



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و پنج، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۱۱۹ تا ۱۳۷  
Vol. 45, No. 2, winter 2013, pp. 119-135



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)  
(AJSR - ME)

## تحلیل بار باقیمانده و خطای ماشین کاری مسیر مستقیم و قوس گوشه در خشن کاری وایرکات

حمید آبیار فیروزآبادی<sup>۱</sup>، جمشید پرویزیان<sup>۲\*</sup>، امیر عبدالله<sup>۳</sup>، علیرضا فدایی تهرانی<sup>۴</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت ۱۳۹۰/۸/۸، پذیرش ۱۳۹۲/۱۰/۲۱)

### چکیده

ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی (وایرکات) برای تولید شکل‌های پیچیده و ظریف روی مواد سخت توسعه یافته است. عدم دستیابی به دقت‌های بالا در ماشین کاری قوس‌های کوچک گوشه یکی از مهمترین مشکلات این فرآیند است. در تحقیق حاضر، خطاهای ماشین کاری شعاع گوشه بررسی شده است. برای مرحله‌ی خشن کاری بر اساس سه متغیر فرکانس تخلیه، کشش سیم و شعاع قوس، توسط روش فاکتوریل کامل آزمایش‌ها طراحی و بار باقیمانده روی مسیر مستقیم و قوس گوشه تحلیل شده است. آزمون‌های عملی این تحقیق روی فولاد ابزار سردکار 1.2510 انجام شده است. با به کارگیری تحلیل‌های آماری و محاسبه‌ی گپ متغیر ماشین کاری در روی قوس گوشه، خطای ماشین کاری برای قوس‌های محدب گوشه به شعاع ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میکرون محاسبه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند چنانچه مسیر سیم در روی قوس بر اساس مقدار خطای محاسبه شده اصلاح گردد بار باقیمانده‌ی یکسان روی مسیر مستقیم و قوس‌های مختلف گوشه حاصل می‌شود و این بار باقیمانده با یک افست ساده قابل برداشتن است.

### کلمات کلیدی:

ماشین کاری وایرکات، خطای ماشین‌کاری، شعاع گوشه، بار باقیمانده، انحراف سیم.

\* نویسنده مسئول وعده دار مکاتبات Email: japa@cc.iut.ac.ir

## ۱- مقدمه

فرآیند وایرکات شکل خاصی از ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است که در روند روبه‌رشد تولید سریع محصول جایگاه ویژه یافته است. در این فرآیند، باربرداری در اثر جرقه‌های مجزا که بین قطعه‌کار و سیم اتفاق می‌افتد، انجام می‌شود. در این روش تنش‌های مکانیکی به وجود نمی‌آید زیرا ابزار و قطعه‌کار با هم تماس مستقیم ندارند. در نتیجه، تولید قطعات ظریف با اشکال پیچیده و سختی بالا به سادگی امکان‌پذیر است. اهمیت این فرآیند چنان است که در برخی زمینه‌های تولید تنها گزینه‌ی توجیه‌پذیر برای تولید قطعات است. بهبود دقت برش و کاهش خطاهای ابعادی در وایرکات موضوعی بسیار مهم است. در گوشه‌ها و قوس‌ها مطالعه‌ی دقت ابعادی در مقیاس میکرون کار دشواری است زیرا نیروهای فرآیندی همراه با انعطاف‌پذیری سیم منجر به ارتعاش و تغییر شکل سیم می‌شود. در برش گوشه‌ها و قوس‌ها در مرحله‌ی خشن‌کاری، خیز سیم باعث انحراف سیم از مسیر برنامه‌نویسی شده می‌شود. این انحراف سبب شده تا سیم از دیواره‌ی داخلی قوس بار بیشتر و از دیواره‌ی خارجی آن بار کمتری بردارد. از این رو خطای ماشین‌کاری اجتناب‌ناپذیر است. این پدیده در قوس‌های با شعاع کم شدیدتر می‌شود. 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 داده و در نتیجه بی‌دقتی برش گوشه‌ها را کاهش دهند.

از اولین تحقیقات پیرامون خطای ماشین‌کاری گوشه‌ها می‌توان از کار دکیسر و اسنویز (۱۹۸۹) نام برد. آنها سه عامل واماندگی سیم، افزایش ارتعاشات سیم و افزایش احتمال تخلیه الکتریکی را علل اصلی خطای ماشین‌کاری گوشه‌های تیز معرفی نمودند [۱]. محققین دیگر تلاش نموده تا با تغییر شرایط ماشین‌کاری مانند زمان خاموشی پالس و توان، خیز سیم را کاهش داده و دقت ماشین‌کاری را افزایش دهند [۲-۳]. عیب اصلی این روش‌ها، افزایش زمان ماشین‌کاری است. اوبارا و همکاران یک روش ترکیبی کنترل توان و مسیر برای بهبود دقت گوشه‌ها در خشن‌کاری وایرکات پیشنهاد نمودند [۳]. در این روش از کنترل توان برای کاهش خیز سیم و از اصلاح مسیر برای جبران خطا استفاده شده است. بنا بر نظر نویسندگان، در بین روش‌های ماشین‌کاری گوشه، این روش کم‌ترین زمان ماشین‌کاری را دارد. در مطالعه‌ی دیگر، انواع کنترل برای کاهش زمان ماشین‌کاری در گوشه بررسی شده، در پایان کنترل زمان خاموشی پالس با

کنترل ولتاژ سروو و روش اصلاح مسیر ترکیب شده است [۴]. به کمک یک سامانه جامع رایانه‌ای و ترکیبی از یافته‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، خطای ماشین‌کاری پیش‌بینی شد و برای بهینه‌سازی دقت گوشه‌ها، مسیر سیم اصلاح شد [۵]. اثر تغییر شکل و موقعیت سیم روی دقت برش گوشه‌ها همواره مورد توجه بوده است [۶]. گام بعدی توجه به اثر خطاهای ایجاد شده در برش‌های پیشین روی دقت نهایی در برش‌های متوالی (خشن و پرداخت) بود [۷]. در تلاشی دیگر، رابطه‌ی میان مسیر واقعی سیم و مسیر NC در خشن‌کاری گوشه‌های تیز شبیه‌سازی شد تا امکان پیش‌بینی مسیر واقعی سیم فراهم آید [۸]. بر نقش افزایش کشش سیم، در بهبود دقت شعاع گوشه تاکید شده است چرا که با افزایش کشش خیز سیم کاهش می‌یابد و اختلاف بین شعاع گوشه در صفحات میانی و انتهایی قطعه کم می‌شود [۹]. دقت ماشین‌کاری گوشه‌ها در ورق‌های نازک و اثر نیروی الکترومغناطیس روی آنها نیز مورد توجه قرار گرفته است [۱۰].

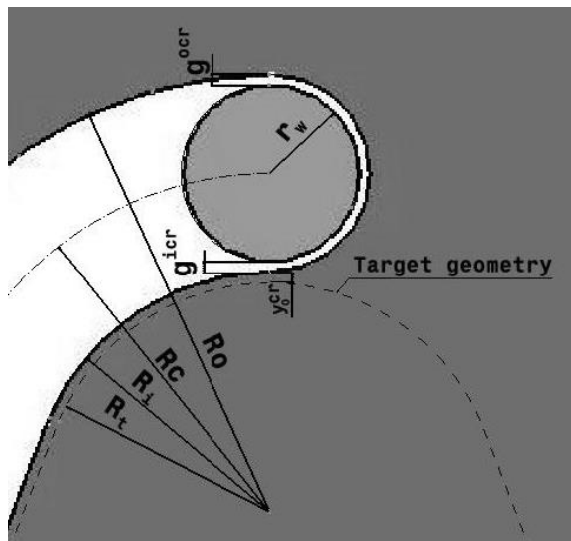
مقدار ماده باقیمانده ناشی از برش اول (خشن‌کاری) در تعیین دقت نهایی قوس گوشه نقش به‌سزایی دارد. این مقدار در هر قوس گوشه متغیر است و وابسته به متغیرهایی مانند ضخامت قطعه‌کار و شعاع گوشه است [۷]. ماده باقیمانده‌ی متفاوت در قوس‌های گوشه سبب ایجاد خطاهای متفاوت در آنها می‌شود. بنابراین برای دستیابی به شکل هندسی ایده‌آل در گوشه‌ها و انحناها، این خطاها باید حذف شوند. عملکرد ماشین وایرکات کاملاً به متغیرهای ماشین‌کاری وابسته است. انتخاب صحیح این متغیرها می‌تواند دستیابی به گوشه‌های دقیق را ممکن سازد. گوشه‌ها بر حسب شکل هندسی به گوشه‌های تیز، گوشه‌های بزرگ-شعاع و گوشه‌های کوچک-شعاع تقسیم می‌شوند [۳].

در تحقیق حاضر (که بر روی هندسه‌ی برش یک مرحله‌ای انجام شده است)، نشان داده خواهد شد که علت اصلی دقیق نبودن هندسه‌ی برش در گوشه‌های کوچک-شعاع، اختلاف برداشت مواد از روی آنها نسبت به مسیرهای مستقیم است. همچنین برای برش یک مرحله‌ای، اثر متغیرهای ماشین‌کاری روی بار باقیمانده مسیر مستقیم و قوس محدب گوشه تجزیه و تحلیل شده است.

شکل (۱) برش یک مرحله‌ای وایرکات در روی مسیر مستقیم و شکل (۲) برش یک مرحله‌ای روی قوس گوشه را نشان می‌دهد.

اگر بار باقیمانده پس از برش یک مرحله‌ای در روی مسیر مستقیم با  $y_0^{st}$  و در روی قوس با  $y_0^{cf}$  نشان داده شود برای حذف خطای ماشین‌کاری باید این دو با هم برابر باشند. در این هنگام با جابجایی مشخص، فاصله‌ی مرکز سیم از مسیر

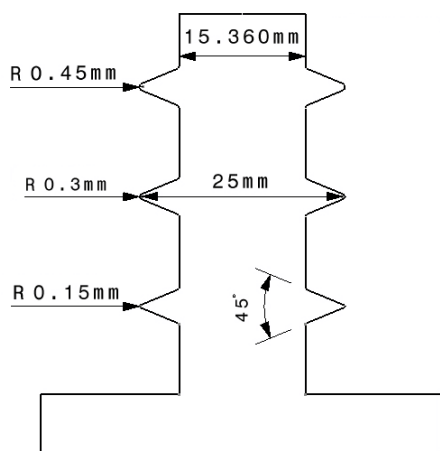
طوری که برای یک قوس محدب  $y_0^{st} < y_0^{cr}$  و برای یک قوس مقعر  $y_0^{cr} > y_0^{st}$  است.



شکل (۲): برش یک مرحله‌ای و ایرکات روی قوس گوشه

این ابعاد به وسیله کمپراتور مکانیکی در شرایط اتاق تمیز با ابعاد بلوک‌های سنجه مینا مقایسه و میزان بار باقیمانده در روی قسمت‌های مختلف آن استخراج شد.

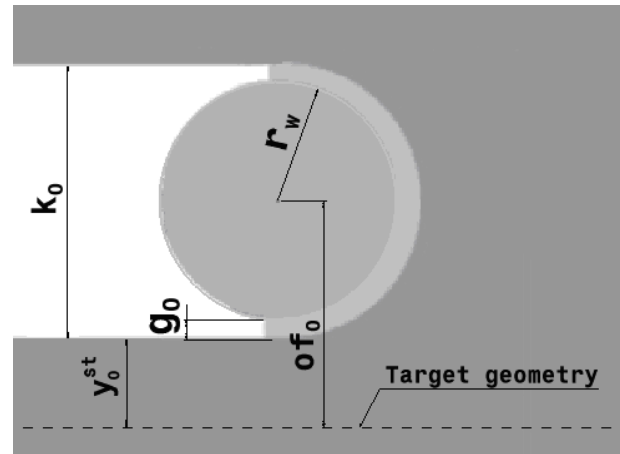
عملکرد ماشین و ایرکات مانند هر ماشین دیگری بستگی به نوع طراحی و ویژگی‌های قسمت‌های مختلف آن (به ویژه منبع تغذیه) دارد. در ماشین و ایرکات تنظیمات برش و همچنین مقادیر افست برای مراحل مختلف برش به وسیله سازنده ماشین پیشنهاد می‌شود. این مقادیر بسته به ضخامت و جنس قطعه‌کار و سیم تغییر می‌نماید. جدول (۱) تنظیمات پیشنهادی سازنده برای برش یک مرحله‌ای با ماشین مورد آزمایش برای فولاد به ضخامت ۱۰ میلیمتر را نشان می‌دهد [۱۲].



شکل (۳): شکل هندسی قطعات برش خورده

همان‌طور که اشاره شد خطای ابعادی در فرآیند و ایرکات بیشتر ناشی از انحراف سیم از مسیر برنامه‌نویسی شده است.

برنامه‌ریزی شده (در مرحله بعدی ماشین کاری)، می‌توان به شکل هندسی مطلوب در هر دو مسیر رسید. در ماشینکاری به وسیله و ایرکات به طور معمول مقادیر  $y_0^{st}$  و  $y_0^{cr}$  با هم برابر نبوده به



شکل (۱): برش یک مرحله‌ای و ایرکات روی مسیر مستقیم

## ۲- مواد، شرایط انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری

در این تحقیق آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های فولاد ۱۰/۲۵۱۰ (AISI:O1) به ابعاد ۹ X ۴۹ X ۵۴ میلی‌متر انجام شدند. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، پس از فرزکاری، طبق استاندارد ASM عملیات حرارتی تنش‌گیری اجرا شد [۱۱] و سپس کلیه سطوح آنها با دقت توازی  $\pm 2$  دقیقه سنگ‌زده شدند. برای جلوگیری از ایجاد تنش پسماند، عملیات سنگ‌زنی با بار کم و مایع خنک-کاری زیاد انجام شد. نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی با استفاده از ساعت میکرونی روی میز ماشین و ایرکات تنظیم و بسته شدند. تمامی آزمایش‌های این تحقیق به وسیله ماشین و ایرکات شارمیلز روبوفیل ۲۰۰ و با سیم SW25X (با قطر ۰/۲۵ میلیمتر) انجام شدند. سیم مورد استفاده همان سیم پیشنهادی سازنده در کاتالوگ ماشین بود [۱۲]. 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 در شرایط اتاق تمیز استفاده شد.

مسیر برش به صورت متقارن طبق شکل (۳) به گونه‌ای برنامه‌نویسی شد که پهنای قطعه در روی مسیر مستقیم برابر ۱۵/۳۶۰ میلی‌متر و روی قوس گوشه برابر ۲۵ میلی‌متر و شعاع قوس برابر ۱۵۰، ۳۰۰، ۴۵۰ میکرون باشد. بعد از برش قطعه،

شده است. برای انجام آزمایش‌ها، متغیرهای 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) مطابق جدول (۲) انتخاب شده‌اند. سایر متغیرها برابر مقدار پیشنهادی سازنده (جدول ۱) ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

نیروی انفجار حاصل از تخلیه الکتریکی (ترکیدن حباب بخار اطراف کانال پلاسما در انتهای جرقه) و انعطاف‌پذیری سیم دو عامل اصلی این انحراف هستند. از میان متغیرهای جدول (۱)، می‌توان از متغیر فرکانس تخلیه برای کنترل نیروی انفجارها و از متغیر کشش سیم برای کنترل تغییر شکل سیم استفاده نمود. بنابراین در تحقیق حاضر، اثر این دو متغیر روی بار باقیمانده‌ی مسیر مستقیم و قوس‌های گوشه با شعاع‌های مختلف بررسی

جدول (۱): مقادیر پیشنهادی سازنده برای متغیرهای مختلف وایرکات در ماشین‌کاری یک مرحله‌ای خشن‌کاری برای فولاد به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و سیم SW25X [۱۲]

متغیر	$M$	$C$ ( $\mu F$ )	$V$ (V) سیم قطب منفی	$P$ (A)	$A$ ( $\mu s$ )	$w_b$ (N)	$w_s$ (m/min)	$A_j$ (درصد ولتاژ مدار باز)	$S$ (mm/min)	$f$ (kHz)
کد	۱	۶	-۳	۱۱	۴	۱	۶	۵۰	۰/۸۴	۱۸
مقدار	-	۳/۳	۱۲۰	۳۲	۶/۴	۱۰	۶	۵۰	۶/۱۴	۱۸

### ۳- بار باقیمانده روی مسیر مستقیم

طبق آزمایش‌های طراحی‌شده، سطوح مختلف متغیرهای مورد آزمایش در مرحله خشن‌کاری آزموده شدند. جدول (۳) مقادیر بار باقیمانده مرحله‌ی خشن‌کاری در روی مسیر مستقیم را با توجه به افست پیشنهادی سازنده ماشین معادل ۱۹۸ میکرون نشان می‌دهد.

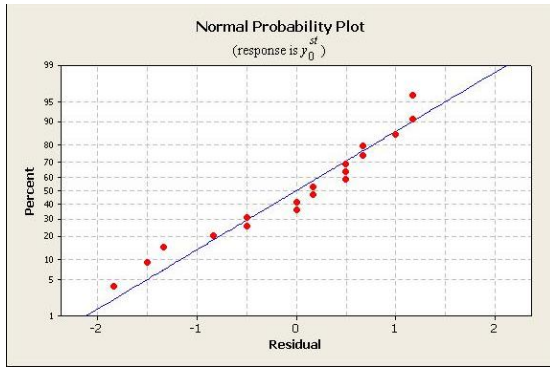
جدول (۳): مقدار بار باقیمانده مرحله‌ی خشن‌کاری در مسیر مستقیم

$f$ (kHz)	$w_b$ (N)	$y_0^{st}$ ( $\mu m$ )				
		نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین	
۱	۱۳	۱۰	۴۹	۴۹/۵	۵۰	۴۹/۵
۲	۱۳	۱۲/۵	۵۶/۵	۵۵	۵۷/۵	۵۶/۳۳
۳	۱۳	۱۵	۵۹/۵	۶۰/۵	۶۱	۶۰/۳۳
۴	۱۸	۱۰	۴۹/۵	۴۹	۴۸/۵	۴۹
۵	۱۸	۱۲/۵	۵۲	۵۴/۵	۵۵	۵۳/۸۳
۶	۱۸	۱۵	۵۸	۵۶	۵۸/۵	۵۷/۵

جدول (۲): متغیرهای بررسی شده در آزمایش‌ها: مقادیر تیره پیشنهاد سازنده هستند.

متغیرها	تعداد سطح	مقادیر متغیرها		
$f$ (kHz)	۲	۱۳	۱۸	-
$w_b$ (N)	۳	۱۰	۱۲/۵	۱۵
$R$ ( $\mu m$ )	۳	۱۵۰	۳۰۰	۴۵۰

در این تحقیق از روش طراحی آزمایش برای بدست آوردن داده‌های لازم برای مدل‌سازی استفاده شده است. طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل، اطلاعات جامعی را از فرآیند فراهم می‌آورد. از این‌رو، برای انجام آزمایش‌ها از این روش استفاده شده و بار باقیمانده روی مسیر مستقیم و قوس محدب گوشه ( $y_0^{st}$ ) و ( $y_0^{ct}$ ) در مرحله‌ی خشن‌کاری وایرکات بررسی شده است. با تحلیل واریانس برای هر یک از پاسخ‌ها، عواملی که اثر قابل توجهی بر روی نتایج داشته‌اند، استخراج شده‌اند. همچنین با توجه به متغیرها، روابطی برای پیش‌بینی نتایج ارائه شده است [۱۳-۱۶].



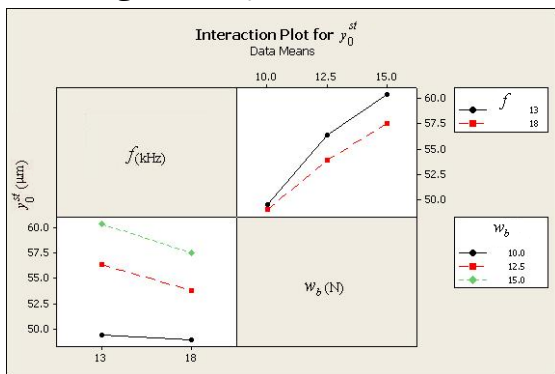
شکل (۵): نمودار احتمال نرمال برای بار باقیمانده خشن کاری در

مسیر مستقیم،  $y_0^{st}$

جدول (۴) نشان می‌دهد که با سطح اطمینان ۹۵ درصد  $(P \leq 0.05)$ ، هر دو متغیر فرکانس و کشش سیم دارای اثر قابل توجه بوده و اثر متقابل آنها ناچیز است. معادله رگرسیونی (۱) ارتباط این متغیرها با خروجی  $y_0^{st}$  را نشان می‌دهد.

$$y_0^{st} = 36.278 - 0.3889 f + 1.9333 w_b \quad (1)$$

نمودار اثرات متغیرهای فرکانس جرقه و کشش سیم در شکل (۶)، مشخص می‌نماید که تغییر سطوح این متغیرها بر روی خروجی  $y_0^{st}$  اثر مهم دارد. با توجه به این نمودار، کمینه مقدار خروجی در سطح فرکانس ۱۸ کیلوهرتز و کشش سیم ۱۰ نیوتن رخ می‌دهد. با توجه به شکل (۶) و همچنین جدول (۴) دیده می‌شود که بیش‌ترین اثر روی بار باقیمانده در مسیر مستقیم به کشش سیم تعلق دارد. مشاهدات حاکی از آن است که کشش سیم رابطه مستقیم با  $y_0^{st}$  داشته و با افزایش آن، به طور موثری افزایش می‌یابد. در صورتی که فرکانس رابطه معکوس با  $y_0^{st}$  داشته و با افزایش آن مقدار  $y_0^{st}$  کاهش می‌یابد.



شکل (۶): نمودار اثرات متقابل فرکانس جرقه و کشش سیم روی بار

باقیمانده خشن کاری در مسیر مستقیم،  $y_0^{st}$

شکل فضایی خروجی  $y_0^{st}$  برای فرکانس جرقه - کشش

جدول (۴)، مقادیر تحلیل واریانس به دست آمده برای پاسخ  $y_0^{st}$  را با سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان می‌دهد.

جدول (۴): تحلیل واریانس برای بار باقیمانده خشن کاری در مسیر

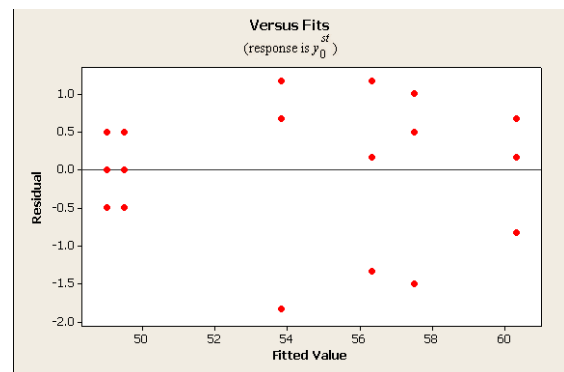
مستقیم  $y_0^{st}$

	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
$f$	۱	۱۷/۰۱۴	۱۷/۰۱۴	۱۷/۰۱۴	۱۴/۵۸	۰/۰۰۲
$w_b$	۲	۲۸۴/۳۳۳	۲۸۴/۳۳۳	۱۴۲/۱۶۷	۱۲۱/۸۶	۰/۰۰۰
$f \times w_b$	۲	۴/۷۷۸	۴/۷۷۸	۲/۳۸۹	۲/۰۵	۰/۱۷۲
Er_ror	۱۲	۱۴	۱۴	۱/۱۶۷		
T_otal	۱۷	۳۲۰/۱۲۵				

$S = 1/0.12$	$R^2 = 95/63$	$R^2(\text{adj}) = 93/8$
--------------	---------------	--------------------------

$R^2$  معیاری برای تعیین تکرارپذیری در مقدار خروجی است. به طور کلی هر چه مقدار  $R^2$  بزرگتر باشد، تحلیل انجام شده دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر است. از شاخص‌های ارزیابی یک مدل، مستقل بودن مقادیر باقیمانده با استفاده از نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده است [۱۳]. نمودار شکل (۴) نشان می‌دهد که مقادیر باقیمانده به طور تصادفی توزیع شده‌اند و از روند خاصی پیروی نمی‌نمایند و در نتیجه شرط مستقل بودن مقادیر باقیمانده به خوبی رعایت شده‌است. نمودار احتمال نرمال برای پاسخ  $y_0^{st}$  در شکل (۵) دلالت بر نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده دارد. نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده لازمه تحلیل واریانس است.

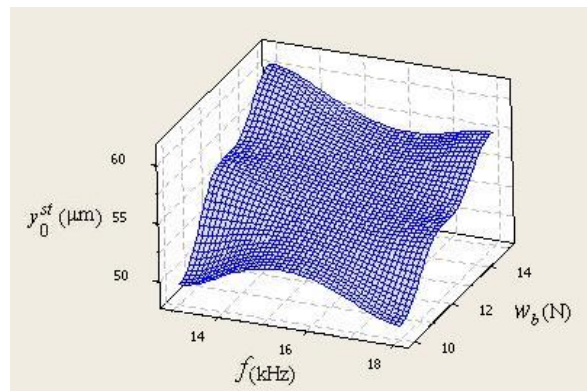


شکل (۴): نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده برای بار

باقیمانده خشن کاری در مسیر مستقیم،  $y_0^{st}$

شکل (۷): شکل فضایی بار باقیمانده خشن‌کاری در مسیر مستقیم،  
به ازای فرکانس جرقه - کشش سیم  $y_0^{sf}$ .

سیم در شکل (۷) نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش کشش سیم و کاهش فرکانس جرقه مقدار  $y_0^{sf}$  به بیشترین مقدار می‌رسد.



#### ۴- بار باقیمانده روی قوس

جدول (۵) مقادیر بار باقیمانده مرحله‌ی خشن‌کاری در روی قوس گوشه ( $y_0^{cr}$ ) را با توجه به افست ۱۹۸ میکرون (پیشنهادی سازنده ماشین) نشان می‌دهد.

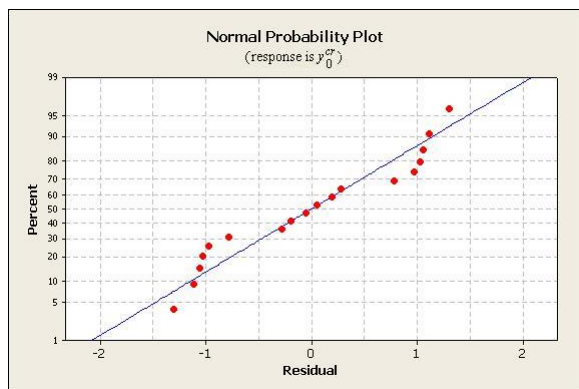
جدول (۵): مقدار بار باقیمانده حاصل از مرحله‌ی خشن در روی قوس محدب

	$f$ (kHz)	$w_b$ (N)	$R$ ( $\mu\text{m}$ )	$y_0^{cr}$ ( $\mu\text{m}$ )
۱	۱۳	۱۰	۱۵۰	۱۹/۵
۲	۱۳	۱۰	۳۰۰	۲۳/۵
۳	۱۳	۱۰	۴۵۰	۲۳/۵
۴	۱۳	۱۲/۵	۱۵۰	۳۳
۵	۱۳	۱۲/۵	۳۰۰	۳۴
۶	۱۳	۱۲/۵	۴۵۰	۳۵/۵
۷	۱۳	۱۵	۱۵۰	۳۶/۵
۸	۱۳	۱۵	۳۰۰	۳۹
۹	۱۳	۱۵	۴۵۰	۴۱
۱۰	۱۸	۱۰	۱۵۰	۱۶/۵
۱۱	۱۸	۱۰	۳۰۰	۱۸/۵
۱۲	۱۸	۱۰	۴۵۰	۲۴/۵
۱۳	۱۸	۱۲/۵	۱۵۰	۲۲/۵
۱۴	۱۸	۱۲/۵	۳۰۰	۲۷
۱۵	۱۸	۱۲/۵	۴۵۰	۲۹
۱۶	۱۸	۱۵	۱۵۰	۳۲
۱۷	۱۸	۱۵	۳۰۰	۳۳
۱۸	۱۸	۱۵	۴۵۰	۳۳/۵

با تجزیه و تحلیل داده‌های بالا جدول تحلیل واریانس (۶) برای پاسخ  $y_0^{cr}$  حاصل شده است.

جدول (۶): تحلیل واریانس برای بار باقیمانده خشن کاری قوس محدب،  $y_0^{cr}$

	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
$f$	۱	۱۳۳/۳۸۹	۱۳۳/۳۸۹	۱۳۳/۳۸۹	۳۹/۳۶	۰/۰۰۳
$w_b$	۲	۶۷۲/۳۳۳	۶۷۲/۳۳۳	۳۳۶/۱۶۷	۹۹/۲	۰/۰۰۰
$R$	۲	۶۱	۶۱	۳۰/۵	۹	۰/۰۳۳
$f \times w_b$	۲	۲۴/۷۷۸	۲۴/۷۷۸	۱۲/۳۸۹	۳/۶۶	۰/۱۲۵
$f \times R$	۲	۲/۷۷۸	۲/۷۷۸	۱/۳۸۹	۰/۴۱	۰/۶۸۹
$w_b \times R$	۴	۴/۶۶۷	۴/۶۶۷	۱/۱۶۷	۰/۳۴	۰/۸۳۷
Error	۴	۱۳/۵۵۶	۱۳/۵۵۶	۳/۳۸۹		
Total	۱۷	۹۱۲/۵				
$S = ۱/۸۴۰۸۹$		$R^2 = ۰/۹۸۸۵۱$		$R^2(\text{adj}) = ۰/۹۳۶۹$		



شکل (۹): نمودار احتمال نرمال برای بار باقیمانده خشن کاری

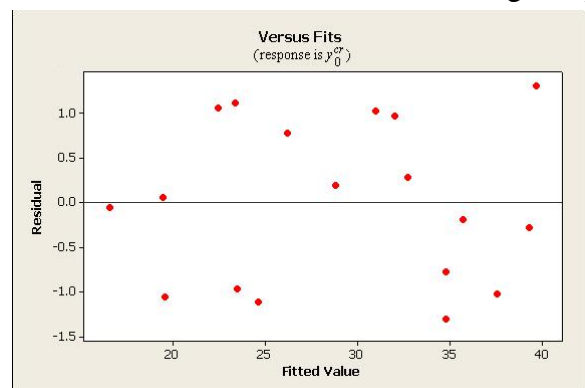
قوس محدب،  $y_0^{cr}$

شکل (۱۰) نمودار اثر مستقیم سه متغیر فرکانس جرقه، کشش سیم و شعاع قوس بر روی خروجی  $y_0^{cr}$  را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل و همچنین جدول (۸) دیده می‌شود که متغیر کشش سیم بیشترین اثر را بر  $y_0^{cr}$  داشته و شعاع قوس کم-ترین اثر را دارد. مشاهدات حاکی از آن است که کشش سیم رابطه مستقیم با  $y_0^{cr}$  داشته، با افزایش آن  $y_0^{cr}$  به طور موثری افزایش می‌یابد. در صورتی که فرکانس، رابطه معکوس با  $y_0^{cr}$  داشته، با افزایش آن مقدار  $y_0^{cr}$  کاهش می‌یابد. افزایش شعاع قوس نیز به میزان کمی مقدار  $y_0^{cr}$  را افزایش می‌دهد.

جدول (۶) نشان می‌دهد که با سطح اطمینان ۹۵ درصد ( $P \leq ۰/۰۵$ )، هر سه متغیر فرکانس، کشش سیم و شعاع قوس دارای اثر قابل توجه و اثر متقابل آنها ناچیز است. معادله رگرسیونی (۲) رابطه بین پاسخ  $y_0^{cr}$  با متغیرهای موثر را نشان می‌دهد.

$$y_0^{cr} = ۴/۲۹۴ - ۱/۰۸۸۹ f + ۲/۹۶۶۷ w_b + ۰/۰۱۵ R \quad (۲)$$

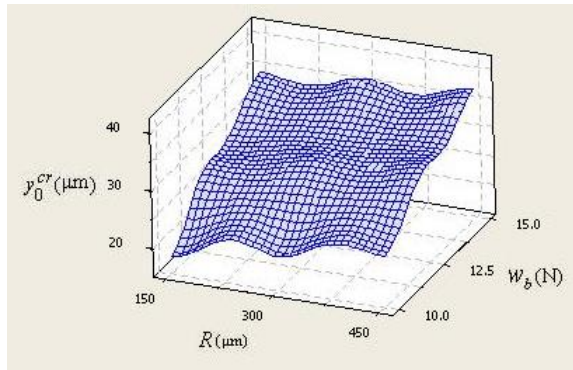
از نمودار شکل (۸) مشخص است که در این مدل شرط مستقل بودن مقادیر باقیمانده به خوبی رعایت شده، توزیع مقادیر باقیمانده از روند خاصی پیروی نمی‌نماید. نمودار احتمال نرمال برای پاسخ  $y_0^{cr}$  نیز دلالت بر نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده دارد (شکل ۹).



شکل (۸): نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده برای بار

باقیمانده خشن کاری قوس محدب،  $y_0^{cr}$





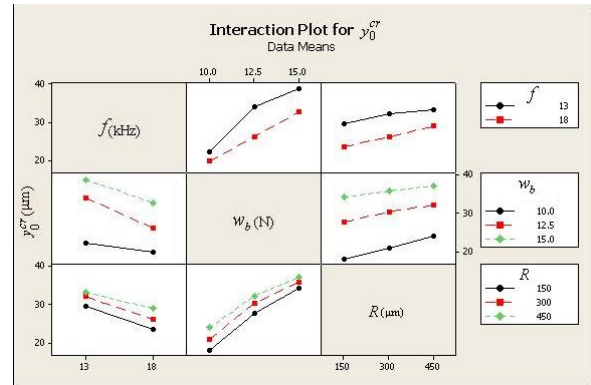
ج- شکل فضایی خروجی  $y_0^{cr}$  به ازای کشش سیم - شعاع قوس  
شکل (۱۱): شکل‌های فضایی بار باقیمانده خشن کاری قوس محدب،

$$y_0^{cr}$$

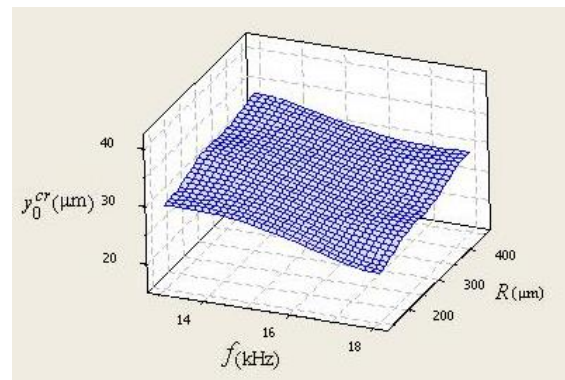
شکل‌های فضایی خروجی  $y_0^{cr}$  برای فرکانس جرقه- کشش سیم، فرکانس جرقه- شعاع قوس و کشش سیم - شعاع قوس در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند. با توجه به نمودارها و نتایج حاصل می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افزایش کشش سیم و کاهش فرکانس، مقدار  $y_0^{cr}$  به حداکثر خود می‌رسد. همچنین در مقادیر پایین شعاع قوس می‌توان با افزایش کشش سیم مقدار  $y_0^{cr}$  را به طور چشمگیر افزایش داد.

#### ۵- بحث و بررسی

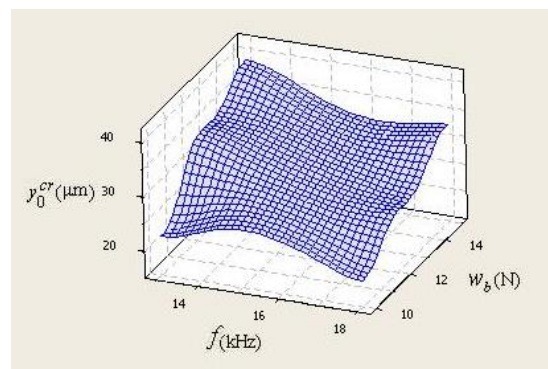
با انجام آزمایش‌ها و به کمک نمودارهای آماری، اثر متغیرهای فرکانس تخلیه و کشش سیم روی پاسخ  $y_0^{st}$ ، و اثر متغیرهای فرکانس تخلیه، کشش سیم و شعاع قوس روی پاسخ  $y_0^{cr}$  مشخص شد. متغیر فرکانس بیانگر تعداد جرقه (تخلیه) در واحد زمان است. افزایش فرکانس تخلیه، سبب افزایش نرخ باربرداری در مسیر مستقیم و منحنی و افزایش انحراف سیم در مسیر منحنی به سمت مرکز قوس می‌شود. برای ایجاد دقت ماشین- کاری و پایداری، مقدار مشخصی از کشش در سیم برای محدود نمودن خمش و ارتعاش آن الزامی است. مقدار کشش سیم باید ثابت نیز باشد. کشش بالاتر سیم، اثر خیز سیم را کاهش داده و بار باقیمانده (روی مسیر مستقیم و قوس) را افزایش می‌دهد. افزایش شعاع قوس سبب کاهش انحنای مسیر و در نتیجه افزایش بار باقیمانده روی قوس می‌شود. در این بخش به کمک نتایج حاصل از آزمایش‌ها و روابط تحلیلی، خطای ابعادی در روی مسیر مستقیم و قوس گوشه تجزیه و تحلیل می‌شود.



شکل (۱۰): نمودار اثرات متقابل فرکانس جرقه، کشش سیم و شعاع قوس روی بار باقیمانده خشن کاری قوس محدب،  $y_0^{cr}$



الف: شکل فضایی خروجی  $y_0^{cr}$  به ازای فرکانس جرقه- شعاع قوس



ب- شکل فضایی خروجی  $y_0^{cr}$  به ازای فرکانس جرقه - کشش سیم



### ۵-۱- نسبت بار باقیمانده روی قوس محدب به مسیر مستقیم

در یک برش وایرکات در صورتی که مقدار بار باقیمانده در روی مسیر مستقیم و قوس گوشه با هم برابر شوند با اعمال یک افست مشخص، می‌توان به ابعاد موردنظر و دلخواه روی مسیرهای مستقیم و قوس رسید. هر چه بار باقیمانده در روی قوس ( $y_0^{ct}$ ) به بار باقیمانده در روی مسیر مستقیم ( $y_0^{st}$ ) نزدیک‌تر باشد مقدار خطای ماشینکاری نیز کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها می‌توان ادعا نمود که با ثابت بودن شرایط ماشینکاری همواره بار باقیمانده‌ی یکسان و یکنواخت روی مسیر مستقیم به‌دست می‌آید. با توجه به مطالب گفته‌شده، می‌توان از مقدار  $y_0^{st}$  به عنوان مبنای قضاوت برای ارزیابی مقدار

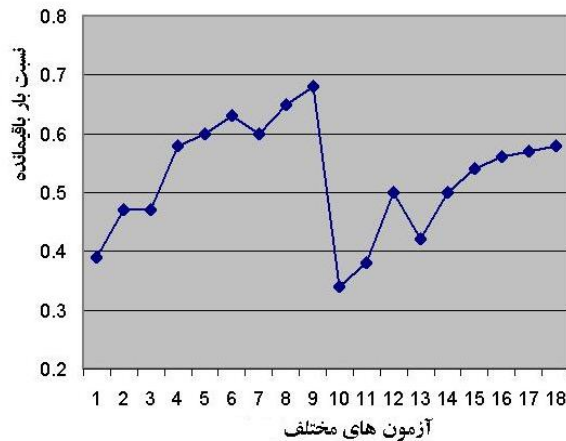
در هر شرایط آزمون استفاده نمود و اثر متغیرهای مورد مطالعه روی آن (فرکانس جرقه، کشش سیم و شعاع قوس) را ارزیابی نمود. بنابراین برای مشخص نمودن مقادیر بهینه فرکانس جرقه و کشش سیم روی شعاع‌های مختلف گوشه می‌توان از نسبت بار باقیمانده در روی قوس محدب به بار باقیمانده روی مسیر مستقیم استفاده نمود.

$$y_0 \text{ ratio} = \frac{y_0^{ct}}{y_0^{st}} \quad (3)$$

جدول (۷) مقادیر نسبت بار باقیمانده در روی قوس محدب به بار باقیمانده روی مسیر مستقیم به‌دست‌آمده برای آزمون‌های مختلف فرکانس جرقه، کشش سیم و شعاع قوس و نمودار شکل (۱۲) مقایسه‌ی این مقادیر را نشان می‌دهد.

جدول (۷): مقدار نسبت بار باقیمانده در روی قوس محدب به بار باقیمانده روی مسیر مستقیم برای آزمون‌های مختلف

	$f$ (kHz)	$w_b$ (N)	$R$ ( $\mu\text{m}$ )	$y_0$ Ratio
۱	۱۳	۱۰	۱۵۰	۰/۳۹
۲	۱۳	۱۰	۳۰۰	۰/۴۷
۳	۱۳	۱۰	۴۵۰	۰/۴۷
۴	۱۳	۱۲/۵	۱۵۰	۰/۵۸
۵	۱۳	۱۲/۵	۳۰۰	۰/۶۰
۶	۱۳	۱۲/۵	۴۵۰	۰/۶۳
۷	۱۳	۱۵	۱۵۰	۰/۶۰
۸	۱۳	۱۵	۳۰۰	۰/۶۵
۹	۱۳	۱۵	۴۵۰	۰/۶۸
۱۰	۱۸	۱۰	۱۵۰	۰/۳۴
۱۱	۱۸	۱۰	۳۰۰	۰/۳۸
۱۲	۱۸	۱۰	۴۵۰	۰/۵۰
۱۳	۱۸	۱۲/۵	۱۵۰	۰/۴۲
۱۴	۱۸	۱۲/۵	۳۰۰	۰/۵۰
۱۵	۱۸	۱۲/۵	۴۵۰	۰/۵۴
۱۶	۱۸	۱۵	۱۵۰	۰/۵۶
۱۷	۱۸	۱۵	۳۰۰	۰/۵۷
۱۸	۱۸	۱۵	۴۵۰	۰/۵۸



شکل (۱۲): مقایسه مقادیر نسبت بار باقیمانده برای آزمون های مختلف

از رابطه (۴) نتیجه می شود هرگاه مقدار افست ثابت باشد فقط اندازه گپ ماشینکاری روی مقدار بار باقیمانده اثر دارد. اضافه برش جانبی یا گپ کناری ماشینکاری، مقدار فاصله ای است که در هنگام برش بین سیم و دیواره جانبی شیار ایجاد می شود. این فاصله در واقع نشان دهنده ی برد موثر جرقه در راستای جانبی سیم است. بنابراین، اگر گپ ماشینکاری یکنواخت باشد بار باقیمانده روی نقاط مختلف مسیر نیز یکسان خواهد بود و در نتیجه خطاهای ماشینکاری کاهش خواهند یافت. شرایط ماشینکاری و متغیرهای آن در تعیین این مقدار نقش به سزایی دارند. با توجه به رابطه ی (۴) و به کمک مقدار بار باقیمانده روی مسیر مستقیم می توان مقدار گپ ماشینکاری را برای هر آزمون محاسبه نمود. جدول (۸) مقادیر گپ ماشینکاری محاسبه شده روی مسیر مستقیم را ( $g_0^{st}$ )، برای آزمون های مختلف نشان می دهد.

هر چه مقدار نسبت بار باقیمانده بزرگتر باشد اختلاف بین بار باقیمانده در روی قوس و روی مسیر مستقیم کمتر است. جدول (۷) و شکل (۱۲) نشان می دهند که فرکانس ۱۳ کیلو هرتز و کشش سیم ۱۵ نیوتن چنین حالتی را برای شعاع های ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میکرون ایجاد نموده اند.

#### ۵-۲- محاسبه گپ ماشینکاری روی مسیر مستقیم، $g_0^{st}$

در شکل (۱) نمایی از برش مسیر مستقیم در مرحله ی خشن کاری و ایرکات نشان داده شد. در روی مسیر مستقیم به دلیل تعادل نیروهای وارد بر سیم، می توان گفت که همواره یک برش متقارن و یکنواختی در امتداد شیار برش در اطراف سیم وجود دارد. بنابراین با توجه به شکل های (۱) و (۲) می توان رابطه ی (۴) را برای برش در نظر گرفت:

$$of_0 = r_w + g_0 + y_0 \quad (4)$$

جدول (۸): مقادیر گپ کناری برش مستقیم ( $g_0^{st}$ ) محاسبه شده از بار باقیمانده روی مسیر مستقیم  $y_0^{st}$  با افست ۱۹۸ میکرومتر

	$f$ (kHz)	$w_b$ (N)	$y_0^{st}$ Mean ( $\mu\text{m}$ )	$g_0^{st}$ ( $\mu\text{m}$ )
۱	۱۳	۱۰	۴۹/۵	۲۳/۵
۲	۱۳	۱۲/۵	۵۶/۳۳	۱۶/۶۶
۳	۱۳	۱۵	۶۰/۳۳	۱۲/۶۶
۴	۱۸	۱۰	۴۹	۲۴
۵	۱۸	۱۲/۵	۵۳/۸۳	۱۹/۱۶
۶	۱۸	۱۵	۵۷/۵	۱۵/۵

جدول (۸) نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس و کاهش کشش سیم مقدار گپ جانبی ماشین کاری افزایش یافته است.

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

هنگامی که سیم، مسیر دایره‌ای را طی می‌نماید سرعت خطی نقاط مختلف محیط سیم با هم متفاوت است و نقاطی که روی شعاع مسیر بزرگتری قرار دارند سرعت خطی بیشتری دارند. همانطور که اشاره شد مقدار گپ ماشین کاری به متغیرهای جرقه و سرعت پیشروی و مانند آنها بستگی دارد. بنابراین توزیع متفاوت سرعت روی محیط سیم باعث می‌شود که فاصله نقاط مختلف محیط سیم با قطعه کار (گپ ماشین کاری) متفاوت باشند. واضح است که سرعت حرکت مرکز سیم روی قوس همان سرعت پیشروی روی مسیر مستقیم است ولی ناحیه بیرونی سیم روی قوس سرعت بیشتر و ناحیه درونی سرعت کمتری دارد. بنابراین طبق رابطه (۵)، گپ ماشین کاری در هر نقطه از محیط سیم با سرعت خطی و همچنین شعاع مسیر روی آن نقطه رابطه معکوس دارد.

$$g \propto \frac{1}{v} \propto \frac{1}{R} \quad (5)$$

$$\Rightarrow \frac{g_{01}}{g_{02}} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{R_2}{R_1}$$

گپ متوسط خشن کاری،  $\bar{g}_0^{cr}$ ، یا همان متوسط فاصله‌ی بین سیم و قطعه کار روی قوس را می‌توان از رابطه‌ی تقریبی (۶) به دست آورد.

$$\bar{g}_0^{cr} = \frac{g_0^{icr} + g_0^{ocr}}{2} \quad (6)$$

$g_0^{icr}$  فاصله‌ی بین سیم و قطعه کار روی قوس داخلی مسیر (بیشترین گپ ماشین کاری) و  $g_0^{ocr}$  همین فاصله روی قوس خارجی مسیر (کمترین گپ ماشین کاری) است. گپ کناری ماشین کاری در مسیر مستقیم که ناشی از سرعت پیشروی تنظیمی در مرکز سیم است میان این دو گپ قرار دارد. با توجه به یکسان بودن سرعت پیشروی سیم در مسیر مستقیم و سرعت مرکز سیم روی انحنای مرکزی قوس می‌توان به طور تقریبی گپ متوسط ماشین کاری روی قوس را معادل گپ کناری ماشین کاری، در حالتی که سیم مسیر مستقیم را می‌پیماید، در نظر گرفت:

$$\bar{g}_0^{cr} \approx g_0^{st} \quad )$$

(۷) هم‌چنین از رابطه‌ی (۵) نتیجه می‌شود:

$$\frac{g_{01}}{g_{02}} = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow g_0^{icr} (R_c - r_w)$$

$$= g_0^{ocr} (R_c + r_w) \quad (8)$$

با استفاده از روابط (۶) و (۸) می‌توان نتیجه گرفت:

$$\bar{g}_0^{cr} = \frac{g_0^{icr} R_c}{R_c + r_w} = \frac{g_0^{ocr} R_c}{R_c - r_w}$$

و از اینجا می‌توان گپ ماشین کاری قوس داخلی و بیرونی را محاسبه نمود:

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

$$\approx \frac{g_0^{st} (R_c + r_w)}{R_c} \quad (9)$$

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

$$\approx \frac{g_0^{st} (R_c - r_w)}{R_c} \quad (10)$$

### 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 (۹) و (۱۰) می‌توان به ترتیب گپ ماشین کاری 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 (۱۱) بین مقادیر افست، شعاع سیم، گپ ماشین کاری و بار باقیمانده روی قوس محدب برقرار باشد:

$$of_0^{icr} = r_w + g_0^{icr} + y_0^{cr} \quad (11)$$

نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی بیانگر آن است که در برش قوس گوشه رابطه‌ی (۱۱) ارضاء نمی‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که در برش قوس گوشه، سیم به سمت قوس

(۱۲) و با استفاده از مقادیر  $g_0^{st}$  و  $y_0^{cr}$  حاصل از آزمایش‌ها می‌توان برای هر آزمون مقدار  $d^{cr}$  در روی قوس محدب را محاسبه نمود. همچنین کل خطای ماشین‌کاری قوس محدب یا مقعر گوشه نسبت به مسیر مستقیم به ترتیب از رابطه‌ی (۱۴) یا (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$E^{cr} = y_0^{st} - y_0^{cr} \quad (14)$$

$$= d^{cr} + (g_0^{icr} - g_0^{st})$$

$$E^{cr} = y_0^{st} - y_0^{cr} \quad (15)$$

$$= -d^{cr} - (g_0^{st} - g_0^{ocr})$$

جدول (۹) مقادیر  $d^{cr}$ ،  $g_0^{ocr}$ ،  $g_0^{icr}$  و  $E^{cr}$  حاصل از شرایط مختلف آزمون در روی قوس محدب را نشان می‌دهد.

داخلی مسیر (قوس محدب) منحرف می‌شود. بنابراین در برش قوس گوشه، علاوه بر خطای ناشی از گپ غیریکنواخت ماشین‌کاری، خطای انحراف سیم به سمت قوس محدب نیز وجود دارد. این دو عامل سبب کاهش بار باقیمانده در روی قوس محدب و افزایش بار باقیمانده در روی قوس مقعر نسبت به مسیر مستقیم سیم می‌شوند. برای تولید قوس‌های محدب یا مقعر مطلوب رابطه‌ی (۱۱) باید به‌ترتیب به شکل رابطه‌ی (۱۲) یا (۱۳) اصلاح شود:

$$of_0 = r_w + g_0^{icr} + y_0^{cr} + d^{cr} \quad (12)$$

$$of_0 = r_w + g_0^{ocr} + y_0^{cr} - d^{cr} \quad (13)$$

$d^{cr}$  برابر با میزان انحراف سیم به سمت قوس داخلی مسیر (قوس محدب) در راستای شعاعی است. به کمک روابط (۹) و

جدول (۹):  $d^{cr}$ ،  $g_0^{ocr}$ ،  $g_0^{icr}$  و  $E^{cr}$  محاسبه شده برای شرایط مختلف آزمون با افست ۱۹۸ میکرون

	$f$ (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	۲۳/۵	۳۱/۹۴	۱۵/۰۶	۲۱/۵۶	۳۰
۲	۱۳	۱۰	۳۰۰	۲۳/۵	۲۹/۴	۱۷/۶	۲۰/۱	۲۶
۳	۱۳	۱۰	۴۵۰	۲۳/۵	۲۸/۰۳	۱۸/۹۷	۲۱/۴۷	۲۶
۴	۱۳	۱۲/۵	۱۵۰	۱۶/۶۶	۲۲/۶۴	۱۰/۶۸	۱۷/۳۶	۲۳/۳۴
۵	۱۳	۱۲/۵	۳۰۰	۱۶/۶۶	۲۰/۸۴	۱۲/۴۸	۱۸/۱۶	۲۲/۳۴
۶	۱۳	۱۲/۵	۴۵۰	۱۶/۶۶	۱۹/۸۷	۱۳/۴۵	۱۷/۶۳	۲۰/۸۴
۷	۱۳	۱۵	۱۵۰	۱۲/۶۶	۱۷/۲۱	۸/۱۱	۱۹/۲۹	۲۳/۸۴
۸	۱۳	۱۵	۳۰۰	۱۲/۶۶	۱۵/۸۴	۹/۴۸	۱۸/۱۶	۲۱/۳۴
۹	۱۳	۱۵	۴۵۰	۱۲/۶۶	۱۵/۱	۱۰/۲۲	۱۶/۹	۱۹/۳۴
۱۰	۱۸	۱۰	۱۵۰	۲۴	۳۲/۶۲	۱۵/۳۸	۲۳/۸۸	۳۲/۵
۱۱	۱۸	۱۰	۳۰۰	۲۴	۳۰/۰۲	۱۷/۹۸	۲۴/۴۸	۳۰/۵
۱۲	۱۸	۱۰	۴۵۰	۲۴	۲۸/۶۳	۱۹/۳۷	۱۹/۸۷	۲۴/۵
۱۳	۱۸	۱۲/۵	۱۵۰	۱۹/۱۶	۲۶/۰۴	۱۲/۲۸	۲۴/۴۶	۳۱/۳۴
۱۴	۱۸	۱۲/۵	۳۰۰	۱۹/۱۶	۲۳/۹۷	۱۴/۳۵	۲۲/۰۳	۲۶/۸۴
۱۵	۱۸	۱۲/۵	۴۵۰	۱۹/۱۶	۲۲/۸۶	۱۵/۴۶	۲۱/۱۴	۲۴/۸۴
۱۶	۱۸	۱۵	۱۵۰	۱۵/۵	۲۱/۰۷	۹/۹۳	۱۹/۹۳	۲۵/۵
۱۷	۱۸	۱۵	۳۰۰	۱۵/۵	۱۹/۳۹	۱۱/۶۱	۲۰/۶۱	۲۴/۵
۱۸	۱۸	۱۵	۴۵۰	۱۵/۵	۱۸/۴۹	۱۲/۵۱	۲۱/۰۱	۲۴

باقیمانده‌ی یکسانی روی مسیر مستقیم و قوس‌های مختلف گوشه حاصل می‌شود. با تجزیه و تحلیل خطای ماشین کاری قوس محدب ( $E^{CF}$ )، جدول تحلیل واریانس (۱۰) حاصل شده است.

جدول (۹) نشان می‌دهد که خطای ماشین کاری قوس محدب گوشه با فرکانس تخلیه، رابطه‌ی مستقیم و با کشش سیم و شعاع قوس رابطه‌ی معکوس دارد. چنانچه مسیر سیم در روی قوس بر اساس مقدار انحراف محاسبه شده ( $E^{CF}$ ) اصلاح شود بار

جدول (۱۰): تحلیل واریانس (ANOVA) خطای ماشین کاری قوس محدب،  $E^{CF}$

	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
$f$	۱	۵۵/۰۵۵	۵۵/۰۵۵	۵۵/۰۵۵	۱۶/۲۵	۰/۰۱۶
$w_b$	۲	۸۲/۲۰۰	۸۲/۲۰۰	۴۱/۱۰۰	۱۲/۱۳	۰/۰۲۰
$R$	۲	۶۱/۰۰۰	۶۱/۰۰۰	۳۰/۵۰۰	۹/۰۰	۰/۰۳۳
$f \times w_b$	۲	۱۰/۳۴۰	۱۰/۳۴۰	۵/۱۷۰	۱/۵۳	۰/۳۲۲
$f \times R$	۲	۲/۷۷۸	۲/۷۷۸	۱/۳۸۹	۰/۴۱	۰/۶۸۹
$w_b \times R$	۴	۴/۶۶۷	۴/۶۶۷	۱/۱۶۷	۰/۳۴	۰/۸۳۷
Error	۴	۱۳/۵۵۶	۱۳/۵۵۶	۳/۳۸۹		
Total	۱۷	۲۲۹/۵۹۵				
$S = ۱/۸۴۰۸۹$		$R^2 = ٪۹۴/۱۰$		$R^2(\text{adj}) = ٪۷۴/۹۱$		

منحنی در عملیات نیمه‌پرداخت و پرداخت، بار اضافی باقیمانده را در هر دو ناحیه زدود و به دقت زیاد در ماشین کاری یا برش دست یافت. نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

۱- با افزایش کشش سیم و کاهش فرکانس جرقه میزان بار باقیمانده در هر دو محل (مسیر مستقیم و قوس گوشه) افزایش می‌یابد و همواره متغیر کشش سیم موثرتر است. افزایش شعاع قوس بار باقیمانده روی قوس را اندکی افزایش می‌دهد.

۲- شاخص تجربی نسبت بار باقیمانده روی قوس محدب به بار باقیمانده‌ی مسیر مستقیم، روشن نمود که در خشن کاری وایرکات سطح بیشینه کشش سیم و سطح کمینه فرکانس جرقه، کمترین خطای برش را ایجاد می‌نمایند.

۳- محاسبه‌ی مقادیر گپ جانبی ماشینکاری برای شرایط مختلف آزمون در روی مسیر مستقیم آشکار نمود که گپ جانبی ماشینکاری با افزایش فرکانس و کاهش کشش سیم افزایش می‌یابد. گپ ماشینکاری برای نقاط مختلف محیط سیم در روی قوس متفاوت است زیرا 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. این دو سبب کاهش بار باقیمانده در روی قوس محدب و افزایش بار باقیمانده در روی قوس مقعر نسبت به مسیر مستقیم می‌شوند.

جدول (۱۰) نشان می‌دهد که با سطح اطمینان ۹۵ درصد ( $P \leq ۰/۰۵$ )، هر سه متغیر فرکانس جرقه، کشش سیم و شعاع قوس موثر و اثر متقابل آنها غیرموثر هستند. معادله رگرسیونی (۱۶) ارتباط بین پاسخ  $E^{CF}$  با متغیرهای موثر را نشان می‌دهد:

$$E^{CF} = ۳۱/۹۸۵ + ۰/۶۹۹۶ f \quad (۱۶)$$

$$-۱/۰۳۲۷ w_b - ۰/۰۱۵ R$$

در بخش‌های قبل، نمودار اثر مستقیم و اثرات متقابل سه متغیر فرکانس تخلیه، کشش سیم و شعاع قوس بر روی بار باقیمانده روی مسیر مستقیم و قوس محدب گوشه و رویه‌های پاسخ مرتبط با آنها استخراج شد. بر اساس رابطه‌ی (۱۵)، خطای ماشینکاری قوس محدب ( $E^{CF}$ ) برابر با تفاضل بار باقیمانده روی مسیر مستقیم و قوس محدب گوشه است. از این رو، از استخراج نمودارهای مشابه برای پاسخ  $E^{CF}$  خودداری شده است.

## ۶- نتیجه‌گیری

بار باقیمانده و گپ کناری ماشین کاری روی مسیر مستقیم و قوس گوشه در خشن کاری وایرکات و اثر متغیرهای فرکانس تخلیه، کشش سیم و شعاع قوس روی آنها بررسی شد. با اصلاح افست روی قوس کناری بر اساس مقدار خطای محاسبه شده می‌توان میزان بار باقیمانده روی مسیر مستقیم و مسیر یکسان را با یک افست یکسان روی مسیر مستقیم و مسیر

باقیمانده یکسان روی مسیر مستقیم و قوس‌های مختلف گوشه حاصل می‌شود و با یکسان بودن بار باقیمانده می‌توان با یک افسس در مرحله نیمه‌پرداخت و پرداخت، خطای گفته‌شده را هم در مسیر مستقیم و هم در روی قوس از بین برد.

۵- به کمک مقادیر به‌دست‌آمده برای بار باقیمانده روی مسیر مستقیم و قوس محدب گوشه، خطای ماشین‌کاری قوس محدب گوشه برای شرایط مختلف آزمون محاسبه شد و مدل مربوط به آن استخراج شد. بررسی‌ها نشان‌دادند چنانچه مسیر سیم در روی قوس بر اساس مقدار خطای محاسبه شده اصلاح شود بار

## ۷- فهرست نشانه‌ها و اختصارات

نشانه	تعریف انگلیسی	تعریف فارسی	واحد
$A$	Pulse-on time	زمان روشنی پالس	$\mu\text{s}$
Adj MS	Adjusted mean squares	میانگین مربعات تعدیل شده	-
Adj SS	Adjusted sum of squares	مجموع مربعات تعدیل شده	-
$A_j$	Reference average voltage under servo control	ولتاژ سروو (ولتاژ گپ)	v
ANOVA	Analysis of Variance	آنالیز واریانس	-
$C$	Capacitance	ظرفیت خازن	$\mu\text{F}$
Coef.	Coefficient of factor and interaction factor in regression model	ضریب فاکتورهای رگرسیون	-
$d^{cr}$	Wire path deviation in curved corner	انحراف سیم در روی قوس گوشه	$\mu\text{m}$
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	$\mu\text{m}$
F	F-test value	مقدار آماره‌ی F	-
$f$	Number of sparks per second	فرکانس تخلیه	spark/sec
$g$	Spark gap size	گپ ماشینکاری	$\mu\text{m}$
$g_0$	Spark gap size in the roughing pass	گپ ماشینکاری در مرحله خشن‌کاری	$\mu\text{m}$
$\bar{g}_0^{cr}$	Average gap size between wire and workpiece at a curved corner	گپ متوسط ماشینکاری بین سیم و قطعه کار روی قوس	$\mu\text{m}$
$g_0^{st}$	Straight path lateral gap size	گپ کناری ماشینکاری روی مسیر	$\mu\text{m}$

		مستقیم	
$g_0^{icr}$	Inner curved corner gap size	گپ ماشینکاری در ناحیه قوس داخلی مسیر	$\mu\text{m}$
$g_0^{ocr}$	Outer curved corner gap size	گپ ماشینکاری در ناحیه قوس بیرونی مسیر	$\mu\text{m}$
$k_0$	Machining width in a roughing pass	پهنای ماشین کاری در مرحله خشن کاری	$\mu\text{m}$
$k_0^{cr}$	Cutting slot in roughing pass on straight path	پهنای شیار برش در مرحله خشن کاری روی مسیر مستقیم	$\mu\text{m}$
$k_0^{st}$	Cutting slot in roughing pass on curved corner	پهنای شیار برش در مرحله خشن کاری روی قوس گوشه	$\mu\text{m}$
$M$	Machining mode	مد ماشینکاری	-
$of$	Wire offset	افست سیم	$\mu\text{m}$
$of_0$	Wire offset in roughing pass	افست خشن کاری	$\mu\text{m}$
$P$	Probability value	مقدار احتمال	-
$P$	Power available	قدرت تخلیه الکتریکی	A
$r_w$	Wire radius	شعاع سیم	$\mu\text{m}$
$R$	Target corner radius	شعاع هدف گوشه	$\mu\text{m}$
$R_i$	Path inner corner radius	شعاع داخلی مسیر (قوس محدب مسیر)	$\mu\text{m}$
$R_c$	Path central corner radius	شعاع مرکزی مسیر	$\mu\text{m}$
$R_o$	Path outer corner radius	شعاع بیرونی مسیر (قوس مقعر مسیر)	$\mu\text{m}$
$R^2$	R-squared	ضریب تعیین	-
$R^2(\text{adj})$	Adjusted R-squared: correlation coefficient	ضریب تعیین تعدیل شده	-
$S$	Reference speed	سرعت پیشروی	mm/min
$S$	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	Open circuit voltage	ولتاژ مدار باز	v
v	Feed speed	سرعت مماس بر مسیر حرکت	m/min
$w_b$	Wire tension	کشش سیم	N
$w_s$	Speed at which wire is fed through	سرعت تغذیه سیم	m/min
y	Residual material	بار باقیمانده	$\mu\text{m}$
$y_0$	Residual material in roughing pass	بار باقیمانده بعد از مرحله خشن کاری	$\mu\text{m}$
$y_0^{cr}$	Residual material in roughing pass on curved corner	بار باقیمانده بعد از مرحله خشن کاری در روی قوس گوشه	$\mu\text{m}$
$y_0^{st}$	Residual material in roughing pass on straight path	بار باقیمانده بعد از مرحله خشن کاری در روی مسیر مستقیم	$\mu\text{m}$
$y_0$ ratio	Residual material ratio	نسبت بار باقیمانده در روی قوس محدب به بار باقیمانده روی مسیر مستقیم	-

## ۸- مراجع

- electro-discharge machining process”, Int J of Comp Integrated Manufact, 17(5): 413–420, 2004.
- Mingqi, L., Minghui, L., Guangyao, X., [۶] “Study on the Variations of Form and Position of the Wire Electrode in WEDM-HS”, Int J Adv Manuf Technol, 25: 929–934, 2005.
- Sanchez, J. A., Rodil, J. L., Herrero, A., De [۷] 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, 182(1–2): 574–579, 2007.
- Han, F., Zhang, J., Soichiro, I. ,“Corner [۸] error simulation of rough cutting in wire EDM”, Precis Eng, 31(4): 331–336, 2007.
- Han, F., Cheng, G., Feng, Z., Isago, S., [۹] “Thermo- mechanical analysis and optimal tension control of micro wire electrode”, Int J Mach Tools Manuf, 48: 922–931, 2008.
- Dekeyser, W. L., Snoeys, R.,“Geometrical [۱] accuracy of wire-EDM”, 9th Int. Symp. on ElectroMachining (ISEM-9), pp. 226–232, Japan, 1989.
- Hsue, W. J., Liao, Y. S., Lu, S. S.,“A study [۲] of Corner Control Strategy of Wire-EDM Based on Quantitative MRR Analysis”, Int J Elect Machining, No.4, pp. 33-39, 1999.
- Obara, H., Kawai, T., Ohsumi, T., Hatano, [۳] M.,“Combined power and path control method to improve corner accuracy of rough cuts by wireEDM (1st report)”, Int J Elect Machining, 8: 27–32, 2003.
- Obara, H., Kawai, T., Ohsumi, T., Hatano, [۴] M.,“Combined power and path control method to improve report)”, Int J Elect Machining, 8: 33–8, 2003.
- Sanchez, J. A., De Lacalle, L. N. L., [۵] Lamikiz, A. ,“A computer aided system for the optimization of the accuracy of the wire

2008.

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, 50:591–610, 2010. [۱۵]

Jain, V. K., Mote, R. G. ,“On the temperature and specific energy during electro discharge diamond grinding (EDDG)”, Int J Adv Manuf Technol, 26: 56–67, 2005. [۱۶]

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. [۱۰]

ASM Handbook Committee, ASM Handbook Volume 4 Heat Treating, 1991. [۱۱]

User manual ROBOFIL 200, Charmilles Technologies, Switzerland, 1989. [۱۲]

Montgomery, D. C., Design and analysis of experiments, Wiley, New York, 5<sup>th</sup> Ed. 2001. [۱۳]

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, 37: 471–485, [۱۴]

۹- زیر نویس ها

<sup>۱</sup> Electrical Discharge Machining (EDM)

<sup>۲</sup> Dekeyser and Snoeys

<sup>۳</sup> Wire lag

<sup>۴</sup> Enhanced wire vibrations

<sup>۵</sup> Enhanced discharge probability

<sup>۶</sup> power

<sup>۷</sup> Obara et al

<sup>۸</sup> Sharp corner

<sup>۹</sup> Large-radius corner

<sup>۱۰</sup> Small-radius corner

<sup>۱۱</sup> Offset

<sup>۱۲</sup> Charmilles Robofil200

<sup>۱۳</sup> Peacock

<sup>۱۴</sup> Confidence level

<sup>۱۵</sup> Fitted value

<sup>۱۶</sup> Significant

<sup>۱۷</sup> Insignificant

<sup>۱۸</sup> Side over cut