ )
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

قوس گوشه) افزایش می‌دهد. در محدوده‌ی بررسی شده، تغییر شعاع قوس اثر قابل 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 ماشین کاری 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 ماشین کاری، 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 نشان می‌دهند 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.

## ۶- محاسبه‌ی نرخ باربرداری به کمک پهنای شیار

به کمک مقادیر پهنای شیار روی مسیر مستقیم و قوس گوشه می‌توان نرخ بار برداری<sup>۱۶</sup> بر حسب میلی‌متر مکعب بر دقیقه را برای مسیر مستقیم و قوس گوشه محاسبه نمود [۱۱]:

$$\text{MRR}^{st} = k_0^{st} v h \quad (11)$$

$$\text{MRR}^{cr} = k_0^{cr} v h \quad (12)$$

$h$  و  $v$  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 خشن کاری 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 ماشین کاری را در هر دو حالت (روی مسیر مستقیم و

## 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	$\mu m$
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	$\mu m$
F	F-test value	مقدار آماره‌ی F	-
$f$	Number of sparks per second	فرکانس تخلیه	spark/sec
$g$	Spark gap size	گپ ماشینکاری	$\mu m$
$g_0$	Spark gap size in the roughing pass	گپ ماشینکاری در مرحله خشن کاری	$\mu m$
$\bar{g}_0^{cr}$	Average gap size between wire and workpiece at a curved corner	گپ متوسط ماشینکاری بین سیم و قطعه کار روی قوس	$\mu m$
$g_0^{st}$	Straight path lateral gap size	گپ کناری ماشینکاری روی مسیر مستقیم	$\mu m$
$g_0^{icr}$	Inner curved corner gap size	گپ ماشینکاری در ناحیه قوس داخلی مسیر	$\mu m$
$g_0^{ocr}$	Outer curved corner gap size	گپ ماشینکاری در ناحیه قوس بیرونی مسیر	$\mu m$
$k_0$	Machining width in a roughing pass	پهنای ماشین کاری در مرحله خشن کاری	$\mu m$
$k_0^{cr}$	Cutting slot in roughing pass on straight path	پهنای شیار برش در مرحله‌ی خشن کاری روی مسیر مستقیم	$\mu m$
$k_0^{st}$	Cutting slot in roughing pass on curved corner	پهنای شیار برش در مرحله‌ی خشن کاری روی قوس گوشه	$\mu m$
$of_0$	Wire offset in roughing pass	افست خشن کاری	$\mu m$
P	Probability value	مقدار احتمال	-
$r_w$	Wire radius	شعاع سیم	$\mu m$
R	Target corner radius	شعاع هدف گوشه	$\mu m$
$R_i$	Path inner corner radius	شعاع داخلی مسیر (قوس محدب مسیر)	$\mu m$
$R_c$	Path central corner radius	شعاع مرکزی مسیر	$\mu m$
$R_o$	Path outer corner radius	شعاع بیرونی مسیر (قوس مقعر مسیر)	$\mu m$
$R^2$	R-squared	ضریب تعیین	-
$R^2$ (adj)	Adjusted R-squared: correlation coefficient	ضریب تعیین تعدیل شده	-
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

- [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.
- [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., 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
- [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.