



## بهینه سازی و ارزیابی آماری تاثیر پارامترهای ماشین کاری وایرکات بر نرخ برش و زبری سطح آلیاژ Ti-6Al-4V تیتانیوم

علیرضا نیکروان<sup>1</sup>، فرهاد کلاهان<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی 91775-1111، kolahan@um.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 اردیبهشت 1394

پذیرش: 06 مرداد 1394

ارائه در سایت: 24 مرداد 1394

کلید واژگان:

نرخ برش

زبری سطح

سیگنال به نویز

آنالیز واریانس

بهینه سازی

### چکیده

کاربرد آلیاژ Ti-6Al-4V، به دلیل ویژگی‌هایی چون نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت به خزش عالی در صنایع گوناگون رو به افزایش است. با این حال سخت بودن براده برداری سنتی آلیاژهای تیتانیوم موجب شده برای شکل‌دهی آن‌ها روش‌های ماشین کاری مخصوص مورد توجه بیشتر قرار گیرند. در این تحقیق فرآیند برش کاری سیمی با تخلیه الکتریکی آلیاژ Ti-6Al-4V بررسی شده است. وجه تمایز این تحقیق، بررسی میزان و نحوه تاثیر 8 پارامتر فرآیند بر دو مشخصه نرخ برش و زبری سطح با در نظر گرفتن تغییر ارتفاع برش می‌باشد. در این راستا 108 داده آزمایشگاهی گردآوری و بر پایه آن‌ها سطح بهینه پارامترها برای نیل به نرخ برش بیشتر و زبری سطح کمتر به کمک تحلیل سیگنال به نویز تاگوشی جداگانه تعیین گردید. اعتبار ترکیب‌های بهینه با انجام تست‌های عملی تایید شد. براساس آنالیز واریانس، زمان روشنی پالس با بیش از 77% تاثیر، موثرترین پارامتر بر زبری سطح، و دو پارامتر زمان روشنی پالس و ولتاژ متوسط ماشین کاری با مجموع بیش از 67% تاثیر، پارامترهای پر اثر بر نرخ برش می‌باشند. به‌طور کلی با کاهش زمان روشنی پالس و شدت جریان و افزایش زمان خاموشی پالس و ولتاژ متوسط، زبری سطح و نرخ برش کاهش می‌یابد. در پایان به کمک بهینه‌سازی دو هدفه، برحسب اهمیت نسبی خروجی‌ها، جدول تکنولوژی برای سه ارتفاع برش ارائه گردید. نتایج مبین آن است که سطح بهینه پارامترها و میزان تاثیر آن‌ها بر نرخ برش و زبری سطح به ارتفاع برش وابسته است.

## Statistical analysis and optimization of process parameters for cutting rate and surface roughness in wire cut machining of Ti-6Al-4V alloy

Ali Reza Nikravan, Farhad Kolahan\*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\*P.O.B. 91775-1111 Mashhad, Iran, kolahan@um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 May 2015

Accepted 28 July 2015

Available Online 15 August 2015

#### Keywords:

Cutting Rate

Surface Roughness

Signal to Noise

Analysis of Variance

Optimization

### ABSTRACT

The applications of Ti-6Al-4V alloy, due to such features as high strength to weight ratio and excellent creep resistance, is increasing in various industries. However, because of the difficulty involved in chip removal of titanium alloys by traditional methods, special machining techniques have attracted more attention. In this study, wire electrical discharge machining process of Ti-6Al-4V alloy has been investigated. The distinct aspect of this research is the consideration of various cutting heights along with the effects of 8 process parameters on the two output characteristics, namely cutting rate and surface roughness. For this, a total of 108 experimental data have been collected and, based on signal-to-noise ratios, separate optimal parameters settings were obtained for maximum cutting rate and minimum surface roughness. The optimization results have been verified against the experimental data. According to analysis of variance, pulse on-time, with 77% contribution, is the most significant parameter affecting surface roughness. While pulse on-time and machining voltage, with combined contribution of 67%, are the most effective parameters for the cutting rate. In general, by decreasing pulse on-time and peak current and increasing pulse off-time and voltage, surface roughness and cutting rate are decreased. Finally, using multi-objective optimization and based on the relative importance of process output characteristics, technology tables for the three investigated cutting heights are presented. The results indicates that, with respect to the surface roughness and cutting rate, optimal parameters levels and their rate of impacts are affected by the cutting height.

### 1- مقدمه

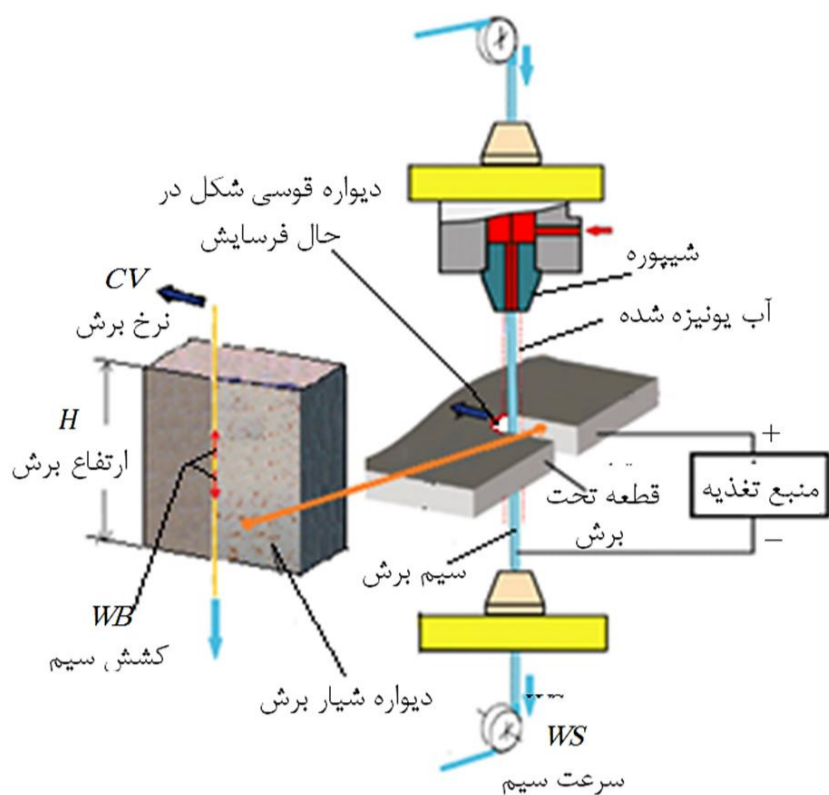
صنعت‌گران است. این دو هدف به خصوص در مورد مواد گران قیمت و با امکان ماشین کاری پایین از اهمیت مضاعفی برخوردار بوده و از طریق بهبود شاخص‌های سطح، افزایش دقت ابعادی و سرعت تولید محقق می‌شوند.

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه ماشین کاری، تولید قطعات با عملکرد مطلوب و قیمت تمام شده پایین از مهمترین اهداف پیش روی

Please cite this article using:

A. R. Nikravan, F. Kolahan, Statistical analysis and optimization of process parameters for cutting rate and surface roughness in wire cut machining of Ti-6Al-4V alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 141-152, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 نمایی از عمل برش سیمی قطعه به روش تخلیه الکتریکی

بهینه سازی پارامترهای تنظیمی، دارای اهمیت به سزایی است. در این راستا، مطالعات متنوعی برای جنبه‌های مختلف برش کاری سیمی با تخلیه الکتریکی انواع آلیاژها انجام شده است.

توسان و همکاران با اجرای طرح آزمایش‌های  $L_{18}(2^1 \times 3^3)$  تاگوچی در برش نمونه‌هایی به ارتفاع 10mm از فولاد آلیاژی استاندارد DIN با مشخصه 42CrMo4، اثر پارامترهای ولتاژ مدار باز، زمان روشنی پالس، سرعت سیم، فشار پاشش دی الکتریک را بر عرض شیار برش و نرخ برداشت براده بررسی نمودند. در این تحقیق توسط آنالیز سیگنال به نویز تاگوچی، ولتاژ مدار باز و زمان روشنی پالس به عنوان پارامترهای پر اثر و سرعت سیم برش و فشار پاشش دی الکتریک پارامترهای کم اثر معرفی شده‌اند. همچنین ترکیب‌های بهینه‌ی پارامترهای تنظیمی، با روش وزن‌دهی به توابع رگرسیونی و اجرای الگوریتم تبرید تدریجی ارائه شده است [7].

کوریاکوز و شان‌ماگام با ارائه دو مقاله، اثر پارامترهای زمان روشنی و خاموشی پالس، ولتاژ متوسط گپ، سرعت سیم، کشش سیم، فشار پاشش دی الکتریک، سرعت پیشروی و شدت جریان جرقه ماشین وایرکات را در مقاله اول بر شاخصه‌های سطح و در مقاله دوم بر نرخ برش و زبری سطح ماشین‌کاری آلیاژ Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار دادند. نتایج هر دو تحقیق بر پایه 18 آزمایش طرح  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$  تاگوچی استوار می‌باشد. در مقاله اول نتایج مبین آن است که از بین پارامترهای مورد بررسی، پارامتر زمان روشنی پالس، سرعت سیم، کشش سیم و زمان خاموشی پالس و فشار پاشش تاثیر بیشتری بر شاخصه‌های سطح برش دارند. همچنین با افزایش زمان روشنی پالس ضخامت لایه اکسیدی افزایش می‌یابد. علاوه بر این گزارش شده که زمان خاموشی پالس مهمترین پارامتر در شکل‌گیری اکسیدهای سطحی می‌باشد. بطوریکه با انتخاب مقدار کم زمان خاموشی پالس، شکل‌گیری لایه اکسیدی سطح در حد قابل توجهی کاهش می‌یابد. دستاورد تحقیق دوم براساس دو تابع رگرسیون خطی نرخ برش و زبری سطح و به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک، ارائه 36 ترکیب بهینه متفاوت از مقادیر پارامترها، با ذکر نرخ برش و زبری سطح هر ترکیب، برای استفاده عملی کاربران می‌باشد [8,9].

پاسام و همکاران، براساس نتایج انجام 27 آزمایش در قالب طرح  $L_{27}(3^8)$  تاگوچی، اثر 8 پارامتر شدت جریان جرقه، زمان روشنی و زمان خاموشی پالس، سرعت پیشروی، ولتاژ متوسط کنترل فاصله سیم با قطعه، فشار

تیتانیوم و آلیاژهای آن با داشتن خواصی چون مقاومت به خوردگی عالی، استحکام به وزن بالا، امکان جوشکاری خوب و استحکام خستگی و کششی رضایت بخش در دمای بالا، به‌عنوان مواد کاری پیشرفته توسعه یافته‌اند. ترکیب منحصر به فرد خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژهای تیتانیوم دلیل کاربرد وسیع آن‌ها در صنعت هوا فضا می‌باشد. تولید ابزارهای جراحی، بخش‌هایی از صنعت نفت، فرآیندهای شیمیایی، صنایع دریایی از دیگر زمینه‌های کاربردی آلیاژهای تیتانیوم به شمار می‌آیند [1]. رایج‌ترین آلیاژ تیتانیوم، Ti-6Al-4V است که برغم خواص عالی اشاره شده، جزء مواد ماشین‌کاری سخت محسوب می‌شود. مدول الاستیسیته پایین، ضریب انتقال حرارت کم، میل به واکنش شیمیایی با ماده ابزار از دیگر خواص آلیاژ Ti-6Al-4V می‌باشند که به ترتیب باعث ایجاد ارتعاش حین براده برداری قطعه همراه با کاهش دقت ابعادی، تمرکز حرارت در لبه برنده همراه با سایش ابزار شده و فرآیند براده برداری را با مشکل مواجه می‌سازد [2,3]. به این دلیل، قطعات تیتانیومی Ti-6Al-4V تولید شده با روش‌های ماشین‌کاری سنتی، معمولاً دارای دقت ابعادی و کیفیت سطح پایینی بوده و هزینه تمام شده بالایی دارند. از این رو روش‌های ماشین‌کاری پیشرفته در اکثر موارد جایگزین مناسبی برای ماشین‌کاری این گونه آلیاژها بوده و به‌صورت روزافزونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از فرآیندهای پیشرفته ماشین‌کاری، برش کاری سیمی با تخلیه الکتریکی (وایرکات<sup>1</sup>) است که امکان براده برداری فرسایشی از قطعات رسانا را دارد. به هنگام براده برداری، الکتروود هیچ تماسی با قطعه نداشته و با تنظیم ولتاژ متوسط ماشین‌کاری، فاصله 0/025-0/05mm بین آن‌ها حفظ می‌شود. الکتروود و قطعه کار دو قطب یک مدار الکتریکی را تشکیل می‌دهند که با اعمال پالس الکتریکی به آن، کانال پلاسما تشکیل شده و تخلیه انرژی (جرقه) از طریق این کانال بر جزء کوچکی از سطح قطعه متمرکز می‌شود. این تخلیه انرژی، باعث ذوب و تبخیر جزء کوچکی از قطعه شده که اندازه این جزء بستگی به سطح انرژی جرقه دارد. بخش ذوب شده به ذرات جامد میکرونی تبدیل و با فشار پاشش سیال دی الکتریک از ناحیه ماشین‌کاری دور و حفره کوچکی در سطح قطعه ایجاد می‌شود. در هر ثانیه هزاران جرقه به واسطه پالس‌های تولید شده توسط مولد ماشین تشکیل و مجموع حفره‌های به جا مانده از هر جرقه موجب فرسایش سطح قطعه می‌شود. در این روش الکتروود (سیم هادی جریان الکتریکی) از جنس مس، برنج یا تنگستن به قطر 0/05-0/3mm است که با سرعتی قابل تنظیم از شیار برش عبور می‌نماید [4,5]. شکل 1، نمایی از فرآیند برش کاری سیمی با تخلیه الکتریکی را نشان می‌دهد.

تولید قطعه با دقت ابعادی بالا و کیفیت سطح قابل کنترل، عدم تاثیر سختی و استحکام قطعه‌ی تحت ماشین‌کاری و انحصاری بودن فرآیند در ایجاد گوشه‌های نسبتاً تیز، از جمله مزیت‌های برش کاری سیمی با تخلیه الکتریکی محسوب می‌گردد [5,6]. با این حال در برش کاری سیمی تعداد زیادی پارامتر با بازه تنظیمی بزرگ وجود دارد که نحوه انتخاب مقدار آن‌ها تاثیر به سزایی در سرعت ماشین‌کاری و صافی سطح نهایی قطعه خواهد داشت. در بسیاری از کاربردهای صنعتی نبود جدول راهنمای تنظیم پارامترها و لحاظ نکردن ارتفاع برش در هنگام تنظیم پارامترها، باعث افت راندمان و کیفیت قطعات تولیدی می‌شود. بنابراین دستیابی به وضعیت مطلوب نرخ برش بالا و صافی سطح پرداخت، با تنظیم تجربی پارامترها میسر نیست. لذا مدل‌سازی فرآیند بر پایه نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و تعیین مقادیر

1- Wire Electro Discharge Machining

زبری سطح و تعیین سطوح بهینه آنها با در نظر گرفتن تغییر ارتفاع برش در ماشین کاری آلیاژ Ti-6Al-4V می باشد.

## 2- مواد و ابزارها

نمونه های آزمایش از آلیاژ تجاری Ti-6Al-4V تیتانیم تولید شده است. قبل از انجام آزمایش ها برای اطمینان از ترکیب شیمیایی، بلوکه خریداری شده با دستگاه کوانتومتر براساس استاندارد ASTM E415 آنالیز گردید. نتایج حاصل از آنالیز، شامل 10 عنصر شیمیایی می باشد که در جدول 1 ارائه شده است. این جدول، صحت آلیاژ را برای انجام آزمایش ها تایید می نماید.

به منظور اندازه گیری دقیق تر نرخ برش و زبری سطح، برای اجرای هر آزمایش 10mm طول برش در نظر گرفته شد. با اختصاص اندازه 30x10mm برای مقطع همه نمونه ها، محیطی 80 میلیمتری حاصل گردید که امکان انجام 8 آزمایش را برای هر ارتفاع برش فراهم می کند (شکل 2).

برای اجرای آزمایش ها، ماشین برش سیمی CNC، 5 محوره چارمیلز مدل روبوفیل<sup>2</sup> 310 بکار گرفته شده است. این ماشین مجهز به دو ژنراتور آیزو فرکانس و آیزوپالس است و امکان تنظیم اکثر پارامترهای فرآیند را دارد. کلیه آزمایش ها با فعال بودن مولد آیزوپالس انجام گردید. انتقال دی الکتریک (آب دی یونیزه) به محل برش در این دستگاه طبق شکل 1، تنها بوسیله نازل هم مرکز با سیم برش بصورت پاششی انجام می شود.

سیم برش نمونه های آزمایش با قطر 0/25mm، استحکام 520 مگا پاسکال، ازدیاد طول 1% از جنس مس با روکش برنجی (CuZn50)، به اسم تجاری بدر<sup>3</sup>، محصول کشور آلمان انتخاب شده است.

## 3- طراحی و اجرای آزمایش ها

در فرآیند برش کاری سیمی با تخلیه الکتریکی 11 پارامتر تاثیرگذار وجود دارد که برحسب نوع ماشین تعدادی از پارامترها توسط اپراتور قابل تنظیم هستند. در این تحقیق تاثیر 8 پارامتر شامل: 3 پارامتر شدت جریان، زمان

پاشش، سرعت سیم و کشش سیم ماشین وایرکات چارمیلز را بر زبری سطح نمونه های تیتانیومی برش خورده با ارتفاع 400mm، بررسی نمودند. در این پژوهش از تابع رگرسیون خطی زبری سطح برحسب 8 پارامتر اشاره شده به عنوان تابع هدف بهینه سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتیجه بهینه سازی بدین صورت گزارش شده که با انتخاب مقدار شدت جریان، زمان روشنی و خاموشی پالس، ولتاژ متوسط کنترل فاصله در سطح کم، سرعت سیم در سطح متوسط و سرعت پیشروی، کشش سیم، فشار پاشش در سطح زیاد، زبری سطح برش به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد [10].

قدسیه و همکاران براساس 11 آزمایش طراحی شده به روش سطح پاسخ، اثر 3 پارامتر زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و شدت جریان الکتریکی ماشین وایرکات سودیک<sup>1</sup> را بر نرخ برش و زبری سطح نمونه های تیتانیومی (Ti-6Al-4V) برش خورده با ارتفاع 10mm مورد بررسی قرار دادند. با آنالیز واریانس گزارش نمودند که پارامتر زمان روشنی پالس بر اندازه عرض شیار جرقه و شدت جریان بر زبری سطح، بیشترین تاثیر را دارند [11].

نوربخش و همکاران با اجرای 18 آزمایش بر مبنای طرح  $L_{18}(2^1 \times 3^6)$  تیگوجی، دریافتند که برای بهبود کیفیت سطح برش خورده آلیاژ Ti-6Al-4V تیتانیم، باید شدت جریان جرقه و زمان روشنی پالس را کاهش و کشش سیم را تا حدی که منجر به پارگی سیم نشود افزایش داد. همچنین با کاهش زمان خاموشی پالس و افزایش شدت جریان جرقه و زمان روشنی پالس، سرعت برش افزایش می یابد. گسیختگی سیم به زمان روشنی و زمان خاموشی پالس، کشش سیم و فشار پاشش دی الکتریک وابسته است [2].

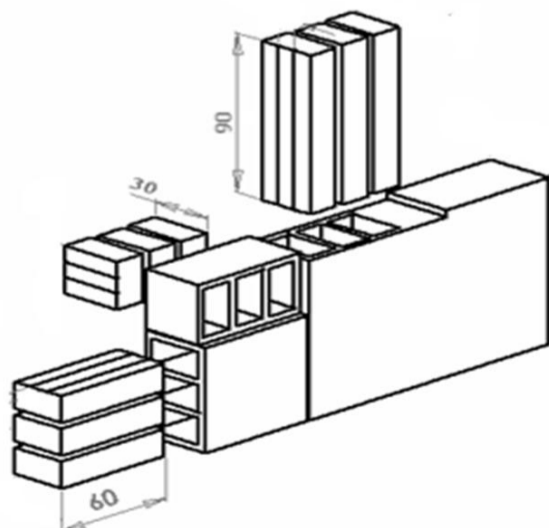
آری کاتلا و همکاران براساس نتایج آزمایش در برش آلیاژ تیتانیم دریافتند که با افزایش نرخ پیشروی، زمان روشنی پالس و شدت جریان جرقه، زبری سطح بیشتر خواهد شد. همچنین با افزایش ولتاژ متوسط کنترل فاصله، سرعت سیم، فشار پاشش دی الکتریک و کشش سیم، زبری سطح کاهش می یابد. در مشاهده های میکروسکوپی سطح گزارش شده که با افزایش زمان روشنی پالس، شدت جریان جرقه و نرخ پیشروی، چاله های به جا مانده از تخلیه الکتریکی افزایش می یابند. اما در صورتیکه ولتاژ متوسط، فشار پاشش دی الکتریک و کشش سیم افزایش یابد، تراکم در واحد سطح چاله های حاصل از تخلیه الکتریکی نیز کاهش می یابد [12].

قدسیه و همکاران اثر زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، شدت جریان جرقه و ولتاژ متوسط کنترل فاصله را بر ضخامت لایه سفید، عرض شیار جرقه، سایش سیم برش و زبری سطح نمونه های تیتانیومی (Ti-6Al-4V) برش خورده با ارتفاع 15mm مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق با انجام 20 آزمایش طراحی شده با سطح کم و زیاد مقادیر پارامترها و 8 آزمایش با سطح مرکزی پارامترها، مدل رگرسیونی مرتبه دوم هر یک از خروجی ها ارائه شده است. براساس نتایج آنالیز واریانس به ترتیب پارامترهای زمان روشنی پالس، شدن جریان جرقه، ولتاژ کنترل فاصله، بیشترین تاثیر را بر زبری سطح برش خورده دارند [13].

به رغم تحقیقات صورت گرفته در برش کاری سیمی آلیاژهای تیتانیم، مواردی همچون عدم تناسب تعداد و بازه پارامترهای مورد مطالعه با آزمایش های انجام شده، نبود تحلیل های آماری کافی به منظور صحت گذاری نتایج و لحاظ نکردن پارامترهای ابعادی قطعه (ارتفاع برش)، در برخی از نتایج گزارش شده، قابل مشاهده است. با توجه به موارد فوق، هدف از انجام این تحقیق، شناسایی دقیق پارامترهای موثر بر دو مشخصه خروجی نرخ برش و

جدول 1 آنالیز درصد وزنی عناصر آلیاژ Ti-6Al-4V تیتانیم

| عنصر | درصد وزنی | عنصر | درصد وزنی |
|------|-----------|------|-----------|
| Al   | 6/3       | Cr   | 0/03      |
| V    | 4/41      | Si   | 0/03      |
| W    | 0/05      | Sn   | 0/02      |
| Fe   | 0/04      | Zr   | 0/01      |
| Cu   | 0/03      | Ti   | باقیمانده |



شکل 2 طرح برش نمونه های آزمایش در 3 ارتفاع

2- Charmillis (Model, Robofil-310)  
3- Bedra

1- Sodac

جدول 4 طرح آزمایش L<sub>18</sub> تاگوچی

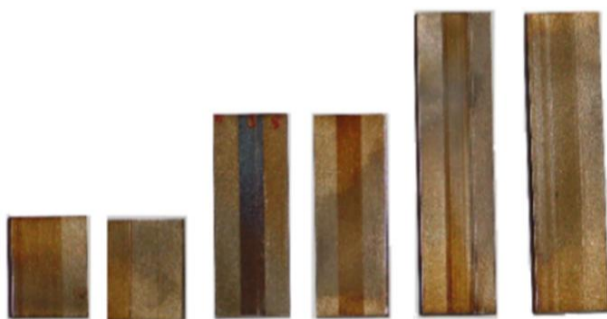
| شماره آزمایش | INJ | WB  | WS | AJ | S  | TB | TA  | IAL |
|--------------|-----|-----|----|----|----|----|-----|-----|
| 1            | 2   | 0/8 | 6  | 30 | 4  | 6  | 0/6 | 8   |
| 2            | 3   | 1   | 8  | 50 | 8  | 8  | 0/6 | 8   |
| 3            | 4   | 1/2 | 10 | 70 | 12 | 10 | 0/6 | 8   |
| 4            | 4   | 1/2 | 8  | 50 | 4  | 6  | 0/9 | 8   |
| 5            | 2   | 0/8 | 10 | 70 | 8  | 8  | 0/9 | 8   |
| 6            | 3   | 1   | 6  | 30 | 12 | 10 | 0/9 | 8   |
| 7            | 4   | 1   | 10 | 30 | 8  | 6  | 1/2 | 8   |
| 8            | 2   | 1/2 | 6  | 50 | 12 | 8  | 1/2 | 8   |
| 9            | 3   | 0/8 | 8  | 70 | 4  | 10 | 1/2 | 8   |
| 10           | 2   | 1   | 8  | 70 | 12 | 6  | 0/6 | 16  |
| 11           | 3   | 1/2 | 10 | 30 | 4  | 8  | 0/6 | 16  |
| 12           | 4   | 0/8 | 6  | 50 | 8  | 10 | 0/6 | 16  |
| 13           | 3   | 1/2 | 6  | 70 | 8  | 6  | 0/9 | 16  |
| 14           | 4   | 0/8 | 8  | 30 | 12 | 8  | 0/9 | 16  |
| 15           | 2   | 1   | 10 | 50 | 4  | 10 | 0/9 | 16  |
| 16           | 3   | 0/8 | 10 | 50 | 12 | 6  | 1/2 | 16  |
| 17           | 4   | 1   | 6  | 70 | 4  | 8  | 1/2 | 16  |
| 18           | 2   | 1/2 | 8  | 30 | 8  | 10 | 1/2 | 16  |

### 3-1- اخذ خروجی ها

در شکل 3 تعدادی از نمونه های حاصل از اجرای آزمایش های جدول 4، نمایش داده شده است. بر روی هر نمونه (مربوط به یکی از سه ارتفاع برش)، 8 آزمایش با طول برش 10mm اجرا گردید. به منظور گردآوری داده های مورد نیاز، نرخ برش و زبری سطح نمونه ها اندازه گیری شد.

با توجه به ثابت بودن ارتفاع برش قطعه در حین ماشین کاری، اندازه سطح برش فقط به طول پیشروی سیم بر واحد زمان وابسته است، بنابراین نرخ برش، به عنوان خروجی فرآیند در نظر گرفته شده است. منظور از نرخ برش (CV) طبق شکل 1، طول برش قطعه در جهت پیشروی سیم در واحد زمان می باشد. با تقسیم طول برش (در این جا 10mm برای هر آزمایش)، به مدت زمان صرف شده برای برش این طول، نرخ برش برحسب mm/min محاسبه شده است. با انجام هر آزمایش جدول 4 و تکرار آن، دو مقدار نرخ برش بدست آمده که میانگین این دو مقدار در جدول 5 ثبت شده است.

زبری سطح نمونه ها با معیار Ra، سنجیده شده است. این خروجی به کمک دستگاه پرتومتر<sup>3</sup> با دقت 0/02 میکرون، ساخت کشور آلمان اندازه گیری شد (شکل 4). سطح برش مربوط به هر آزمایش با حرکت نوک لمس کننده دستگاه زبری سنج در 3 خط موازی با جهت پیشروی سیم و دو خط عمود بر پیشروی (موازی با سیم)، زبری سنجی شده و سپس میانگین 5 عدد به دست آمده به عنوان عدد زبری سطح در جدول 5 گزارش شده است.



شکل 3 تعدادی از نمونه های برش خورده تیتانیومی حاصل از اجرای طرح آزمایش

3- Perthometer (Model SP4)

روشنی و زمان خاموشی پالس (تعیین کننده سطح توان تخلیه انرژی الکتریکی) و 5 پارامتر سرعت پیشروی، ولتاژ متوسط ماشین کاری، نیروی کشش سیم، سرعت عبور سیم، فشار پاشش دی الکتریک در لحظه خروج از نازل، بر نرخ برش و زبری سطح آلیاژ تیتانیوم با در نظر گرفتن تغییر ارتفاع برش مورد بررسی قرار گرفته است. برای پارامتر شدت جریان، 2 سطح و دیگر پارامترها 3 سطح تغییر در جدول 2 تعیین شده است. با پارامتر S، سرعت میز ماشین در جهت پیشروی تنظیم می شود تا فاصله بین سیم با قطعه در حد تعریف شده با پارامتر AJ ثابت بماند [14].

در انجام آزمایش ها علاوه بر 8 پارامتر جدول 2 که در 2 یا 3 سطح تغییر می کنند، برای پارامترهای دیگر فرآیند یک سطح (مقدار ثابت) در نظر گرفته شده است و در جدول 3 به عنوان پارامترهای ثابت معرفی شده اند.

طراحی آزمایش ها<sup>1</sup> روشی برای ارائه مجموعه ای از آزمایش ها است که در این آزمایش ها به طور هدفمند تغییراتی در متغیرهای ورودی یک فرآیند یا یک سیستم ایجاد می شود تا از این طریق، امکان مشاهده و شناسایی تغییرات ممکن در پاسخ خروجی فراهم شود. از جمله روش های طراحی آزمایش ها می توان به عاملی کامل<sup>2</sup>، عاملی کسری، سطح پاسخ، باکس بهنکن و تاگوچی اشاره نمود [15].

در این تحقیق با انتخاب 8 عامل (پارامترهای مورد بررسی)، اجرای آزمایش ها با طرح عاملی کامل، مستلزم صرف هزینه و زمان بسیار بالا می باشد. بنابراین طرح تاگوچی به دلیل امکان ارائه بهترین ترکیب های آزمایش و دستیابی به نتایج قابل قبول با اجرای تعداد محدودتری آزمایش، مورد استفاده قرار گرفت. طبق جدول 2 برای 7 پارامتر با 3 سطح تغییر و یک پارامتر با 2 سطح تغییر (2<sup>1</sup> × 3<sup>7</sup>) و براساس روش تاگوچی ماتریس استاندارد L<sub>18</sub>، در قالب جدول 4 برای انجام آزمایش ها انتخاب شده است.

جدول 4 دارای 18 ردیف است که در هر ردیف، سطح پارامترها برای انجام یک آزمایش تعیین شده است. طرح انتخابی L<sub>18</sub>، به طور جداگانه برای هر یک از 3 ارتفاع برش 60، 30 و 90mm، در 2 تکرار اجرا شده است. بنابراین تعداد کل آزمایش های اولیه برابر با 108 = 2 × 3 × 18، عدد می باشد.

جدول 2 پارامترهای مورد بررسی و سطوح تغییر آن ها

| NO | پارامترهای متغیر در انجام آزمایش ها | نشانه | واحد  | سطوح تغییر پارامتر                           |
|----|-------------------------------------|-------|-------|--|
|    |                                     |       |       | C <sub>1</sub> C <sub>2</sub> C <sub>3</sub> |
| 1  | شدت جریان جرقه                      | IAL   | Amp   | 8 16 -                                       |
| 2  | زمان روشن پالس                      | TA    | μs    | 0/6 0/9 1/2                                  |
| 3  | زمان خاموشی پالس                    | TB    | μs    | 6 8 10                                       |
| 4  | سرعت پیشروی                         | S     | *     | 4 8 12                                       |
| 5  | ولتاژ تنظیم فاصله                   | AJ    | Volte | 30 50 70                                     |
| 6  | سرعت سیم                            | WS    | m/min | 6 8 10                                       |
| 7  | کشش سیم                             | WB    | daN   | 0/8 1 1/2                                    |
| 8  | فشاردی الکتریک                      | INJ   | Bar   | 2 3 4  |

\* مقدار واقعی نرخ پیشروی 7/32mm/min × S می باشد.

جدول 3 پارامترهای ثابت در انجام آزمایش ها

| پارامترهای ثابت   | نشانه پارامتر | واحد  | مقدار |
|-------------------|---------------|-------|-------|
| ولتاژ مدار باز    | V             | Volte | 80    |
| زمان پالس کوتاه   | TAC           | μs    | 0/4   |
| فاصله نازل با سطح | .             | mm    | 5     |

1- Design of Experiment (DOE)  
2- Full factorial

جدول 5 نرخ برش و زبری سطح حاصل از اجرای طرح آزمایش L18 تاگوچی همراه با مقادیر سیگنال به نویز آنها در برش نمونه‌های تیتانیومی با 3 ارتفاع 30، 60، 90 میلی‌متر

| H=30mm               |      |                      |      | H=60mm               |      |                      |      | H=90 mm              |      |                      |      | شماره<br>آزمایش |
|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|-----------------|
| S/N <sub>(Ra)j</sub> | Ra   | S/N <sub>(CV)j</sub> | CV   | S/N <sub>(Ra)j</sub> | Ra   | S/N <sub>(CV)j</sub> | CV   | S/N <sub>(Ra)j</sub> | Ra   | S/N <sub>(CV)j</sub> | CV   |                 |
| -9/53                | 2/99 | 2/411                | 1/32 | -8/61                | 2/69 | 0/18                 | 1/02 | -9/15                | 2/87 | -2/21                | 0/77 | 1               |
| -8/77                | 2/74 | 0/983                | 1/11 | -8/16                | 2/56 | -3/84                | 0/64 | -7/95                | 2/5  | -7/81                | 0/40 | 2               |
| -8/03                | 2/52 | -6/89                | 0/45 | -7/37                | 2/33 | -14/06               | 0/19 | -7/38                | 2/34 | -18/60               | 0/11 | 3               |
| -10/79               | 3/46 | 4/71                 | 1/71 | -10/15               | 3/22 | 1/03                 | 1/12 | -9/57                | 3/01 | -1/79                | 0/81 | 4               |
| -10/14               | 3/21 | -0/07                | 0/99 | -9/88                | 3/12 | -8/23                | 0/38 | -9/24                | 2/9  | -11/98               | 0/25 | 5               |
| -10/08               | 3/19 | -0/17                | 0/98 | -10/42               | 3/32 | -7/96                | 0/39 | -10/04               | 3/17 | -9/97                | 0/31 | 6               |
| -11/70               | 3/84 | 6/56                 | 2/13 | -10/71               | 3/43 | -2/30                | 0/76 | -11/12               | 3/60 | -4/60                | 0/58 | 7               |
| -10/81               | 3/47 | 6/27                 | 2/05 | -11/29               | 3/66 | 1/28                 | 1/15 | -11/44               | 3/73 | -0/51                | 0/94 | 8               |
| -11/28               | 3/66 | 1/89                 | 1/24 | -11/21               | 3/63 | -5/55                | 0/52 | -10/19               | 3/23 | -9/73                | 0/32 | 9               |
| -8/20                | 2/57 | -2/8*                | 0/72 | -8/26                | 2/58 | -9/94                | 0/31 | -7/90                | 2/48 | -14/28               | 0/19 | 10              |
| -8/28                | 2/59 | -2**                 | 0/79 | -9/11                | 2/85 | -3/96                | 0/63 | -9/31                | 2/92 | -13/73               | 0/20 | 11              |
| -8/32                | 2/60 | 1/97***              | 1/25 | -8/53                | 2/67 | -4/72                | 0/58 | -8/12                | 2/54 | -9/10                | 0/35 | 12              |
| -10/62               | 3/39 | -0/54                | 0/93 | -10/10               | 3/20 | -6/09                | 0/49 | -9/50                | 2/98 | -9/74                | 0/32 | 13              |
| -10/13               | 3/21 | 4/67                 | 1/71 | -10/26               | 3/26 | 0/03                 | 1/00 | -10/26               | 3/26 | -3/31                | 0/68 | 14              |
| -9/80                | 3/09 | 5/45                 | 1/87 | -10/41               | 3/31 | -0/49                | 0/94 | -9/28                | 2/91 | -4/17                | 0/61 | 15              |
| -11/47               | 3/74 | 3/97                 | 1/58 | -11/68               | 3/83 | 1/16                 | 1/14 | -11/54               | 3/71 | -4/04                | 0/62 | 16              |
| -12/26               | 4/10 | 3/66                 | 1/52 | -10/62               | 3/39 | -3/72                | 0/65 | -11/06               | 3/57 | -7/87                | 0/40 | 17              |
| -11/86               | 3/92 | 6/41                 | 2/09 | -9/72                | 3/06 | 2/65                 | 1/35 | -11/39               | 3/78 | 0/98                 | 1/12 | 18              |

آزمایش L18، گام دوم (تعیین سطح بهینه پارامترها) و گام سوم (اعتبار سنجی ترکیب بهینه به روش محاسباتی و انجام تست‌های آزمایشی) انجام می‌شود.

در گام دوم از روش تاگوچی، سطح بهینه پارامترها، برای دستیابی به وضعیت مطلوب هر خروجی، با استفاده از مقادیر سیگنال به نویز تعیین می‌شود [16]. بدین منظور ابتدا با توابع زیان، انحراف مقدار خروجی هر آزمایش از مقدار بهینه مربوط به آن خروجی محاسبه می‌شود. در این راستا در صورتیکه، افزایش مقدار خروجی مطلوب باشد، از معیار بزرگتر بهتر ( $L_{HB}$ ) بر طبق رابطه (1) و اگر کاهش مقدار خروجی مطلوب باشد، از معیار کوچکتر بهتر ( $L_{SB}$ ) بر طبق رابطه (2) استفاده می‌شود. بنابراین در فرآیند برش سیمی مقدار تابع زیان برای نرخ برش که افزایش آن مد نظر است از رابطه (1) و برای زبری سطح که کاهش آن مد نظر است از رابطه (2) نتیجه می‌شود.

$$L_{(HB)ij} = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r \frac{1}{y_{ijk}^2} \Rightarrow L_{(HB)1j} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \frac{1}{CV_{jk}^2}$$

$$i = 1 = CV, i = 2 = Ra, j = 1 \dots (l = 18), k = 1 \dots (r = 2) \quad (1)$$

$$L_{(SB)ij} = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r y_{ijk}^2 \Rightarrow L_{(SB)2j} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 Ra_{jk}^2 \quad (2)$$

در روابط (1) و (2)، اندیس  $i$  معرف خروجی فرآیند،  $j$  شمارنده تعداد  $l$  آزمایش،  $k$  شمارنده تعداد  $r$  تکرار هر آزمایش می‌باشد. (در این تحقیق برای هر ارتفاع برش تعداد آزمایش‌ها 18 و تعداد تکرار آزمایش 2 لحاظ شده است). بدین ترتیب، متغیر  $y_{ijk}$  مقدار  $i$  امین خروجی فرآیند مربوط به  $j$  امین آزمایش در  $k$  امین تکرار را بیان می‌نماید.

با جایگزینی مقدار دو خروجی نرخ برش و زبری سطح هر آزمایش به ترتیب در رابطه (1) و (2)، مقدار تابع زیان ( $L_{ij}$ ) مربوط به آن خروجی



شکل 4 دستگاه زبری سنجی نمونه‌های آزمایش

لازم به ذکر است، در اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ها مشاهده شد که میان عدد زبری در دو جهت موازی و عمود بر پیشروی، حداکثر  $10/1 \mu m$  اختلاف وجود دارد.

#### 4- تعیین سیگنال به نویز (S/N) و تحلیل نتایج

در تمامی فرآیندهای تولیدی برای نیل به مقدار مطلوب خروجی‌ها (زبری سطح کمتر، نرخ براده برداری بیشتر، هزینه تولید پایین‌تر و ...) سطح بهینه پارامترهای فرآیند می‌بایست تعیین شود. این هدف با انتخاب یکی از روش‌های بهینه سازی از بین روش‌های متداولی چون الگوریتم‌های فرا ابتکاری (الگوریتم ژنتیک، تبرید تدریجی، ...)، شبکه عصبی یا آنالیز سیگنال به نویز تاگوچی محقق می‌شود. برحسب نوع روش بهینه سازی دقت نتایج به تعداد داده آزمایشی مورد استفاده و انتخاب مناسب کمیت‌های ساختاری آن روش بستگی دارد.

برای انجام بهینه سازی نرخ برش و زبری سطح مربوط به هر ارتفاع برش 36 داده حاصل اجرای 18 ترکیب مستقل آزمایشی (جدول 4) و 18 عدد حاصل از تکرار آن‌ها در اختیار داریم که با این تعداد داده ایجاد تابع هدف ریاضی مورد نیاز الگوریتم‌های فرا ابتکاری بین خروجی و 8 پارامتر با دقت بالا میسر نیست. بنابراین برای تکمیل رویکرد تاگوچی پس از اجرای طرح

باشد.  $l(pq)$ ، جمع آن تعداد از آزمایش‌های انجام شده جدول 5 است که پارامتر  $p$  ام آن‌ها در سطح تغییر  $q$  باشد و  $z$  شمارنده این تعداد آزمایش می‌باشد. بنابراین در رابطه (4)، میانگین سیگنال به نویز مربوط به خروجی  $i$  ام آزمایش‌هایی که پارامتر  $p$  ام آن در سطح  $q$  باشد را مشخص می‌کند. شکل 5 میانگین سیگنال به نویز زبری سطح و نرخ برش را در سطوح هر پارامتر، برای 3 ارتفاع برش 30، 60 و 90mm به صورت نموداری نشان می‌دهد.

برای ترسیم نمودارهای شکل 5، مقابل هر پارامتر 3 خط عمودی با فاصله ثابت ترسیم می‌شود (مانند خطوط عمودی ترسیم شده برای پارامتر  $TA$  در نمودار الف)، ارتفاع خطوط عمودی از چپ به راست به ترتیب میانگین سیگنال به نویز زبری سطح را در سطح 1 ( $C_1$ )، در سطح 2 ( $C_2$ ) و در سطح 3 ( $C_3$ ) پارامتر، تعیین می‌کنند. از اتصال نقطه  $C_1$  به نقطه  $C_2$  و نقطه  $C_2$  به نقطه  $C_3$  دو خط مایل با شیب مثبت یا منفی ایجاد می‌شود. به عنوان نمونه در نمودار الف از شکل 5 شیب سرتاسر مثبت خطوط مایل مربوط به پارامتر  $WS$  به این معنا است که با افزایش مقدار پارامتر، خروجی فرآیند به مقدار بهینه خود نزدیک‌تر می‌شود. بنابراین سطح زیاد  $WS$  ( $C_3$ )، سطح بهینه است. شیب سرتاسر منفی پارامتر  $TA$  در نمودار الف، یعنی این که با افزایش مقدار  $TA$  خروجی زبری سطح از مقدار بهینه خود دور می‌شود و سطح بهینه این پارامتر  $C_1$  است. برای شیب مثبت منفی خطوط مایل مربوط به پارامتر  $AI$ ، سطح متوسط پارامتر ( $C_2$ ) سطح بهینه است. و در حالت شیب منفی مثبت مربوط به پارامتر  $IN$  در نمودار ب از شکل 5، سطح بهینه پارامتر از بین دو سطح  $C_1$  و  $C_3$ ، به دلیل بیشتر بودن میانگین سیگنال به نویز، سطح  $C_3$  انتخاب می‌شود.

به کمک نمودارهای شکل 5، سه موضوع زیر قابل بررسی است.

1) تعیین سطح بهینه پارامترها (2) بررسی نحوه تاثیر گذاری پارامترها بر اساس مثبت و منفی بودن شیب خطوط مورب (3) شدت تاثیر هر پارامتر بر خروجی فرآیند در مقایسه با دیگر پارامترها بر اساس تندی شیب (شیب تند شدت تاثیر بیشتر و شیب کند شدت تاثیر کمتر).

خلاصه نتایج بهینه سازی، شناسایی شش ترکیب بهینه متفاوت از سطوح پارامترها (با کمک نمودارهای شکل 5) برای دو خروجی نرخ برش و زبری سطح مربوط به سه ارتفاع برش 30، 60 و 90mm در جدول‌های 6 و 7 ارائه شده است. هیچ از یک از 6 ترکیب بهینه ارائه شده در جدول‌های 6 و 7، با 18 ترکیب طرح آزمایش  $L_{18}$  تاگوچی جدول 4 یکسان نیستند. بنابراین باید بهبود در نرخ برش و زبری سطح به ازای هر یک از این 6 ترکیب بهینه، نسبت به ترکیب‌های آزمایش جدول 5، مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور خروجی بهینه هر ترکیب جدول 6 و 7 یک بار به کمک روابط (5) تا (7) پیش بینی و بار دیگر با آزمایش عملی اندازه‌گیری و سپس مقایسه می‌شوند.

$$S/N_{(AVE)i} = \frac{1}{l \times r} \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^l S/N_{ijk}$$

$$i = 1 = CV, i = 2 = Ra, j = 1 \dots (l = 18),$$

$$k = 1 \dots (r = 2) \quad (5)$$

$$S/N_{(AVE)ipq} = \frac{1}{r \times l_{(OPT)}} \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^{l_{(OPT)}} S/N_{ijk}$$

$$i = 1 = CV, i = 2 = Ra, P = 1 \dots (n = 8),$$

$$j = 1 \dots l_{OPT}, k = 1 \dots (r = 2) \quad (6)$$

با رابطه 5، میانگین سیگنال به نویز مربوط به خروجی  $i$  ام ( $S/N_{(AVE)i}$ ) جدول 5، تعیین می‌شود. با رابطه (6)، میانگین سیگنال به نویز مربوط به خروجی  $i$  ام،

محاسبه و سپس با رابطه (3)، سیگنال به نویز هر یک از دو خروجی آن آزمایش تعیین و در جدول 5 ثبت شده است.

$$(S/N)_{ij} = -10 \log (L_{ij}) \quad (3)$$

جدول 5 شامل 18 ردیف است که هر ردیف نتایج مربوط به یک آزمایش را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه، در ردیف 1 از جدول 5، 4 عدد اول به ترتیب مقدار نرخ برش، سیگنال به نویز نرخ برش، زبری سطح و سیگنال به نویز زبری سطح، مربوط به آزمایش شماره 1 برای ارتفاع برش 90mm را ارائه می‌نماید. 4 عدد دوم همان مقادیر، مربوط به ارتفاع برش 60mm و 4 عدد آخر مربوط به ارتفاع برش 30mm هستند. برای هر 3 ارتفاع برش (30، 60 و 90mm) در جدول 5، نرخ برش و زبری سطح مربوط به آزمایش ردیف 3 نسبت به دیگر آزمایش‌ها، به ترتیب بیشتر و کمتر است. اما نرخ برش و زبری سطح مربوط به آزمایش ردیف 18 نسبت به دیگر آزمایش‌ها به ترتیب کمتر و بیشتر است. ردیف 3 و 18 در جدول 5 پر رنگ شده‌اند.

مقدار سیگنال به نویز نرخ برش (حاصل از دو رابطه 1 و 3) در جدول 5 مقادیری مثبت و منفی دارند. برای نرخ برش کوچک‌تر از 1، مقدار سیگنال به نویز، عددی منفی و برای نرخ برش بزرگ‌تر از 1 عددی مثبت خواهد شد. در خصوص سیگنال به نویز زبری سطح (حاصل از رابطه 2 و 3)، روند بر عکس توضیح قبلی است. به عنوان نمونه از مقایسه سیگنال به نویز زبری سطح مربوط به ارتفاع برش 30mm، آزمایش‌های 10، 11 و 12 که برحسب بزرگی آن‌ها، با تعداد ستاره بیشتر در جدول 5 مشخص شده‌اند، نتیجه می‌گیریم، اولاً سیگنال به نویز بزرگ‌تر یعنی خروجی بهتر، دوماً "سطح مشخصی از پارامترها در آزمایش 12 نسبت به سطح پارامترها در آزمایش‌های 10 و 11، زبری سطح را به وضعیت مطلوب خود (کاهش هر چه بیشتر زبری) نزدیک‌تر می‌نماید.

#### 4-1- بهینه سازی تک هدفه

در مواقعی که هر یک از شاخص‌های خروجی فرآیند بدون توجه به دیگر شاخص‌ها اهمیت داشته باشد، بهینه‌سازی تک هدفه، سطح بهینه پارامترها را برای ایجاد بهبود در هر شاخص خروجی، جداگانه تعیین می‌نماید.

در این بخش از تحقیق، سطح بهینه پارامترها به طور مستقل برای کاهش زبری سطح و افزایش نرخ برش هر یک از سه ارتفاع برش 30، 60 و 90mm تعیین می‌شود.

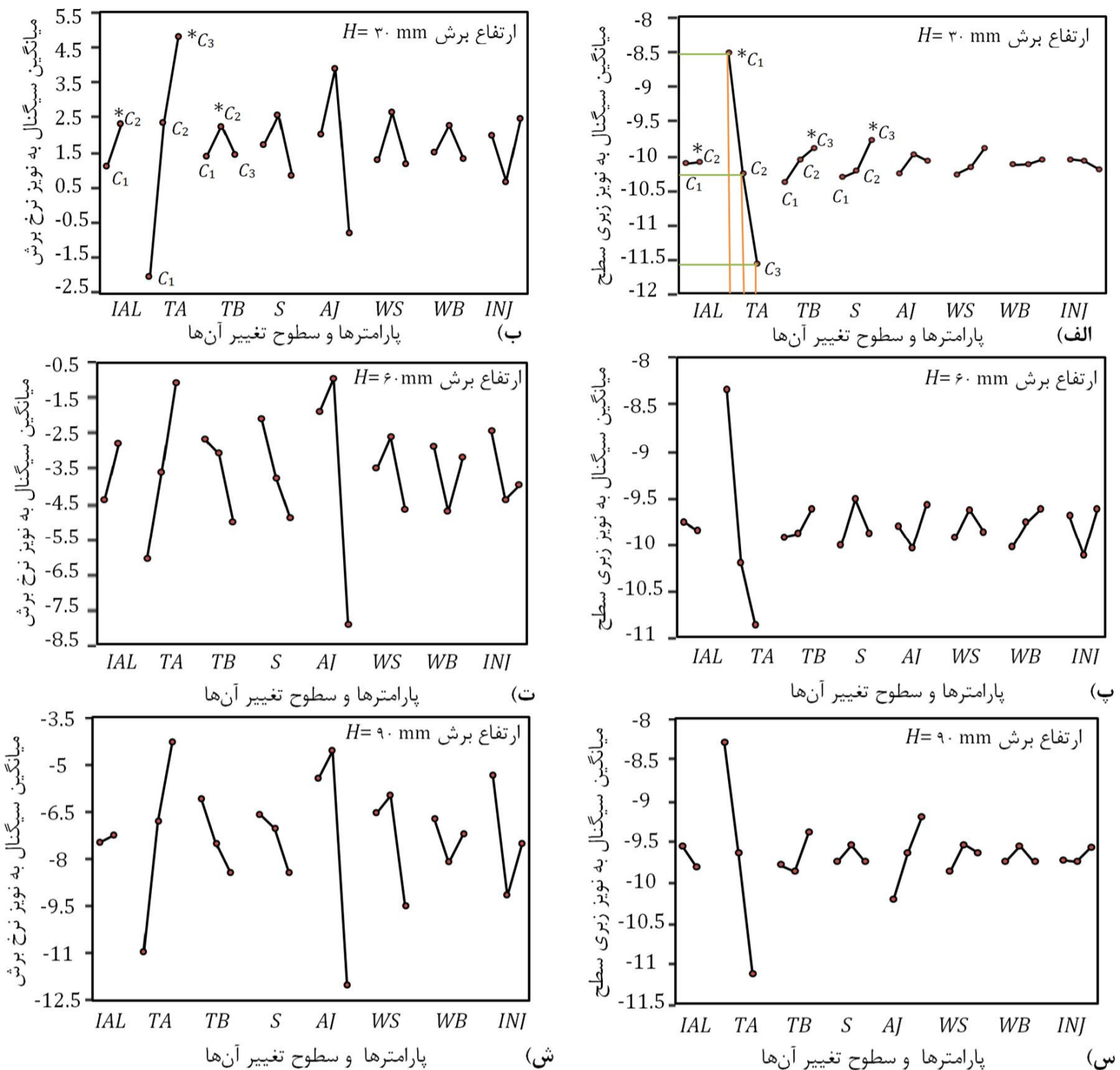
بر اساس روش تاگوچی، به طور جداگانه میانگین سیگنال به نویز هر یک از دو خروجی نرخ برش و زبری سطح فرآیند، به ازای تک تک سطوح تغییر در نظر گرفته شده در انجام آزمایش‌ها مربوط به هر پارامتر محاسبه می‌شود. این کار توسط رابطه (4) و با استفاده از مقادیر سیگنال به نویز ارائه شده در جدول 5، انجام می‌شود. در نهایت، سطحی از هر پارامتر که میانگین سیگنال به نویز خروجی فرآیند به ازای آن، بیشتر از میانگین سیگنال به نویز دیگر سطوح باشد، به عنوان سطح (مقدار) بهینه آن پارامتر انتخاب می‌شود [7، 17]. سطح بهینه انتخاب شده پارامتر، تاثیر بیشتری نسبت به سطوح دیگر پارامتر در رسیدن خروجی فرآیند به وضعیت مطلوب دارد.

$$S/N_{(AVE)ipq} = \frac{1}{r \times l_{(pq)}} \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^{l_{(pq)}} S/N_{ijk}$$

$$i = 1 = CV, i = 2 = Ra, p = 1 \dots (n = 8),$$

$$q = 1 \dots (c = 3), j = 1 \dots l_{(pq)} \quad (4)$$

در رابطه (4)،  $i$  تعیین کننده خروجی فرآیند،  $p$  شمارنده  $n$  پارامتر مورد بررسی،  $q$  شمارنده  $c$  سطح تغییر پارامتر و  $k$  شمارنده  $r$  تکرار آزمایش می‌-



شکل 5 میانگین سیگنال به نویز (S/N) زبری سطح و نرخ برش، در سطوح پارامترها برای سه ارتفاع برش 30، 60، 90 mm

شده، 4/38% مربوط به ترکیب بهینه شناسایی شده برای ارتفاع برش 90mm است. در جدول 7 بیشترین خطای پیش بینی زبری سطح نسبت به مقدار آزمایش شده، 2/7% مربوط به ترکیب بهینه شناسایی شده برای ارتفاع برش 60mm است.

همان طور که از فرآیند بهینه سازی انتظار می رفت، 3 مقدار نرخ برش بهینه مربوط به 3 ارتفاع برش 30، 60، 90mm در جدول 6، نسبت به نرخ برش نظیر خود در ردیف 18 جدول 5، به ترتیب 20%، 11/8% و 1/78، افزایش یافته اند. همچنین 3 مقدار زبری سطح بهینه مربوط به 3 ارتفاع برش 30، 60 و 90mm در جدول 7، نسبت به زبری سطح نظیر خود در ردیف 3 جدول 5، به ترتیب 7/14%، 5/15% و 8/54% کاهش یافته اند.

آن تعداد از آزمایش های جدول 5 که پارامتر P ام آن در سطح بهینه باشد محاسبه می شود. جمع آن تعداد از آزمایش های جدول 5 است که پارامتر p ام آن در سطح بهینه تنظیم شده باشد. با قرارگیری حاصل روابط (5) و (6) در رابطه (7)، مقدار پیش بینی شده سیگنال به نویز مربوط به خروجی i ام فرآیند  $(S/N_{(OPT)i})$ ، به ازای ترکیب بهینه مورد ارزیابی، تعیین می شود [17,18].

$$S/N_{(OPT)i} = (1 - n) \cdot S/N_{(AVE)i} + \sum_{p=1}^n S/N_{(AVE)ip}$$

$$i = 1 = CV, i = 2 = Ra, P = 1 \dots (n = 8) \quad (7)$$

در جدول 6 بیشترین خطای پیش بینی نرخ برش نسبت به مقدار آزمایش

جدول 6 نتیجه بهینه سازی نرخ برش

| میزان زبری سطح (μm)<br>وقتی نرخ برش بهینه است | درصد خطا | نرخ برش بهینه<br>CV(OPT) (mm/min) |        | سطح بهینه پارامترها |     |    |   |    |    |     |     | ارتفاع برش<br>H |
|---|----------|-----------------------------------|--------|---------------------|-----|----|---|----|----|-----|-----|-----------------|
|   |          | پیش بینی                          | آزمایش | IAL                 | TA  | TB | S | AJ | WS | WB  | INJ |                 |
| 3/82  | 2/78     | 2/58                              | 2/51   | 16                  | 1/2 | 8  | 8 | 50 | 8  | 1   | 4   | 30              |
| 3/59  | 1/98     | 1/54                              | 1/51   | 16                  | 1/2 | 6  | 4 | 50 | 8  | 0/8 | 2   | 60              |
| 3/63  | 4/38     | 1/19                              | 1/14   | 16                  | 1/2 | 6  | 4 | 50 | 8  | 0/8 | 2   | 90              |

جدول 7 نتیجه بهینه سازی زبری سطح

| میزان نرخ برش (mm/min)<br>وقتی زبری سطح بهینه است | درصد خطا<br>(E)% | زبری سطح بهینه<br>$Ra_{(OPT)}$ (μm) |        | سطح بهینه پارامترها |     |    |    |    |    |     |     | ارتفاع برش<br>H |
|---|------------------|-------------------------------------|--------|---------------------|-----|----|----|----|----|-----|-----|-----------------|
|   |                  | پیش بینی                            | آزمایش | IAL                 | TA  | TB | S  | AJ | WS | WB  | INJ |                 |
| آزمایش<br>0/98                                    | 1/70             | 2/34                                | 2/3    | 16                  | 0/6 | 10 | 12 | 50 | 10 | 1/2 | 2   | 30              |
| 0/36  | 2/71             | 2/21                                | 2/15   | 16                  | 0/6 | 10 | 8  | 70 | 8  | 1/2 | 4   | 60              |
| 0/08  | 2/3              | 2/17                                | 2/12   | 8                   | 0/6 | 10 | 8  | 70 | 8  | 1   | 4   | 90              |

می‌شود، در صورتی که  $F_{value} > F_{\alpha, f1, f2}$  باشد آن پارامتر به عنوان پارامتر اثرگذار بر زبری سطح، از دیگر پارامترهای کم اثر با علامت ستاره در جدول جدا شده است [7, 15]. هدف دوم مرتب نمودن پارامترهای اثرگذار شناسایی شده از تاثیر بیشتر به تاثیر کمتر می‌باشد. بدین منظور به پارامترهای اثرگذار، به ترتیب بزرگی  $F_{value}$  ستاره بیشتری اختصاص داده شده است.

نمودار پ از شکل 6 پارامترهای ستاره‌دار جدول 8 را همراه با میزان مشارکت آن‌ها نشان می‌دهد. با مراجعه به این نمودار نتیجه می‌گیریم که در بین پارامترهای ستاره‌دار، زمان روشنی پالس با درصد مشارکت بالاتر نسبت به بقیه، در تغییر زبری سطح ارتفاع برش 60mm، موثرترین پارامتر می‌باشد. برای تحلیل واریانس انجام شده، احتمال اشتباه در رد فرض  $H_0$  کمتر از 5 درصد ( $\alpha = 0/05$ ) تعیین شده است، به عبارتی سطح اطمینان در تشخیص معنادار بودن یک پارامتر 95 درصد ( $\alpha = 0/95$ ) است.

همانند آنالیز واریانس سیگنال به نویز زبری سطح مربوط به ارتفاع برش 60mm (ارائه شده در جدول 8)، مقادیر سیگنال به نویز نرخ برش ارتفاع 60mm و مقادیر سیگنال به نویز نرخ برش و زبری سطح مربوط به ارتفاع برش 30 و 90mm موجود در جدول 5، به‌طور جداگانه مورد آنالیز واریانس قرار گرفت و کمترین ضریب تعیین تعدیل شده  $R^2(adj) = 85/3\%$  در تحلیل واریانس سیگنال به نویز زبری سطح ارتفاع برش 90mm بدست آمد. بنابراین می‌توان به نمودارهای میزان مشارکت (میزان تاثیرگذاری) الف تا ش شکل 6، استخراج شده از جداول آنالیز واریانس مربوط به خود اعتماد نمود. لازم به ذکر است در این نمودارها، فقط پارامترهای معنی‌دار در سطح اطمینان 95% و درصد مشارکت آن‌ها نشان داده شده است.

در این بخش از تحقیق نتایج حاصل از بررسی نمودارهای شکل 6 که در زیر با علامت \* مشخص شدند به ارتفاع برش وابسته نیستند (این نتایج برای هر ارتفاع برشی ثابت هستند).

\* در شکل 6 به دلیل اختلاف زیاد میزان تاثیرگذاری 1 یا 2 پارامتر نسبت به دیگر پارامترها بر خروجی فرآیند، 1 پارامتر را اثر گذارترین پارامتر و 2 پارامتر را پارامترهای پراثر معرفی نموده‌ایم. در ادامه برای اشاره به این نوع پارامترها، از واژه پارامترهای با تاثیر غالب استفاده شده است. بر این اساس در شکل 6، پارامتر زمان روشنی پالس (TA) بر زبری سطح اثر غالب دارد. به طوری که سهم تاثیر تنها این پارامتر بر زبری سطح مربوط به سه ارتفاع برش 30، 60 و 90mm به ترتیب 85%، 79% و 77% می‌باشد. همچنین دو پارامتر زمان روشنی پالس (TA) و ولتاژ متوسط ماشین کاری (AJ) بر نرخ برش، اثر غالب دارند. بدین صورت که مجموع تاثیر TA و AJ، بر نرخ برش مربوط به سه ارتفاع برش 30، 60 و 90mm به ترتیب 82/2%، 71/7% و 67/5% می‌باشد. غیر از میزان تاثیر پارامترهای غالب، جمع تاثیر دیگر پارامترهای اثرگذار، بدون احتساب میزان تاثیر خطا، بر زبری سطح حداکثر 10% و بر نرخ برش حداکثر 14/6% می‌باشد.

### 5- تحلیل واریانس و تعیین میزان تاثیر پارامترها

در این بخش از تحقیق با استفاده از ابزار آنالیز واریانس به دنبال شناسایی پارامترهای موثر و تعیین درصد تاثیرگذاری آن‌ها بر دو خروجی، نرخ برش و زبری سطح مربوط به هر یک از سه ارتفاع برش 60، 30 و 90mm می‌باشیم. با آنالیز واریانس سهم تغییر کل مشاهده شده در نتایج آزمایش‌ها، ناشی از سه عامل، اثر اصلی پارامترها، اثر متقابل پارامترها و خطای آزمایش تفکیک و تحلیل می‌شود [19]. در مدل‌های رگرسیونی و آنالیز واریانس یک عامل در صورتی دارای اثر اصلی است که با تغییر سطح آن، میانگین متغیر پاسخ بصورت معناداری تغییر نماید.

برای بررسی اثر پارامترها بر نرخ برش و زبری سطح مربوط به هر ارتفاع برش (30، 60 و 90mm) حداکثر درجه آزادی در اختیار، 17 ( $17 - 1 = 18$ ) تعداد آزمایش‌های مستقل (غیر تکراری) می‌باشد که برای بررسی اثر اصلی، 15 درجه آزادی (جمع درجه آزادی پارامترها) استفاده می‌شود. بنابراین با 2 درجه آزادی باقیمانده ( $2 = 17 - 15$ ) امکان بررسی اثر متقابل پارامترها وجود ندارد. اما بالا بودن مقدار ضریب تعیین تعدیل شده  $R^2(adj)$  در بررسی فقط اثر اصلی پارامترها بیانگر دقت قابل قبول تحلیل واریانس است.

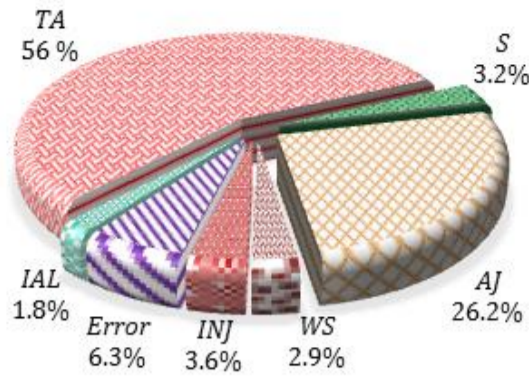
به عنوان نمونه، در جدول 8، نتیجه آنالیز واریانس سیگنال به نویز زبری سطح مربوط به ارتفاع برش 60mm ارائه شده است. ضریب تعیین تعدیل شده  $R^2(adj) = 90/50\%$  در این جدول، بیانگر انطباق مناسب مدل آنالیز واریانس در تحلیل زبری سطح ارتفاع برش 60mm می‌باشد.

به کمک مقادیر  $F_{value}$  موجود در جدول 8 دو هدف را دنبال نموده‌ایم. هدف اول جداسازی پارامترهای اثرگذار بر زبری سطح (در سطح اطمینان 95%)، از پارامترهای کم اثر می‌باشد. برای تحقق این هدف مقدار  $F_{value}$  هر پارامتر با مقدار  $F_{\alpha, f1, f2}$  استخراج شده، بر مبنای ضریب ریسک  $\alpha$ ، درجه آزادی پارامتر ( $f_1$ ) و درجه آزادی خطا ( $f_2$ ) از جدول توزیع F (توزیع فیشر) مقایسه

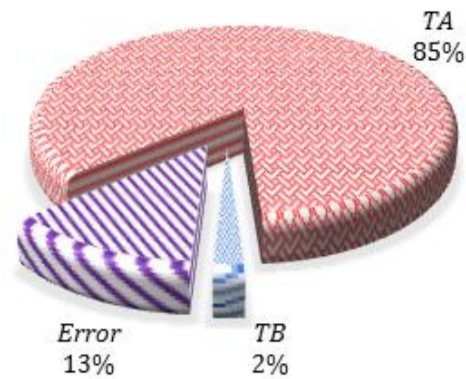
| منبع ایجاد تغییر | درجه آزادی | مجموع مربعات | میانگین مربعات | آماره F | درصد مشارکت |
|------------------|------------|--------------|----------------|---------|-------------|
| IAL              | 1          | 0/0477       | 0/0477         | 0/33    | 0/18        |
| TA****           | 2          | 42/703       | 21/351         | 146/67  | 79/04       |
| TB               | 2          | 0/2245       | 0/1122         | 0/77    | 0/12        |
| S**              | 2          | 2/6585       | 1/3292         | 9/13    | 4/41        |
| AJ               | 2          | 0/9425       | 0/4713         | 3/24    | 1/21        |
| WS*              | 2          | 1/3283       | 0/6640         | 4/56    | 1/93        |
| WB               | 2          | 0/7678       | 0/3839         | 2/64    | 0/88        |
| INJ**            | 2          | 2/071        | 1/0357         | 7/11    | 3/31        |
| Error            | 20         | 2/9116       | 0/1456         |         |             |
| Total            | 35         | 53/655       |                |         |             |

$F_{0.05, 1, 20} = 4/35$        $F_{0.05, 2, 20} = 3/49$        $R^2(adj) = 90/50$

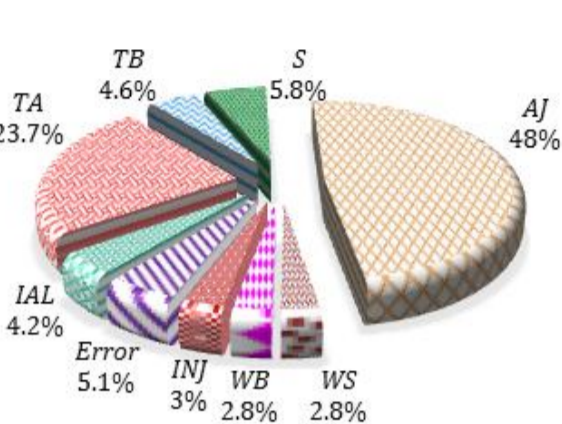




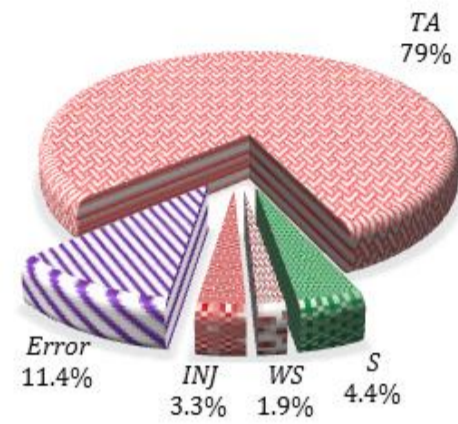
(ب) میزان تاثیر پارامترها بر نرخ برش (ارتفاع برش 30mm)



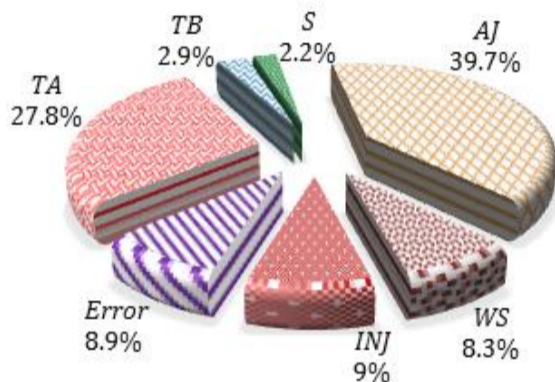
(الف) میزان تاثیر پارامترها بر زبری سطح (ارتفاع برش 30 mm)



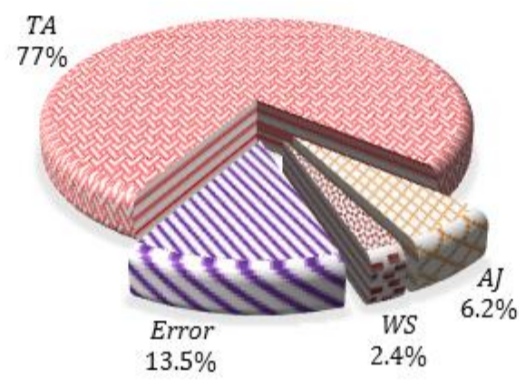
(ت) میزان تاثیر پارامترها بر نرخ برش (ارتفاع برش 60mm)



(پ) میزان تاثیر پارامترها بر زبری سطح (ارتفاع برش 60mm)



(ش) میزان تاثیر پارامترها بر نرخ برش (ارتفاع برش 90mm)



(س) میزان تاثیر پارامترها بر زبری سطح (ارتفاع برش 90mm)

شکل 6 میزان مشارکت پارامترهای معنی دار شناسایی شده با آنالیز واریانس بر نرخ برش و زبری سطح قطعات تیتانیومی برش خورده در سه ارتفاع 30، 60، 90 mm

حفره موجب افزایش زبری سطح می شود.

\* در نمودارهای شکل 6، مشاهده می شود که میزان تاثیر پارامتر ولتاژ متوسط ماشین کاری (AJ)، بر نرخ برش بیش تر از زبری سطح می باشد. علت این مشاهده را می توان چنین بیان نمود. (مراجعه به شکل 1) تغییر پارامتر AJ باعث تغییر فاصله سیم با دیواره قوسی در حال فرسایش می شود. در صورت نزدیک نمودن سیم به دیواره قوسی، عمق حفره های ناشی از تخلیه الکتریکی در جهت پیشروی (موثر در تغییر نرخ برش) بیشتر از عمق حفره های روی سطح کناری شیار برش (موثر در تعیین زبری Ra) خواهد شد.

بر اساس نمودارهای شکل 6، مشخص می شود که جمع میزان تاثیر تمامی پارامترهای اثرگذار بر نرخ برش مربوط به ارتفاع برش 30، 60 و 90mm به ترتیب، 93/7%، 94/9% و 89/9% است. همچنین از نمودارهای الف، پ و س شکل 6، جمع میزان تاثیر پارامترهای اثرگذار بر زبری سطح مربوط به ارتفاع برش 30، 60 و 90mm به ترتیب 87%، 88/6% و 85/6% می باشد. باقیمانده این اعداد تا 100% بیانگر جمع تاثیر پارامترهای کم اثر، خطای آزمایش و اثر متقابل پارامترها می باشد. بالا بودن مجموع میزان تاثیر پارامترها بیانگر دقت مناسب تحلیل های انجام شده است.

نتیجه دیگر حاصل از بررسی شکل 6 این است که میزان تاثیر پارامترهای اثرگذار بر خروجی های فرآیند، به ارتفاع برش وابسته می باشد، یعنی با تغییر ارتفاع برش قطعه تیتانیومی، میزان تاثیر این پارامترها بر نرخ برش و زبری سطح تغییر می نماید. این وابستگی در مورد پارامترهای با تاثیر

در این بخش از تحقیق نتایج حاصل از بررسی نمودارهای شکل 6 که در زیر با علامت \* مشخص شدند به ارتفاع برش وابسته نیستند (این نتایج برای هر ارتفاع برشی ثابت هستند).

\* در شکل 6 به دلیل اختلاف زیاد میزان تاثیرگذاری 1 یا 2 پارامتر نسبت به دیگر پارامترها بر خروجی فرآیند، 1 پارامتر را اثر گذارترین پارامتر و 2 پارامتر را پارامترهای پراثر معرفی نموده ایم. در ادامه برای اشاره به این نوع پارامترها، از واژه پارامترهای با تاثیر غالب استفاده شده است. بر این اساس در شکل 6، پارامتر زمان روشنی پالس (TA) بر زبری سطح اثر غالب دارد. به طوری که سهم تاثیر تنها این پارامتر بر زبری سطح مربوط به سه ارتفاع برش 30، 60 و 90mm به ترتیب 85%، 79% و 77% می باشد. همچنین دو پارامتر زمان روشنی پالس (TA) و ولتاژ متوسط ماشین کاری (AJ) بر نرخ برش، اثر غالب دارند. بدین صورت که مجموع تاثیر TA و AJ، بر نرخ برش مربوط به سه ارتفاع برش 30، 60 و 90mm به ترتیب 82/2%، 71/7% و 67/5% می باشد. غیر از میزان تاثیر پارامترهای غالب، جمع تاثیر دیگر پارامترهای اثرگذار، بدون احتساب میزان تاثیر خطا، بر زبری سطح حداکثر 10% و بر نرخ برش حداکثر 14/6% می باشد.

\* در شکل 6 میزان تاثیر پارامتر زمان روشنی پالس (TA) بر زبری سطح بیشتر از نرخ برش می باشد. علت این مشاهده را می توان چنین بیان نمود. با افزایش TA انرژی تخلیه الکتریکی بیشتر شده و باعث افزایش نیروی ضربه ای وارد بر سطح، و ایجاد حفره های عمیق تر می شود [20]. بنابراین افزایش عمق

$$L_{(mix)j} = w_1 \cdot \frac{\left(\frac{1}{r} \sum_{k=1}^r \frac{1}{cv_{jk}^2}\right)}{\max\left(\frac{1}{r} \sum_{k=1}^r \frac{1}{cv_{jk}^2}\right)} + w_2 \cdot \frac{\left(\frac{1}{r} \sum_{k=1}^r Ra_{jk}^2\right)}{\max\left(\frac{1}{r} \sum_{k=1}^r Ra_{jk}^2\right)} \quad (9)$$

$j = 1 \dots (l = 18)$

در ادامه روند بهینه سازی دو هدفه، سیگنال به نویز ترکیبی مربوط به هر آزمایش، به کمک رابطه (10) محاسبه و سپس با تعیین میانگین سیگنال به نویز در سطوح مختلف هر پارامتر از رابطه (11)، سطحی از هر پارامتر که از میانگین سیگنال به نویز بالاتری برخوردار باشد، به عنوان سطح بهینه آن پارامتر معرفی می شود.

$$S/N_{(mix)j} = -10 \log L_{(mix)j} \quad (10)$$

$$S/N_{(AVE)pq} = \frac{1}{l(pq)} \sum_{j=1}^{l(pq)} S/N_{(mix)j}$$

$$p = 1 \dots (n = 8), \quad q = 1 \dots (c = 3), \quad j = 1 \dots l(pq) \quad (11)$$

در رابطه 11،  $S/N_{(AVE)pq}$  میانگین سیگنال به نویز آن تعداد از آزمایش های جدول 5 است که پارامتر p ام آنها در سطح q باشد. اندیس P شمارنده n پارامتر، q شمارنده C سطح تغییر هر پارامتر می باشند.  $l(pq)$  جمع آن تعداد از آزمایش های جدول 5 است که پارامتر p امشان در سطح تغییر q باشد و j شمارنده آن تعداد آزمایش می باشد. با تعیین سطح بهینه 8 پارامتر تنظیمی ترکیب بهینه نسبی برای درصد اهمیت مشخصی از  $W_1$  و  $W_2$  معرفی می شود. نتیجه ی تغییر در ضرایب وزنی خروجی ها با گام 10%، دستیابی به 6 ترکیب بهینه نسبی متفاوت، برای هر یک از 3 ارتفاع برش 60، 30mm و 90 موجود در جدول های 9، 10 و 11 می باشد. در این جدول ها ترکیب بهینه ردیف 1، برای درصد اهمیت های  $W_1=1$  و  $W_2=0$ ، معرف حداکثر اهمیت نرخ برش و حداقل اهمیت زبری سطح می باشد، همچنین ردیف آخر جدول 9، 10 و 11 برای درصد اهمیت های  $W_1=0$  و  $W_2=1$ ، معرف حداقل اهمیت نرخ برش و حداکثر اهمیت زبری سطح است. به عبارتی با صفر شدن یکی از دو ضریب وزنی  $W_1$  و  $W_2$ ، بهینه سازی دو هدفه تبدیل به بهینه سازی تک هدفه می شود و این موضوع از یکسان بودن ترکیب های ردیف های اول و آخر جدول های 9، 10 و 11 به ترتیب با سه ترکیب موجود در جدول های 6 و 7 قابل مشاهده است.

در جدول های 9، 10 و 11، ضریب  $W_1$  در هر ردیف بیانگر این است که ترکیب بهینه ی پارامترها در آن ردیف به ازای چه مقداری از اهمیت نسبی نرخ برش ( $W_1$ ) و زبری سطح ( $W_2 = 1 - W_1$ ) استخراج شده است. بر این اساس و یادآوری این که تغییر ضریب اهمیت خروجی ها با گام 10% صورت گرفته است، به عنوان نمونه ردیف 1 از جدول 9 مقدار  $W_1 (0/8-1)$  شامل 3 ترکیب از اهمیت نسبی خروجی ها به ترتیب ( $W_2 = 0/2$  و  $W_1 = 0/8$ )، ( $0/1$  و  $W_2 = 0/9$  و  $W_1 = 0$ )، ( $W_1 = 1$  و  $W_2 = 0$ ) می باشد. یعنی این که به ازای 3 ترکیب مختلف از اهمیت نسبی خروجی ها یک ترکیب بهینه ثابت بدست آمده است.

جدول های 9، 10 و 11 به عنوان جدول های تکنولوژی کاربر در برش - کاری سیمی با تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم مورد استفاده قرار می گیرند. مقدار نرخ برش و زبری سطح مربوط به هر ترکیب با انجام عمل برش روی ارتفاع مربوطه اندازه گیری و در دو ستون آخر جدول ها، مقابل ترکیب ثبت شده است. کاربر برحسب ارتفاع برش مورد نظر به جدول مربوطه مراجعه و ترکیب بهینه متناظر با نرخ برش و زبری سطح دلخواه خود را انتخاب می نماید. از مقایسه ترکیب های بهینه جدول های راهنما به ازای ضریب وزنی

غالب بیشتر می باشد. به عنوان مثال، از مقایسه دو نمودار ب و ش از شکل 6 مشاهده می شود، با تغییر ارتفاع برش از 30mm به 90mm، میزان تاثیر پارامتر زمان روشنی پالس (TA) بر نرخ برش از 56% به 27% کاهش می یابد. با استناد به نمودارهای شکل 4 مشاهده می شود از بین 3 سطح تغییر 6، 8 و 10m/min در نظر گرفته شده برای سرعت سیم (WS)، مقدار 8m/min بیشترین تاثیر مثبت را بطور همزمان در افزایش نرخ برش و کاهش زبری سطح دارد. بنابراین در صورت افزایش سرعت سیم بیش از مقدار اشاره شده (8m/min)، هزینه ماشین کاری بی دلیل افزایش می یابد.

افزایش فشار پاشش دی الکتریک (IN) باعث کاهش نرخ برش می شود علت این نحوه تاثیر گذاری را می توان چنین تفسیر نمود. در دستگاه های وایرکاتی که فقط به سیستم پاششی مجهز می باشند، افزایش فشار ممکن است موجب ناپایداری فرآیند تشکیل جرقه و عدم تمرکز تخلیه الکتریکی بر سطح برش گردد. به طور عکس افزایش فشار پاشش معمولاً باعث بهبود صافی سطح می شود.

با افزایش مقدار کشش سیم (WB)، ارتعاش ناشی از نیروهای الکترواستاتیک و الکترومگنتیک در هنگام تخلیه الکتریکی کمتر شده که این امر منجر به بهبود صافی سطح می شود [14]، (نمودارهای الف، پ و س از شکل 5 این موضوع را تایید می کنند). البته این نکته را باید مد نظر قرار داد که در ارتفاع برش زیاد، با افزایش کشش امکان گسیختگی سیم بیشتر می شود.

## 6- بهینه سازی دو هدفه

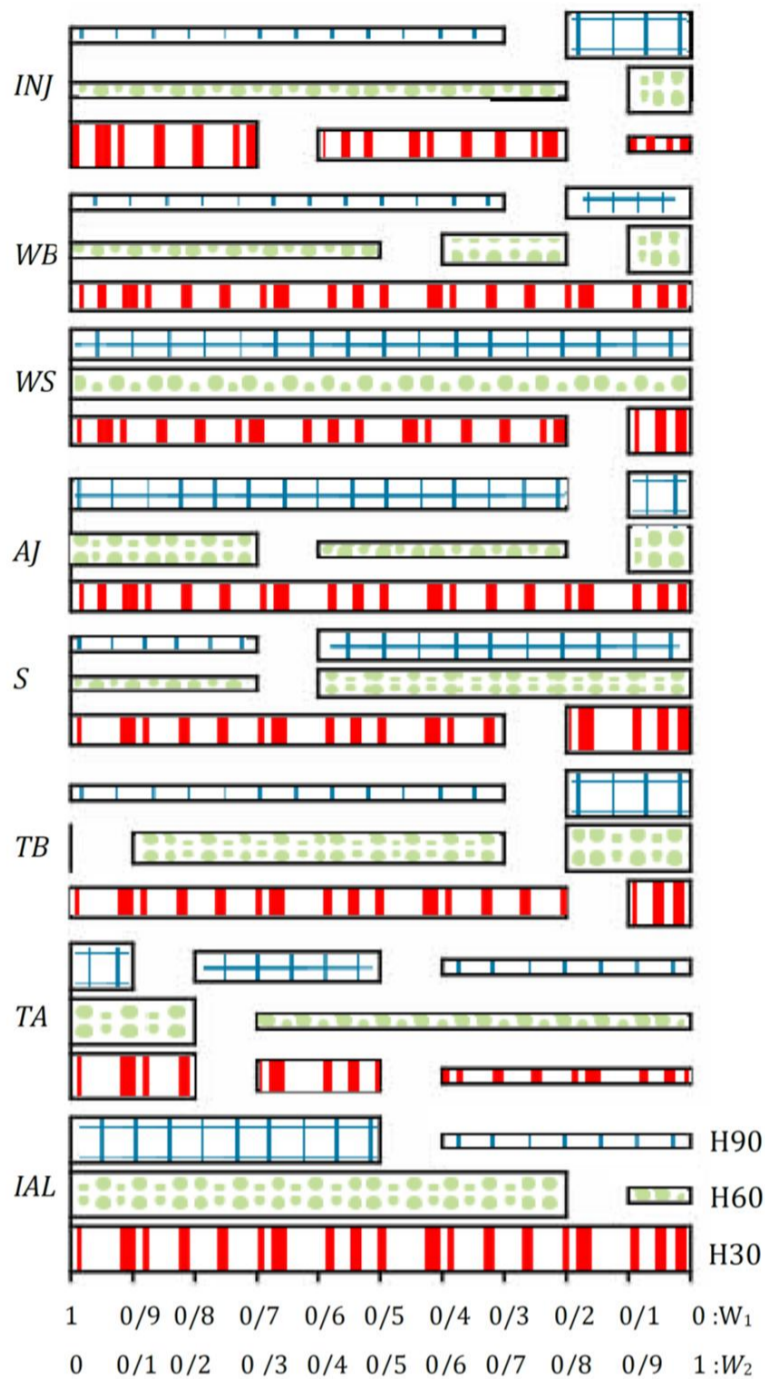
در بسیاری از فرآیندها، مجموعه ای از مشخصه های کیفی می بایست همزمان در نظر گرفته شوند. در برش کاری سیمی با تخلیه الکتریکی دو مشخصه زبری سطح و نرخ برش به ترتیب مبین کیفیت سطح نهایی قطعه تولید شده و هزینه ماشین کاری می باشند. بنابراین باید مقادیر مناسب پارامترهای تنظیمی براساس اهمیت نسبی این خروجی ها در مراحل مختلف تولید قطعه تعیین شوند. این امر لزوم بهینه سازی ترکیبی را توجیه می نماید.

صافی سطح و نرخ برش در فرآیند برشکاری سیمی با تخلیه الکتریکی رابطه ای متضاد دارند. به عبارتی بهینه نمودن هر یک از شاخص های خروجی باعث افت شاخص دیگر می شود. برای اثبات این موضوع، به عنوان نمونه در برش ارتفاع 30mm، نرخ برش و صافی سطح به ازای ترکیب ردیف 1 جدول 6 نسبت به ترکیب 1 جدول 7، به ترتیب 61% بیشتر و 63% کمتر می باشد. این الگو برای سایر ترکیب های دو جدول مشاهده می شود. برای مواجهه با این چالش از روش های بهینه سازی چند هدفه می توان استفاده نمود. وزن دهی خطی یک روش کارآمد برای تعیین اهمیت نسبی اهداف چندگانه در بهینه سازی است.

در روش وزن دهی خطی برحسب نیاز کاربر، اهمیت نسبی نرخ برش ( $W_1$ ) و زبری سطح ( $W_2$ ) (با توجه به،  $W_1+W_2=1$ ) در مقادیر زیان مربوطه (روابط 1 و 2) لحاظ شده اند. بدین ترتیب، ترکیب مقادیر زیان نرمال شده هر دو خروجی به صورت یک کمیت واحد با رابطه (8) قابل محاسبه است. در این رابطه  $L_{ij}$  زیان نرمال شده زامین آزمایش، مربوط به ا امین خروجی می باشد.

$$L_{(mix)j} = \sum_{i=1}^l (w_i \cdot L_{ij}) = (w_1 \cdot \text{normalize } L_{(CV)j}) + (w_2 \cdot \text{normalize } L_{(RA)j}) \quad (8)$$

با جایگزینی  $L_{ij}$  از رابطه (1) و (2)، در رابطه (8) و بسط آن رابطه (9) حاصل می شود.



شکل 7 مقدار بهینه پارامترها بر حسب تغییر ضرایب اهمیت نرخ برش و زبری سطح، برای سه ارتفاع برش 30، 60، 90 میلی متر  
 2 و 3 (بیشترین مقدار) پارامتر را نشان می دهند. به عنوان نمونه، سه نوار پایینی این نمودار با طرح زمینه متفاوت سطح بهینه پارامتر شدت جریان (IAL)، را به ترتیب از پایین به بالا برای ارتفاع 30، 60 و 90mm بر حسب درصد اهمیت نسبی خروجی ها مشخص می نمایند. بر این اساس برای ارتفاع برش 30mm، سطح بهینه شدت جریان (IAL) با تغییر درجه اهمیت خروجی ها در مقدار 16 آمپر ثابت می ماند، اما در ارتفاع برش 60mm، در دو بازه تغییر  $W_1$ ، 0 تا 0/1 و 0/2 تا 1، مقدار IAL به ترتیب از سطح کم (8 آمپر) به سطح زیاد (16 آمپر) تغییر می نماید.

### 7- نتیجه گیری

در این تحقیق نحوه تاثیرگذاری 8 پارامتر از فرآیند برش کاری سیمی با تخلیه الکتریکی را بر دو خروجی نرخ برش و زبری سطح آلیاژ استراتژیک Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار گرفت. وجه تمایز این پژوهش، بررسی اثر تغییر ارتفاع برش در میزان و نحوه تاثیرگذاری پارامترها بر زبری سطح و نرخ ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم می باشد. نتایج نشان می دهد که هم میزان تاثیر پارامترها و هم سطح بهینه آنها به ارتفاع برش وابسته است.

برای هر 3 ارتفاع برش (30، 60 و 90mm) از میان 8 پارامتر مورد بررسی، پارامتر زمان روشنی پالس (TA) بدلیل تاثیر بیش از 77%، اثرگذارترین پارامتر بر زبری سطح و دو پارامتر TA و ولتاژ متوسط ماشین کاری (AJ) با مجموع تاثیر بیش از 67/5% پارامترهای پر اثر بر نرخ برش

یکسان، نتیجه می گیریم که ارتفاع برش در تعیین سطوح بهینه نسبی پارامترها هم، موثر است. به عنوان نمونه از مقایسه ترکیب های بهینه ردیف 5 جدول های 9، 10 و 11 به ازای  $W_1=0/2$  و  $W_2=0/8$ ، مشاهده می شود که پارامترهای فشار پاشش (INJ)، ولتاژ متوسط کنترل فاصله (AJ)، سرعت پیشروی (S)، زمان خاموشی پالس (TB) و شدت جریان تخلیه (IAL)، مقدار بهینه ثابتی برای، سه ارتفاع برش ندارند.

در این بخش از تحقیق براساس نتایج حاصل از بهینه سازی دو هدفه نمودار نحوه تغییر مقدار بهینه پارامترها، با توجه به اهمیت نسبی ( $W_i$ ) مشخصه های خروجی مورد مطالعه، در شکل 7 ارائه شده است.

این شکل یک جمع بندی جامع و فشرده از نتیجه ی بهینه سازی ترکیبی نرخ برش و زبری سطح در فرآیند برش کاری سیمی با تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم را با در نظر گرفتن تغییر ارتفاع برش نشان می دهد. در محور افقی شکل 7، 11 ترکیب از اهمیت نسبی نرخ برش ( $W_1$ ) و زبری سطح ( $W_2$ ) وجود دارد. محور عمودی نشان دهنده پارامترهای مورد بررسی است که در مقابل هر یک، سه ردیف نوار افقی با طرح زمینه متفاوت مربوط به سه ارتفاع برش (30، 60، 90) دیده می شود. سطح بهینه پارامترها با تغییر در ضخامت نوارها نشان داده شده است. رابطه بین عرض نوارها و سطوح تغییر پارامتر به این صورت است که نوارهای با عرض باریک سطح 1 (کمترین مقدار) پارامتر، و نوارهای با عرض متوسط و زیاد به ترتیب نشان دهنده سطح

جدول 9 راهنمای انتخاب ترکیب بهینه پارامترهای فرآیند در برش ارتفاع 30mm

| Ra   | CV   | IAL | TA  | TB | S  | AJ | WS | WB  | INJ | $W_1$ | $W_2$ | NO |
|------|------|-----|-----|----|----|----|----|-----|-----|-------|-------|----|
| 3/82 | 2/51 | 16  | 1/2 | 8  | 8  | 50 | 8  | 1   | 4   | 0/8   | -     | 1  |
| 3/32 | 2/05 | 16  | 0/9 | 8  | 8  | 50 | 8  | 1   | 4   | 0/7   | -     | 2  |
| 3/25 | 1/80 | 16  | 0/9 | 8  | 8  | 50 | 8  | 1   | 3   | 0/5   | - 0/6 | 3  |
| 2/64 | 1/27 | 16  | 0/6 | 8  | 8  | 50 | 8  | 1   | 3   | 0/3   | - 0/4 | 4  |
| 2/41 | 1/18 | 16  | 0/6 | 8  | 12 | 50 | 8  | 1   | 3   | 0/2   | -     | 5  |
| 2/1  | 1/06 | 16  | 0/6 | 8  | 12 | 50 | 10 | 1   | 2   | 0/1   | -     | 6  |
| 2/34 | 0/98 | 16  | 0/6 | 10 | 12 | 50 | 10 | 1/2 | 2   | 0     | -     | 7  |

جدول 10 راهنمای انتخاب ترکیب بهینه پارامترهای فرآیند در برش ارتفاع 60 mm

| Ra   | CV   | IAL | TA  | TB | S | AJ | WS | WB  | INJ | $W_1$ | $W_2$ | NO |
|------|------|-----|-----|----|---|----|----|-----|-----|-------|-------|----|
| 3/59 | 1/51 | 16  | 1/2 | 6  | 4 | 50 | 8  | 0/8 | 2   | 1     | -     | 1  |
| 3/32 | 1/42 | 16  | 1/2 | 8  | 4 | 50 | 8  | 0/8 | 2   | 0/8   | - 0/9 | 2  |
| 2/81 | 1/13 | 16  | 0/6 | 8  | 4 | 50 | 8  | 0/8 | 2   | 0/7   | -     | 3  |
| 2/49 | 0/91 | 16  | 0/6 | 8  | 8 | 30 | 8  | 0/8 | 2   | 0/5   | - 0/6 | 4  |
| 2/32 | 0/69 | 16  | 0/6 | 8  | 8 | 30 | 8  | 1   | 2   | 0/2   | - 0/4 | 5  |
| 2/21 | 0/36 | 16  | 0/6 | 10 | 8 | 70 | 8  | 1/2 | 4   | 0     | - 0/1 | 6  |

جدول 11 راهنمای انتخاب ترکیب بهینه پارامترهای فرآیند در برش ارتفاع 90mm

| Ra   | CV   | IAL | TA  | TB | S | AJ | WS | WB  | INJ | $W_1$ | $W_2$ | NO |
|------|------|-----|-----|----|---|----|----|-----|-----|-------|-------|----|
| 3/63 | 1/14 | 16  | 1/2 | 6  | 4 | 50 | 8  | 0/8 | 2   | 0/9   | - 1   | 1  |
| 3/1  | 0/92 | 16  | 0/9 | 6  | 4 | 50 | 8  | 0/8 | 2   | 0/7   | - 0/8 | 2  |
| 2/92 | 0/86 | 16  | 0/9 | 6  | 8 | 50 | 8  | 0/8 | 2   | 0/5   | - 0/6 | 3  |
| 2/42 | 0/55 | 8   | 0/6 | 6  | 8 | 50 | 8  | 1   | 2   | 0/3   | - 0/4 | 4  |
| 2/28 | 0/38 | 8   | 0/6 | 10 | 8 | 50 | 8  | 1   | 4   | 0/2   | -     | 5  |
| 2/17 | 0/08 | 8   | 0/6 | 10 | 8 | 70 | 8  | 1   | 4   | 0     | - 0/1 | 6  |

- [5] A. Goswami, J. Kumar, Investigation of surface integrity, material removal rate and wire wear ratio for WEDM of Nimonic 80A alloy using GRA and Taguchi method, *Engineering Science and Technology an International Journal*, Vol. 17, Issue. 4, pp. 173-184, 2014.
- [6] A. Goswami, J. Kumar, Optimization in wire-cut EDM of Nimonic-80A using Taguchi's approach and utility concept, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 17, Issue. 4, PP. 236-246, 2014.
- [7] N. Tosun, C. Cogun, G.Tosun, A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 152, Issue. 3, pp. 316-322, 2004.
- [8] S. Kuriakose, M.S. Shunmugam, Characteristics of wire-electro discharge machined Ti6Al4V surface, *Materials Letters*, Vol. 58, PP. 2231-2237, 2004.
- [9] S. Kuriakose, M.S. Shunmugam, Multi-objective optimization of wire-electro discharge machining process by Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, PP. 133-141, 2005.
- [10] V. K. Pasam, S. B. Battula, P. Madar valli, M. Swapna, Optimizing Surface Finish in WEDM Using the Taguchi Parameter Design Method, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, Vol. 32, No. 2, PP. 107-113, 2010.
- [11] D. Ghodsiyeh, A. Golshan, N. Hosseiniyehzad, M. Hashemzadeh, S. Ghodsiyeh, Optimizing Finishing process in WEDMing of Titanium Alloy (Ti6Al4V) by Zinc Coated Brass Wire based on Response Surface Methodology, *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 5, Issue. 10, PP. 3365-3377, 2012.
- [12] S. P. Arikatla1, K. T. Mannan, A. Krishnaiah, Investigations on surface Characterisation of Wire Electric Discharge Machined Surface of Titanium Alloy, *International Journal of Engineering Research and Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 663-570, 2013.
- [13] D. Ghodsiyeh, A. Golshan, S. Izman, Multi-objective process optimization of wire electrical discharge machining based on response surface methodology, *The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 36, PP. 301-313, 2014.
- [14] H. Abyar firouzabadi, J. Parvizian, A. Abdullah, E. Ghadiri Zahrani, Accuracy of small radius corners in multi stage WEDM: Roughing Parameters and geometrical analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 7, pp. 87-101, 2013. (in persian)
- [15] D. Montgomery, Design and analysis of experiments, Second Edittion, Sixth Edittion, pp. 1, New York: Wiley, 2005.
- [16] B. Mathew, B. A. Benkim, J.Babu, Multiple Process Parameter Optimization of WEDM on AISI304 Using Utility Approach, *International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering, Procedia Materials Science*, Vol, 5, PP. 1863-1872, 2014.
- [17] B. K.Lodhi, S. Agarwal, Optimization of machining parameters in WEDM of AISI D3 Steel using Taguchi Technique, *6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Procedia CIRP*, Vol. 14, PP. 194 - 199, 2014.
- [18] G. SELVAKUMAR, G. SORNALATHA, S. SARKAR, S. MITRA, Experimental investigation and multi-objective optimization of wire electrical discharge machining (WEDM) of 5083 aluminum alloy, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, Issue. 2, PP. 373-379, 2014.
- [19] S. Kumar, A. Batish, R. Singh, T. P. Singh, A hybrid Taguchi artificial neural network approach to predict surface roughness during electric discharge machining of titanium alloys, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, Issue. 7, PP. 2831-2844, 2014.
- [20] B. Jabbaripour, M. H. Sadeghi, M. R. Shabgard, Sh. Faridvand, Investigating the Effects of Tool Materials on the Properties of Electrical Discharge Machining of  $\gamma$ -TiAl Intermetallic, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No.2, pp.135-146, 1390. (in persian)

ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم معرفی می شوند. (ارجاع به شکل 6)

با استفاده از نمودارهای میانگین سیگنال به نویز در سطوح پارامترها در روش تاگوچی (شکل 5)، ثابت می شود که سطوح بهینه پارامترها به ارتفاع برش وابسته است، اما نتایج ستاره دار زیر در خصوص نحوه تاثیرگذاری پارامترها (تاثیر گذاری مستقیم یا معکوس) بر نرخ برش و زبری سطح به ارتفاع برش وابسته نمی باشند. به عبارتی این نتایج در ماشین کاری وایرکات قطعه با هر ارتفاع برش برقرار است.

\* دو پارامتر زمان روشنی پالس (TA) و شدت جریان (IAL) تاثیر مستقیم بر نرخ برش و زبری سطح دارند. به طوری که با افزایش TA و IAL، نرخ برش افزایش و صافی سطح کاهش پیدا می کند (افزایش زبری Ra). بنابراین افزایش این دو پارامتر در پاس های اولیه (برش خشن) مطلوب است.

\* پارامترهای زمان خاموشی پالس (TB) و ولتاژ متوسط گپ (AJ) بر هر دو خروجی مورد بررسی تاثیر عکس دارند. به عبارتی افزایش در مقدار TB و AJ سبب کاهش نرخ برش و بهبود صافی سطح (کاهش زبری Ra) می شود. بنابراین در پاس نهایی (برش پرداخت) بهتر است مقادیر این دو پارامتر بزرگ تر انتخاب شوند.

صافی سطح و نرخ برش از جمله خروجی های ناهمسو فرآیند برش کاری سیمی با تخلیه الکتریکی هستند که تلاش برای بهبود یکی موجب تنزل دیگری خواهد شد. به این دلیل، در قسمت پایانی پژوهش حاضر، بهینه سازی دو هدفه به روش وزن دهی خطی به منظور ارائه جدول تکنولوژی برای 11 ترکیب از اهمیت نسبی دو خروجی نرخ برش و زبری سطح انجام پذیرفت. نتایج فشرده بهینه سازی برای سه ارتفاع برش در نمودار 7 ارائه گردیده است. در این نمودار هم مشاهده می شود که مقادیر بهینه پارامترها به تغییر ارتفاع برش وابسته است.

## 8- مراجع

- [1] A.V.S Ram Prasad, K.Ramji, G.L.Datta, An Experimental Study of Wire EDM on Ti-6AL-4V Alloy, *International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering, procedia Materials Science* Vol. 5, pp. 2567-2576, 2014.
- [2] F.Nourbakhsh, K. P. Rajurkar, A. P. Malshe, J. Cao, Wire electro-discharge machining of titanium alloy, *First CIRP Conference on BioManufacturing, Procedia CIRP*, Vol. 5, pp. 13 - 18, 2013.
- [3] P. Sivaprakasam, P. Hariharan, S. Gowri, Modeling and analysis of micro-WEDM process of titanium alloy (Ti-6Al-4V) using response surface approach, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 17, Issue. 4, PP. 227-235, 2014.
- [4] R. Mukherjee, S. Chakraborty, S. Samanta, Selection of wire electrical discharge machining process parameters using non-traditional optimization algorithms, *Applied Soft Computing*, vol. 12, Issue. 8, pp. 2506-2516, 2012.