بررسی تاثیر پارامترهای ماشینکاری وایرکات بر نرخ پیشروی و صافی سطح آلیاژ TI-6AL-4V تیتانیم

علیرضا نیکروان[۱]، فرهاد کلاهان[۲]
دانشگاه فردوسی مشهد – دانشکده مهندسی – گروه مکانیک
kolahan@um.ac.ir

چکیده

آلیاژهای تیتانیم بدلیل خصوصیات منحصر بفرد و کاربردهای استراتژیک از جایگاه ویژه ای در صنایع‌مختلف برخوردار هستند. دراین تحقیق اثر پارامترهای ماشینکاری وایرکات (WEDM)، برروی صافی سطح و نرخ برش آلیاژ TI- 6AL-4V بررسی شده است. بمنظور تعیین ارتباط بین پارامترهای ماشینکاری و شاخص های خروجی (نرخ برش و صافی سطح)، تعدادی تست تجربی با استفاده از رویکرد طراحی آزمایشات (DOE) صورت گرفته است. سپس، بر اساس نتایج آزمایشات عملی، مدلسازی ریاضی به روش میانیابی انجام شده و بهترین مدل با استناد بر تحلیل واریانس (ANOVA) و سطح اطمینان ۹۵٪، انتخاب گردیده است. اعتبار مدل ارائه شده، بکمک آزمون فرضیات آماری، صحه‌گذاری و تائید شده است. پس از تایید اعتبار مدل، پارامترهایی که بیشترین اثر گذاری را بر سرعت پیشروی و صافی سطح در فرآیند ماشینکاری وایرکات را دارند، مشخص شدند. با استفاده از مدل ارائه شده میتوان با تغییر مقادیر پارامترهای کنترلی، سطوح مورد نظر از صافی سطح و نرخ پیشروی را در فرآیند ماشینکاری آلیاژ تیتانیم بدست آورد.

واژه های کلیدی: نرخ برش - صافی سطح - طراحی آزمایشات - مدلسازی ریاضی - تحلیل واریانس

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد
۲- استادیار

بررسی تاثیر پارامترهای ماشینکاری وایرکات بر نرخ پیشروی و صافی سطح آلیاژ TI-6AL-4V تیتانیوم

علیرضا نیکروان[1]، فرهاد کلاهان[2]

گروه مکانیک- دانشکده مهندسی – صندوق پستی 1111-91775، دانشگاه فردوسی مشهد

kolahan@um.ac.ir

چکیده:

آلیاژهای تیتانیم بدلیل خصوصیات منحصر بفرد و کاربردهای استراتژیک از جایگاه ویژه ای در صنایع مختلف برخوردار هستند. دراین تحقیق، فرآیند ماشینکاری وایرکات بر روی آلیاژ TI- 6AL-4V بررسی و مدلسازی شده است. روش وایرکات دارای پارامترهای تنظیمی متعددی است که بر خروجی‌های فرآیند موثر می‌باشند. تنظیم تجربی این پارامترها موجب دور شدن از خروجی‌های مطلوب و ناپایداری فرآیند می‌گردد. بنابراین بمنظور ایجاد ارتباط دقیق بین پارامترهای ورودی با خروجی‌های فرآیند، از مدلسازی ریاضی استفاده شده است. در این راستا، ابتدا داده‌های لازم با انجام 54 آزمایش تجربی، طرح ریزی شده با تکنیک طراحی آزمایشات (DOE) به روش تاگوچی، جمع آوری گردیده است. سپس انواع توابع رگرسیونی شامل خطی، مرتبه دوم و لگاریتمی بر این داده‌ها برازش داده شده است. در مرحله بعد، اعتبار این مدل‌ها، بکمک آزمون‌های فرض آماری و تحلیل واریانس، مورد سنج قرار گرفته و مدل مرتبه دوم، که دارای برازش و دقت بالاتری است، بعنوان مدل نهایی فرآیند معرفی گردیده است. بکمک مدل پیشنهادی می‌توان پارامترهایی را که بیشترین اثرگذاری را بر دو خروجی سرعت پیشروی و زبری سطح دارند، مشخص نمود. مدل ارائه شده همچنین قادر است سطوح مورد نظر از زبری سطح و نرخ پیشروی را برای فرآیند ماشینکاری آلیاژ تیتانیم، با توجه به مقادیر پارامترهای کنترلی، بدست آورد.

واژه های کلیدی: ماشینکاری وایرکات- نرخ برش - زبری سطح - طراحی آزمایشات - مدلسازی ریاضی

1- مقدمه

امروزه روش‌های سنتی ماشینکاری برای کار بر روی سوپر آلیاژها و برخی از آلیاژهای غیر آهنی، به بدلیل ویژگی‌های خاص و پیچیدگی خواص این مواد، با مشکلات متعددی مواجه هستند. علیرغم پیشرفتهای چشمگیر در زمینه ماشینکاری، تولید قطعات با کیفیت مناسب و با هزینه پایین از مهمترین مسائل پیش روی صنعتگران است. از جمله اهداف مهم در فرآیندهای ماشینکاری می‌توان به کاهش هزینه‌ها، افزایش سرعت تولید و ایجاد صافی و دقت ابعادی سطح مطلوب اشاره نمود. تامین این اهداف بخصوص در مورد مواد گران قیمت و یا قابلیت ماشینکاری پایین از اهمیت مضاعفی برخوردار است. در این بین آلیاژهای تیتانیم جزء گروه مواد گرانقیمت بوده که با کاربرد در صنایع هوا فضا، نظامی، پزشکی و شیمیایی مورد توجه ویژه محققین قرار گرفته است. اما بدلیل پایین بودن ضریب هدایت حرارتی، بروز ارتعاشات خود بر انگیخته و تمایل به واکنش این آلیاژ با ابزار در حین براده برداری، ماشینکاری آن با روش‌های معمول، دشوار است.

1- دانشجوی کارشناسی ارشد

2- استادیار گروه مکانیک – دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده مسئول)

در این میان، فرآیند ماشینکاری تخلیه قوس الکتریکی (Electro Discharge Machining -EDM) و نوع سیمی آن یا وایرکات (wire cut) ، یکی از بهترین روش‌های شکل دهی این آلیاژها، بخصوص در تیراژهای پایین، است[1و2]. با این حال وایرکات فرآیندی است که در آن تعداد زیادی پارامتر تنظیمی وجود دارد و چگونگی انتخاب سطوح این پارمترها تاثیر بسزایی در سرعت و کیفیت ماشینکاری دارند. از طرفی، در غالب دستگاه‌های موجود وایرکات، جدول تکنولوژی برای تنظیم پارامترهای ماشینکاری آلیاژهای تیتانیم وجود ندارد. در این راستا هدف از انجام این تحقیق، ایجاد دانش فنی ماشینکاری وایرکات آلیاژ (TI-6AL-4V)، با استفاده از رویکرد طراحی آزمایشات و مدل‌سازی ریاضی است. بدین ترتیب با شناسایی و تحت کنترل قراردادن پارامترهای موثرتر بر نرخ برش و زبری سطح، به ترکیب بهینه برای هریک از دو خروجی مزبور می‌توان دست یافت. در ادامه مقاله، ابتدا آلیاژ مورد نظر و اصول حاکم بر ماشینکاری آن به روش وایر کات، معرفی خواهد شد. سپس نحوه طراحی تست های تجربی، که با استفاده از رویکرد طراحی آزمایشات انجام یافته، ارائه می‌گردد. بسط و ارائه مدل ریاضی و بحث بر نتایج حاصل از تحلیل مدل پیشهنادی خاتمه بخش این مقاله هستند.

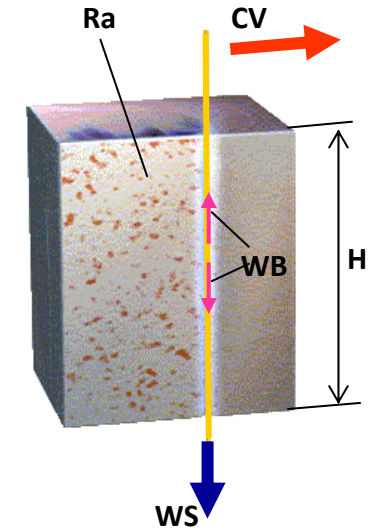
2- معرفی فرآیند وایرکات

در ماشینکاری با تخلیه قوس الکتریکی(EDM) از فرآیندهای مبتنی بر تخلیه انرژی الکتریکی است که عمل براده برداریدر آن بدون اعمال نیروی مکانیکی صورت می گیرد. روش وایرکات یکی از انواع (EDM) است که براده برداری بر اساس تخلیه الکتریکی پالسی بین دو قطب الکتریکی (سیم و قطعه کار)، که در سیال غوطه ورند، صورت می‌گیرد. در هر بار تخلیه الکتریکی (جرقه زنی)، حجم کوچکی از سطح قطعه کار ذوب شده و توسط مایع دی الکتریک از محیط ماشینکاری دور می‌گردد. مایع دی الکتریک معمولاً از آب یا مشتقات نفتی بوده و عمده وظایف آن شامل، متمرکز نمودن جرقه تخلیه الکتریکی، انتقال حرارت و دور کردن ذرات جامد از محل ماشینکاری است. ابزار در این روش به شکل سیم یکبار مصرف است که شکافی را بر اساس پروفیل مورد نیاز در قطعه کار ایجاد می‌نماید.

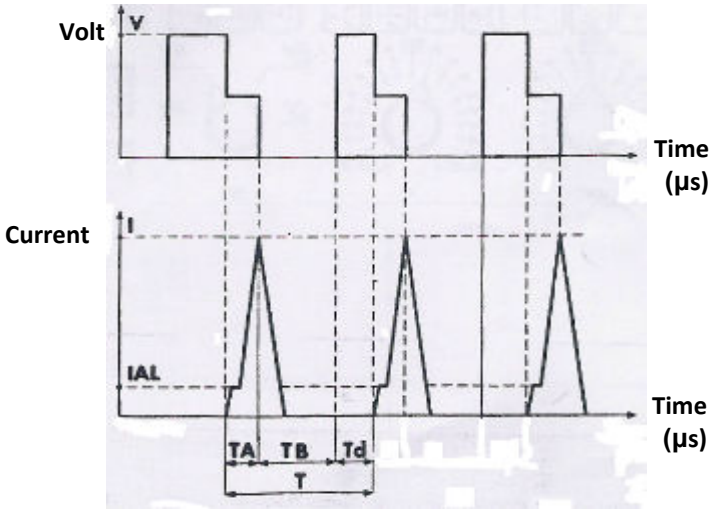
با توجه به مکانیزم برادبرداری، پارامترهای تنظیمی در دستگاه وایرکات به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند. گروه اول پارامترهای مرتبط به منبع تغذیه تولید پالس هستند که سطح توان تخلیه انرژی الکتریکی را تعیین می‌نمایند. دسته دوم پارامترهای کنترلِ حرکت سیم، شامل سرعت و کشش سیم می‌باشند. گروه سوم پارامترهای کنترلی مربوط به سیال دی الکتریک را شامل می‌شوند. در ذیل به معرفی مختصرآنها پرداخته شده است.

- زمان روشنی پالس(TA) : مدت زمانی که جریان الکتریکی بین الکترود و قطعه برقرار است. معمولاً روند افزایشی این پارامتر موجب رسیدن به نرخ برش بالاتر می گردد.
- زمان خاموشی پالس(TB) : مدت زمان بین لحظه خاموش شدن یک پالس تا روشن شدن پالس جدید را بیان می‌کند.
- ولتاژکنترل فاصله (AJ) : این مقدار، میانگین حداقل و حداکثر ولتاژ گپ می باشد که بر اساس آن فاصله بین الکترود (سیم) و قطعه توسط سرو کنترلر در لحظه انجام تخلیه الکتریکی تعیین می شود.
- جریان تخلیه (IAL) : مقدار این پارامتر، شدت جریان تخلیه (جرقه زنی) را نشان می‌دهد.
- سرعت سرو کنترلر (S) : این متغیر سرعت کنترلر، برای جبران فاصله ایجاد شده ناشی از تخلیه الکتریکی، را تنظیم می‌نماید.
- کشش سیم (WB) : نیروی است که به طول درگیری سیم با قطعه اعمال می شود. مقدار کشش سیم بستگی به ارتفاع برش قطعه دارد و با افزایش ارتفاع برش مقدار آن افزایش می یابد.
- سرعت سیم (WS) : طول باز شده الکترود (سیم) از قرقره در واحد زمان است. افزایش غیر ضروری این پارامتر موجب افزایش هزینه ابزار و پایین بودن بیش از آن منجر به بالا رفتن زبری سطح و کاهش میزان پیشروی خواهد شد.
- فشار پاشش (INJ) : فشار مایع دی الکتریک در لحظه خروج از نازل است.
- ارتفاع درگیری (H) : به طول موثر درگیری سیم و قطعه کار اطلاق می‌شود. در امتداد این طول، عمل جرقه زنی و برش قطعه کار انجام می‌گردد.

در شکل 1 و نمودار 1 برخی از پارامترهای تشریح شده در بالا و دو خروجی مورد بررسی را نمایش می دهد



شکل 1- معرفی پارامترهای ورودی و خروجی



نمودار1- مشخصات پالس الکتریکی مولد آیزو پالس در دستگاه

مهمترین شاخصهای عملکردی در ماشینکاری اسپارک و وایر کات زبری سطح (Ra)و سرعت براده برداری یا نرخ پیشروی (Cv) هستند. این معیارها بشدت تحت تاثیر پارامترهای تنظیمی فرآیند قرار دارند[3و4]. بنابراین برای ایجاد ارتباط بین پارامترهای ورودی فوق با دو خروجی نرخ برش و زبری سطح نیاز به مدلسازی دقیق ریاضی می‌باشد. این مدل‌ها بنوبه خود مبتنی بر داده‌های تجربی می باشند. در ادامه به چگونگی طرح ریزی آزمایشات برای جمع‌آوری داده‌های لازم و مدل‌سازی رگرسیونی پرداخته می‌شود.

3- طراحی و اجرای آزمایشات

برای انجام آزمایشات در این تحقیق، یک دستگاه وایر کات چارمیلز مدل robofil 310 با مولد آیزو پالس بکار گرفته شد. نمونه‌ها نیز از جنس آلیاژ TI -6AL-4V با سطح مقطع 10 X 30 و در سه ارتفاع 90،60،30mm تهیه شدند. تعداد آزمایشات و ترکیب سطوح پارامترهای هر آزمایش بوسیله روش تاگوچی تعیین گردید. بمنظور افزایش سطح اطمینان، هر آزمایش دو بار تکرار شده و در هر اجرا طول برش 10mm تنظیم گردید. همچنین الکترود برش سیمی از جنس مس به قطر 0/25 میلیمتر با استحکام کششی 60 N/mm^2 و روکش برنجی بکار گرفته شد. نرخ برش، از تقسیم طول بریده شده قطعه به مدت زمان صرف شده، بر حسب (mm/min) محاسبه گردید.

بعد از اتمام عمل برش نمونه‌ها، میزان زبری سطح نواحی برش خورده بوسیله دستگاه زبری سنج مدل phrto meter با دقت 0/01 میکرون، بر حسب معیار Ra اندازه گیری شدند. برای تعیین زبری هر یک از سطوح مورد آزمایش، اندازه گیری‌ها در سه نقطه در جهت پیشروی و دو نقطه عمود بر جهت پیشروی سیم انجام گرفتند.

3-1- طرح انتخابی و نتایج

برای انجام تستهای عملی از روش طراحی آزمایشات (design of experiment –DOE) استفاده گردید. بطور کلی هدف از طراحی آزمایشات کاهش تعداد تست‌های با اهمیت کمتر و ایجاد یک ارتباط معنی دار بین پارامترهای ورودی و متغیرهای پاسخ با انجام حداقل آزمایش از بهترین ترکیبات سطوح متغییرها می باشد.

سطوح تغییرات پارامترهای مورد آزمایش در جدول (1) ارائه شده‌اند.

جدول1 : پارامترهای بررسی شده و سطوح تغییرات آنها

پارامترهای ورودی										
		H	WB	INJ	WS	S	TA	TB	IAL	AJ
سطوح تغیرات	1	30	0/8	2	6	4	0/6	6	8	30
	2	60	1	3	8	8	0/9	8	16	50
	3	90	1/2	4	10	12	1/2	10	-	70
واحد		mm	kg	bar	m/min	m/min	µs	µs	A	V

در جدول فوق، بعنوان مثال، برای 8 پارامتر تنظیمی تنها با 3 سطح تغییر برای هر پارامتر، تعداد ترکیبات ممکن برابر $(2^1\times3^8)$ عدد، یا 4374 آزمایش خواهد شد، که اجرای این تعداد امکان پذیر نمی باشد. از اینرو در این تحقیق از روش تاگوچی، که با انجام تعداد محدودی آزمایش از بهترین ترکیبات متغییرهای مورد بررسی، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد، استفاده گردید[5]. از میان انواع ماتریس‌های پیشنهادی در روش تاگوچی، ماتریس L_{54} برای طرح ترکیبی $(2^1\times3^8)$ که منجر به انجام 54 آزمایش می‌شود، انتخاب گردید. سطوح تغییرات بهمراه نتایج 5 آزمایش (از مجموع 108 تست انجام گرفته)، بعنوان نمونه، در جدول (2) ارائه شده است.

جدول 2- سطوح متغییرها و نتایج حاصل از انجام آزمایشات

ردیف	متغیرهای ورودی								نتایج انجام آزمایش	
NO	IAL	TA	TB	AJ	S	WS	WB	INJ	Cv	Ra
1	8	0/6	6	30	4	6	0.8	2	1/0445	2/7166
2	8	0/6	8	50	8	8	1.0	3	0/6240	2/4811
3	8	0.6	10	70	12	10	1.2	4	0/1965	2/2726
4	8	0.9	6	50	4	8	1.2	4	1/1295	3/1460
5	8	0.9	8	70	8	10	0.8	2	0/3920	2/9016

2-3 - تحلیل نتایج و طراحی مدل

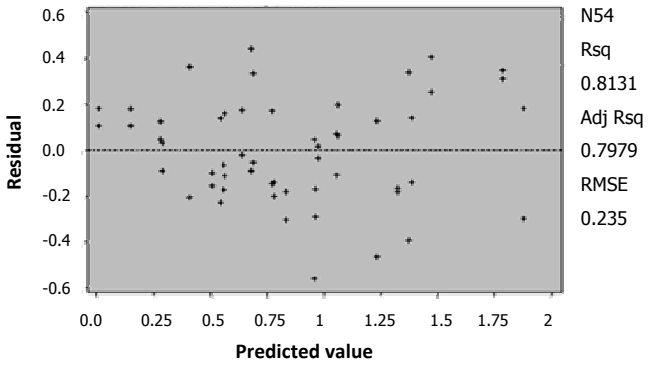
بمنظور مدلسازی فرآیند وایرکات بر روی آلیاژ TI-6AL-4V، توابع مختلف رگرسیونی، شامل توابع خطی، لگاریتمی و توانی، بر داده‌های تجربی حاصل از آزمایشات، برازش داده شد. تهیه مدل‌های ریاضی و تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) در محیط نرم افزار آماری SAS انجام گردید. بمنظور انتخاب مدل مناسب و همچنین تشخیص میزان موثر بودن هر پارامتر، سطح اطمینان 95 ٪ تعیین گردید. نتایج محاسباتی و تحلیل‌های آماری نشان می‌دهند که مدل‌های "توانی مرتبه دوم" بهترین انطباق را بر فرآیند واقعی دارد. شکل نهایی مدل‌های درجه دوم، ارتباط دهنده پارامترهای ورودی به دو خروجیِ نرخ پیشروی و صافی سطح، بصورت زیر است:

$$CV=-1.1029+1.827\,TA+0.0636\,AJ-0.0007AJ^2\ -0.0153\,HTA \quad (1)$$

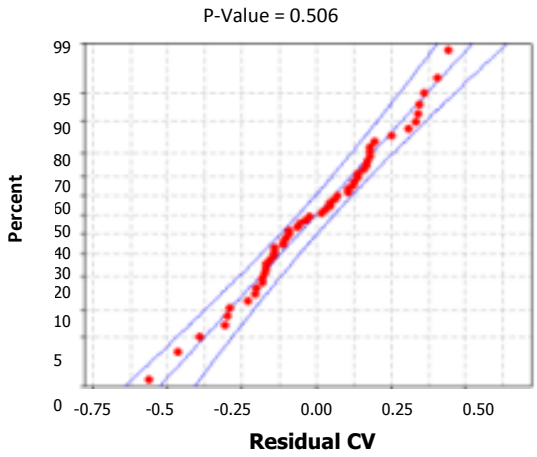
$$Ra=2.0373+1.6577\,TA-0.000059\,H\,AJ-0.0032\,TBWS \quad (2)$$

در این دو مدل از بین 9 پارامترورودی مورد بررسی، فقط 5 پارامتر مشارکت دارند که این بیانگر تاثیر زیاد این پارامترها بر دو خروجی مورد نظر و کم اثری پارامترهای حذف شده می باشد. با دو مدل فوق نیاز به تست‌های عملی مرتفع می گردد، بطوریکه با استفاده از آنها میتوان، برای هر مقدار از پارامترهای تنظیمی، مقادیر خروجی‌های فرآیند ماشینکاری وایرکات این آلیاژ را با دقت بالا پیش‌بینی نمود.

بمنظور اعتبار سنجی مدل‌های پیشنهادی از آزمونهای مستقل بودن، هم واریانس بودن و نرمال بودن باقیمانده‌ها، استفاده گردید[6]. نمودار (2) توزیع باقیمانده‌های (تفاضل مقادیر خروجی واقعی از مقادیر پیش بینی شده با مدلهای پیشنهادی) مربوط به مدل نرخ برش را نمایش می دهد. در این نمودار بدلیل توزیع بدون شکل و یکنواخت باقیمانده ها فرض مستقل بودن و هم واریانس بودن باقیمانده های این مدل کاملا تایید می‌شود. برای کنترل فرض نرمال بودن باقیمانده ها، نمودار احتمال نرمال، در شکل(3) ترسیم شده است . در این نمودار با قرارگیری باقیمانده ها در اطراف خط ایده آل و همچنین بزرگتربودن مقدار شاخص آماری (P-Value) از ضریب ریسک (α=0/05)، نرمال بودن باقیمانده‌ها و انطباق بسیار خوب مدل بر فرآیند واقعی قابل تایید است. آزمون‌های فوق برای مدل زبری سطح (RA) نیز انجام داده شد که با کسب نتایج مشابه منجر به تایید این مدل گردید.

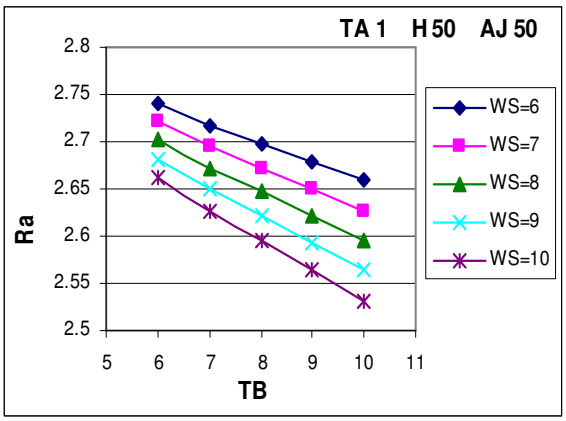


شکل 2- بررسی فرض مستقل بودن و هم واریانس بودن باقیمانده‌ها

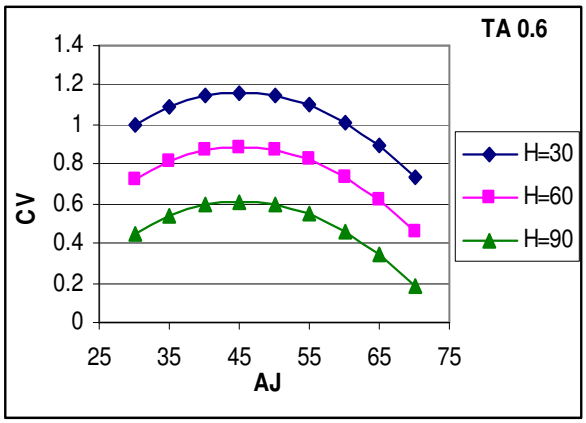


شکل 3- بررسی احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها

با استفاده از مدل‌های ارائه شده، می‌توان نوع و نحوه تاثیر پارامترهای تنظیمی را بر خروجی‌های فرآیند تعیین نمود. به عنوان نمونه، در شکل 4 نحوه تاثیر ولتاژ متوسط گپ (AJ) بر نرخ برش (CV)، برای سه ارتفاع مختلف، نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که بیشترین نرخ برش در ولتاژهای 45 تا 50 حاصل می‌شود. همچنین نمودار 5 تاثیر متقابل زمان خاموشی پالس (TB) و سرعت سیم (WS) را بر زبری سطح نمایش می دهند. با توجه به این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که بطور کلی با افزایش سرعت سیم و زمان خاموشی پالس، زبری سطح کاهش می‌یابد.



شکل 5- تاثیر زمان خاموشی پالس و سرعت سیم بر زبری سطح



شکل4- تاثیر ولتاژ متوسط گپ (AJ) بر نرخ برش

4- نتیجه گیری

در این تحقیق مدل‌های ریاضی، بر اساس انجام آزمایشات عملی طراحی شده به روش تاگوچی، برای نرخ برش و زبری سطح ماشینکاری وایرکات الیاژ TI-6AL-4V ارائه گردید. این مدل‌ها با استفاده از روش آنالیز واریانس (ANOVA) برای سطح اطمینان 95٪ صحه گذاری گردید و بدلیل دقت بیشتر، مدل‌های توانی بعنوان مدلهای برتر فرآیند انتخاب شدند. توسط این مدل‌ها یک ارتباط معنی دار بین متغییرهای تنظیمی و معیارهای عملکردی فرآیند (خروجیها) ایجاد می‌گردد. بررسی‌ها نشان میدهند که تعدادی از پارامترهای مورد آزمایش تاثیر کمتری بر تغییر نرخ پیشروی و زبری سطح در فرآیند وایر کات دارند. بنابراین متغیرهای ورودی TA ، H TA ، AJ به ترتیب بیشترین تاثیر را بر نرخ پیشروی (CV) و پارامترهای TA، H AJ، TB WS، بیشترین تاثیر را بر صافی سطح (Ra) دارند. با تحلیل‌های صورت گرفته و مقدار دهی به پارامترهای موجود در دو مدل نرخ برش و زبری سطح، بر حسب پارامترهای ورودی، نکات ذیل قابل ذکر می باشند:

1- افزایش مقادیر متغیر TA باعث بالا رفتن هر دو خروجی نرخ پیشروی و زبری سطح می شود.

2- افزایش AJ تا 45 در هر مقدار TA، باعث افزایش CV و CV>45 کاهش نرخ برش را به همراه خواهد داشت.

3- افزایش سه پارامتر TB ، WS و AJ (بصورت مستقل از سایر پارامترها) باعث کاهش زبری سطح می‌شوند.

بطور کلی با استفاده از رویکرد پیشنهادی می‌توان تاثیر هر یک از پارامترهای تنظیمی روش وایرکات را بر خروجی‌های مورد نظر بررسی نمود. لازم به ذکر است رویکرد پیشنهادی در این تحقیق را می‌توان در مدل‌سازی سایر فرآیندهای تولیدی و یا سایر مواد مهندسی نیز بکار گرفت.

مراجع

1- Wang, Z.G, wong, Y.S, and Rahman, m., " High speed milling of titanium alloys using binder CBN tools", International journal of Machine tools & manufacture, Vol. 45, pp. 105-114, 2005.

2- Newman, S.T, Rahimifard, S., and Allen, R.D., "State of the art in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)", International journal of machine tools & manufacture, Vol. 44, pp.1247-1259, 2004.

3- Kuriakose, S.H, and Shunmugam,m.s, "Characteristics of wire-electro discharge machined TI6AL4V surface", Materials Letters, pp. 2231-2237, 2004.

6- Robofile.310, wire-EDM of charmilles technologies reference manual , Vol. 2, 1996.

5- Puertas, I., Luis,C.J.,and Alvarez, L., "Analysis of the influence of EDM parameters on surface quality, MRR and EW of wc-co", journal of materials processing technology, Vol. 153, pp. 1026-1032, 2004.

6- Kanlayasiri, k., and Boonmung, S., "An investigation on effects of wire-EDM machining parameters on surface roughness of newly developed DC53die steel", journal of materials processing technology, Vol.187, pp.26-29, 2007.