

## مطالعه تجربی و بهینه‌سازی ماشینکاری تخلیه الکتریکی بر روی آلیاژ Al 7075 با استفاده از روش تاگوچی - گری

مجید امیری\*  
شهرام یوسفی

کارشناس ارشد، مجتمع دانشگاهی مکانیک هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران  
دانشیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

### چکیده

این مقاله دقت سطح ماشینکاری تخلیه الکتریکی آلیاژ Al7075 مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایشات بر اساس پنج ورودی جریان پیک، زمان خاموشی، ولتاژ تخلیه، زمان تخلیه و پلاریته بر روی چهار خروجی زبری سطح قطعه، براده‌برداری، اضافه برش شعاعی و سایش ابزار به روش طراحی آزمایشات آماری به کار گرفته شده است. هدف از این پژوهش دستیابی به یک سطح نهایی ماشینکاری با پرداخت سطحی مطلوب و کمترین انحراف از ابعاد اسمی با شناسایی چهار خروجی ذکر شده تحت شرایط پارامتری متعدد است. آزمایشات نشان می‌دهد که کیفیت ماشینکاری تابع مستقیم از ورودی‌هاست و طبق مقادیر به دست آمده سایش الکتروود در ماشینکاری تخلیه الکتریکی آلومینیوم بسیار پایین‌تر از حد انتظار می‌باشد. تأثیر قطب ماشینکاری بر روی سایش الکتروود از اهمیت خاصی برخوردار نیست هر چند خروجی‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. مهمترین پارامتر تأثیرگذار در تمامی پاسخ‌ها شدت جریان است، به طوری که برای داشتن یک ماشینکاری با دقت و کیفیت بالاتر باید مقادیر این پارامتر حداقل باشند و این مترادف با نرخ براده‌برداری کمتر خواهد بود. بر مبنای آنالیز نسبی خاکستری یک بهینه‌سازی همزمان بر روی چهار پاسخ: نرخ سایش، نرخ براده‌برداری، اضافه برش و زبری سطح انجام گرفته است و شرایط پارامتری برای یک ماشینکاری خوب از لحاظ کیفی و زمانی به صورت  $T_{on}=50\mu s$ ،  $I=8A$ ،  $P=0$  و  $V=40v$ ،  $T_{off}=5\mu s$  پیشنهاد می‌شود. لازم به توضیح است که بر اساس مقدار درجه نسبی خاکستری اولیه و ثانویه به عنوان شاخص کمی بهینه‌سازی، با انتخاب این شرایط پارامتری، عملکرد کلی فرآیند به میزان حدود ۲۰٪ بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: سایش ابزار، نرخ‌براده‌برداری، ماشینکاری تخلیه الکتریکی آلومینیوم، دقت سطحی.

### Experimental Study and Optimization of Electric Discharge Machining of Al 7075 alloy Gary-using the Taguchi Method

M. Amiri  
Sh. Yousefi

M.Sc., Mechanical and Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology Department, Iran  
Associate Professor, Mechanical and Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology Department, Iran

### Abstract

In this paper, the accuracy of AL7075 electrical discharge machining was investigated. The experimentation based on Statistical Design of Experiment methodology was conducted by selecting five process inputs including Peak current, Off-time period, Voltage, Discharge time and Polarity with the aim of studying four outputs which are Surface roughness, Material removal rate, Over cut and also, Wear of the tool. The purpose of this research is access to a final machining part with a desirable surface quality along with the minimum possible deviation from nominal tolerances under different parametric settings. The results indicate that the machining quality is functionalized directly through the inputs. Interestingly, the figures related to tool wear is considerable lower than initial expectation of Aluminum EDM. Selection of machining polarity did not have priority on electrode wear here however; other responses were dramatically affected by this factor. Between all of the existed parameters in the process, the most influential one was peak current in so far to have a machining with higher accuracy and quality, its relevant level must be kept at least as much as possible whereas, in this case, this selection will lead to a condition with a smaller material removal rate. Accordance to Grey Relational Analysis, a simultaneous calculation performed on the four responses: wear rate, material removing rate, overcut and Surface roughness and the parametric treatment for an acceptable machining in terms of quality and time, suggested as  $I = 8A$ ,  $T_{on} = 50\mu s$ ,  $T_{off} = 5\mu s$ ,  $V = 40v$  and  $P = 0$ . It should be noted that on the basis of relative degrees of gray as the primary and secondary quantitative index optimization, by selecting this parameter, the overall performance is improved by about 20%.

**Keywords:** Tool wear- Material removal rate- Aluminum electro discharge machining- Surface accuracy.

## ۱- مقدمه

در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، سختی و استحکام ماده چندان اهمیتی ندارد؛ در عوض زمان کاری، صافی سطح، دوام الکتروود و دقت ابعادی حاصل از ماشینکاری مطرح است. در این فرایند، براده‌برداری<sup>۱</sup> بر اساس یک مکانیزم حرارتی-سایشی و بوسیله جرقه‌های تخلیه<sup>۲</sup> بوجود آمده بین کار و ابزار الکتروود، انجام می‌گیرد. انرژی تخلیه شده توسط جرقه‌ها، دمای بسیار بالایی را در سطوح ابزار و قطعه‌کار تولید می‌کند که همزمان با انجام ماشینکاری، ماده الکتروود نیز ذوب و سپس بخار شده که این پدیده بعنوان سایش ابزار شناخته می‌شود [۱].

در ماشینکاری تخلیه الکتریکی، تاکنون بیشتر تحقیقات بر روی مواد با سختی بسیار بالا که ماشینکاری آن توسط سایر روشهای سنتی با مشکل مواجه است، انجام گرفته و کمتر تحقیقات بر روی آلیاژهای غیرآهنی متمرکز شده است. از این رو دانش تکنیکی و یافته‌های کمی در این زمینه وجود دارد. علاوه بر این، تجربیات پراکنده کارگاهی موجود حاکی از آنست که در مواردی هم تضادهای تکنولوژیکی در ماشینکاری اینگونه قطعات وجود دارد. برای مثال برای داشتن یک برش پرداخت، تا حدود بسیار زیادی نرخ براده برداری پایین می‌آید که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. به همین ضرورت، کار بر روی این مواد و یافتن شرایط مناسب ماشینکاری مطالعات بیشتری را طلب می‌کند.

F. L. Amorim et al تخلیه الکتریکی آلیاژ آلومینیوم AMP800 با الکتروود مسی را مورد بررسی قرار داد. آنها با مطالعه تجربی پارامترهای شدت جریان<sup>۳</sup>، زمان تخلیه<sup>۴</sup>، فاکتور دیوتی<sup>۵</sup> و زمان اینتروال<sup>۶</sup> نشان داده‌اند که چرخه کار<sup>۷</sup> در افزایش نرخ براده‌برداری و کاهش سایش ابزار<sup>۸</sup> بسیار موثر است. همچنین، کاهش شدت جریان در کاهش سایش نسبی حجمی<sup>۹</sup> ابزار موثر است [۲].

موضوع اثرگذاری ترکیب شیمیایی ماده بر بازده فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، توسط R. Karthikeyan et al. مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش مقدار درصد Sic در یک کامپوزیت آلومینیومی، سایش ابزار افزایش، همچنین نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح کاهش می‌یابد [۳].

Yoshiyuki et al. با اضافه کردن ذرات پودر نیکل به مایع دی‌الکتریک نفت سفید<sup>۱۰</sup> به افزایش کیفیت سطح<sup>۱۱</sup> به دست آمده از ماشینکاری تخلیه الکتریکی آلیاژ برونز آلومینیوم پرداخت [۴].

A.A. Khan با مدنظر قرار دادن ولتاژ و جریان تخلیه، به بررسی ابعاد تحت سایش قرار گرفته از لبه‌های یک الکتروود با سطح مقطع مستطیل پرداخت. این کار با انتخاب دو ماده مس و برنج برای الکتروود و آلومینیوم و فولاد نرم<sup>۱۲</sup> به عنوان قطعه‌کار انجام شد. نتایج نشان داد که سایش در پیشانی جلویی الکتروود بیشتر از بدنه جانبی<sup>۱۳</sup> آن است و سایش الکتروود با افزایش جریان و ولتاژ افزایش می‌یابد. همچنین، مقادیر سایش در سطح مقطع و در امتداد طول الکتروود در ماشینکاری آلومینیوم با استفاده از یک الکتروود مسی نسبت به سایر انواع دیگر الکتروود، در حداقل مقدار است [۵].

Jun Qu et al. در فرایند Cylindrical Wire ماشینکاری تخلیه الکتریکی بر روی قطعاتی از جنس کارباید و برنج با استفاده از یک سیم برنجی، اثبات کرد که نرخ براده‌برداری در برنج تقریباً چهار برابر کارباید است. دلیل این موضوع رسانایی الکتریکی و دمای ذوب پایین برنج است [۶].

Yukup et al. برای اولین بار بر روی قابلیت ماشینکاری مس-بریلوم تحت شرایط کاری متفاوت مطالعه کردند. در انجام آزمایشات مرتبط، آنها نسبت دو پارامتر زمان روشنی پالس و زمان خاموشی<sup>۱۴</sup> را به صورت یک فاکتور تکی ادغام شده مد نظر قرار دادند و اینطور نتیجه گرفتند که مدت پالس<sup>۱۵</sup> در نرخ براده‌برداری<sup>۱۶</sup>، نرخ سایش الکتروود<sup>۱۷</sup> و صافی سطح اثرگذار نیست و تنها محیط دی‌الکتریک و جریان تخلیه بر عملکرد ماشینکاری تخلیه الکتریکی این آلیاژ موثر است [۷].

مقوله بسیار مهم دیگر در ماشینکاری تخلیه الکتریکی دقت ابعادی ماشینکاری می‌باشد. اختلاف اندازه بین الکتروود و کانتور ماشینکاری شده بعنوان اضافه برش<sup>۱۸</sup> شناخته می‌شود بنحوی که همواره حفره تولید شده بزرگتر از اندازه اسمی مطلوب است. S. Singha et al. نشان داد که حداقل اضافه برش توسط الکترودهای مسی و آلومینیومی به دست می‌آید. همچنین، جریان تخلیه بر کنترل اضافه برش موثر است [۸].

<sup>10</sup> Kerosene

<sup>11</sup> Surface integrity

<sup>12</sup> Mild steel

<sup>13</sup> Surrounding body

<sup>14</sup> Pulse on/off time

<sup>15</sup> Pulse duration

<sup>16</sup> Material Removal Rate (MRR)

<sup>17</sup> Electrode wear Rate (EWR)

<sup>18</sup> Overcut

<sup>1</sup> Material removing

<sup>2</sup> Discharging sparks

<sup>3</sup> Current intensity

<sup>4</sup> Discharge time

<sup>5</sup> Duty factor

<sup>6</sup> Interval time

<sup>7</sup> Duty cycle

<sup>8</sup> Tool wear

<sup>9</sup> Volumetric relative wear

متالوگرافی آلومینیوم در دماهای بازپخت بالا بزرگتر می‌شود [۱۲]. این موضوع در ماشینکاری تخلیه الکتریکی که وجود لایه ریکست غیر قابل اجتناب است، مترادف می‌شود با خشن تر و زبرتر شدن سطح نهایی به دست آمده از ماشینکاری. آزمایشات با استفاده از یک ماشین مدل EDM-204ZNC با عمق ماشینکاری ثابت ۲ mm برای تمامی نمونه‌ها و استخراج زمان کاری صرف شده، انجام شد. در شکل ۱ نمایی از ماشین اسپارک نشان داده شده است.

پس از انجام آزمایشات، مقادیر نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار بر مبنای مقدار کاهش وزن [۱۳] با استفاده از روابط (۱) و (۳) محاسبه شده است.

$$MRR = W_w / \rho_w t \text{ (mm}^3 / \text{min)} \quad (1)$$

$$VEW = W_e / \rho_e t \text{ (mm}^3 / \text{min)} \quad (2)$$

$$EWR = 100 \times VEW / MRR \quad (3)$$

VEW برابر است با سایش حجمی الکتروود،  $W_w$  وزن از دست رفته از قطعه کار در طول مدت ماشینکاری به گرم همچنین،  $W_e$  وزن از دسته رفته برای الکتروود است.  $t$  زمان ماشینکاری به دقیقه و جملات  $\rho_{Cu}$  و  $\rho_{Al}$  بترتیب نمایانگر چگالی قطعه کار و الکتروود می‌باشد.



شکل ۱- نمایی از ماشین اسپارک

## ۲-۲- طرح آزمایش

در عمل، پارامترهای ماشینکاری بر اساس تجربیات گذشته یا مقادیر به دست آمده از هندبوک‌ها مشخص می‌شود. با این وجود این مسیر خود به خود رسیدن به یک عملکرد ماشینکاری بهینه یا نزدیک به بهینه را تضمین نمی‌کند.

وجود متغیرهای زیاد و پیچیدگی‌های حاکم بر ماشینکاری تخلیه الکتریکی، استفاده از روشهای استاندارد تجربی را برای بررسی آن ناگزیر می‌سازد. روش طراحی آزمایشات تاگوچی این امکان را فراهم می‌کند که شناخت قابل اتکایی از فرایند با انجام حداقل آزمایشات ضروری به دست آید.

Dhar et al. ثابت کردند که در ماشینکاری یک کامپوزیت ماتریس آلومینیوم، افزایش در مدت پالس با فرض ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها، اضافه برش را بدنبال خواهد داشت [۹]. O Belgasam et al. نشان دادند که در ماشینکاری AISI D3 Tool steel pulse-on time و شدت پالس بترتیب بیشترین اهمیت را در کنترل اضافه برش دارد [۱۰].

در این تحقیق، ماشینکاری تخلیه الکتریکی بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بعنوان یک ماده پرکاربرد در صنایع پیشرفته هوایی که قبلاً کمتر به آن پرداخته شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. این کار با استفاده از روش طراحی آزمایشات و منظور کردن پنج پارامتر فرایندی جریان اوج<sup>۱</sup>، ولتاژ تخلیه<sup>۲</sup>، زمان روشنی پالس<sup>۳</sup>، زمان خاموشی<sup>۴</sup> و قطبش الکتروود<sup>۵</sup> بر روی خروجی‌های فرایند شامل نرخ براده‌برداری، سایش ابزار، صافی سطح و اضافه برش، انجام گرفته است. سپس یک بهینه‌سازی بر روی خروجی‌های فرایند انجام گرفته و شرایط کاری مطلوب پیشنهاد شده است.

## ۲- آزمایشات

### ۲-۱- مواد، شرایط آزمایش و اندازه‌گیری

در این مطالعه، آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ (۶.۱% Al, ۲% Cu, ۹۱% Mn) بعنوان قطعه‌کار انتخاب شده‌اند. جنس الکتروودها، مس تجاری می‌باشد که در بیشتر کاربردهای صنعتی ماشینکاری تخلیه الکتریکی از آن استفاده می‌شود و ابعاد آن برابر ۱۲ mm × ۲۵ mm است. خواص مکانیکی و حرارتی این آلیاژها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- خواص فیزیکی مواد مورد استفاده [۱۱]

Alloy	رسانایی گرمایی (W/m.°K)	نقطه ذوب (°C)	سختی (RB)	مدول یانگ (GPa)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )
Al 7075	۱۳۰	۴۷۷-۶۳۵	۸۷	۷۱	۲،۸۱
Cu122 (electrode)	۳۹۱	۱۰۸۳	۵۴	۱۱۷	۸،۹۴

۷۰۷۵ یک آلیاژ آلومینیوم با استحکام و چگالی بالا است که در کاربردهای خاص هوافضا و دریایی کارایی خود را به خوبی برآورده می‌کند [۱۱]. در عین حال، اندازه دانه در ساختار

<sup>1</sup> Peak current

<sup>2</sup> Discharge voltage

<sup>3</sup> Pulse-on time

<sup>4</sup> Pulse-off time

<sup>5</sup> Electrode polarity

برابر است با نصف اختلاف بین قطر الکتروُد مسی و قطر حفره به دست آمده از ماشینکاری [۱۳].

### ۳- آنالیز واریانس

آنالیز واریانس یک ابزار تصمیم‌گیری آماری است که به کمک آن متغیرهای اثرگذار بر فرایند تشخیص داده می‌شود. این کار با تخصیص یک فاصله اطمینان اغلب ۹۵ درصدی به فرایند، برای اظهار نظر راجع به پارامترها و رد فرضیه نول انجام می‌شود. به طوری که اگر مقدار احتمال مربوط به هر پارامتر، کمتر از ۰/۰۵ باشد، آن پارامتر در پاسخ فرایند موثر و نقش ایفا کننده خواهد داشت [۱۴].

برای انجام آنالیز واریانس نخست بایستی آنالیز بر روی مقادیر مشاهده شده انجام گرفته و فاکتورهای موثر بر فرایند ابتدا بر مبنای رفتار ظاهری و سپس مقادیر احتمال مشخص شوند.

### ۳-۱- آنالیز پرداخت سطح

برای ارزیابی اهمیت پارامترهایی که در فرایند حضور دارند، از نمودار اثرات اصلی استفاده شده است (شکل ۲). این نمودارها تغییرات پاسخ به ازای تغییر ورودی‌های فرایند، را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌گردد که بیشترین تأثیر در افزایش پرداخت سطح را قطبش الکتروُد ایفا می‌کند به طوری که در قطب مثبت زبری کمتر است. اگر چه افزایش جریان و زمان روشنی پالس که متناظر با افزایش انرژی براده برداری است، تأثیر مخرب بر روی کیفیت سطح دارد.

در این پژوهش بر اساس شرایط آزمایش و پارامترهای قابل کنترل که در جدول ۲ خلاصه شده‌اند، آرایه متعامد L ۱۸ انتخاب شده است. وجود چهار متغیر ۳ سطحی در آزمایشات و پارامتر قطبش الکتروُد با ۲ سطح در عمل، که منجر به درجه آزادی کل ۱۰ می‌شود، انتخاب این طرح را توجیه می‌کند. بواسطه همین درجه آزادی، طرح انتخاب شده، غیر اشباع است. در به دست آوردن محدوده متغیرهای آزمایش، به دلیل فقدان مراجع لازم بر روی این آلیاژ، بر اساس روش سعی و خطا عمل شده است تا حدی که بازرسی‌های اولیه چشمی قطعات ماشینکاری تخلیه الکتریکی شده را ارضا کند.

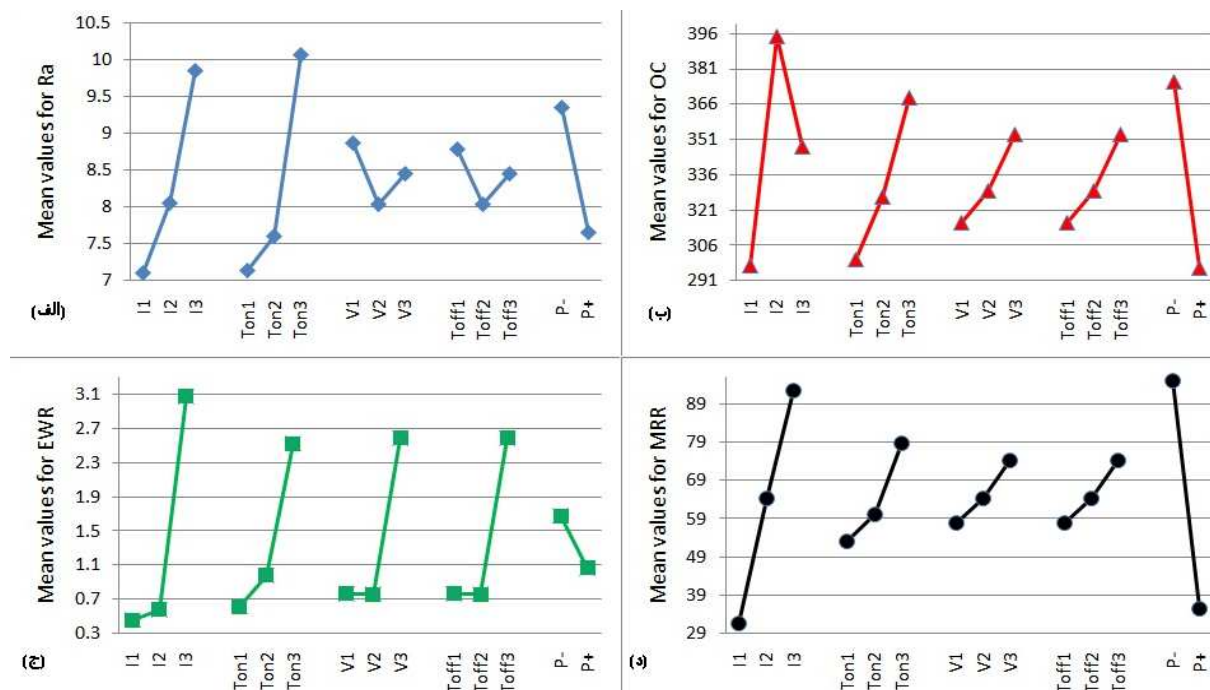
جدول ۲- شرایط آزمایش

Electrode	Copper UNS.....
Workpiece	۷۰۷۱Al
Dielectric fluid	Kerosene
Polarity (P)	Negative/Positive
Peak current (Ip)	۸, ۱۲, ۱۶A
Discharge voltage (V)	۴۰, ۶۰, ۸۰V
Pulse on-time (Ton)	۵۰, ۱۰۰, ۱۵۰ μs
Pulse off-time (Toff)	۵, ۶, ۷ μs

با توجه به تنظیمات پارامتری پیشنهاد شده توسط آرایه L۱۸، مقادیر هر پاسخ بعد از هر اجرا، اندازه‌گیری شده و در جدول ۳ خلاصه شده‌اند. در اندازه‌گیری مقادیر اضافه برش شعاعی از یک دستگاه اندازه‌گیری خطی دقیق استفاده شده است. مقدار اضافه برش

جدول ۳- رفتار آرایه متعامد L۱۸، کنترل پارامترها و پاسخها

No.	Control parameters					Observed values			
	I	TON	TOFF	V	P	EWR	MRR	OC	Ra
۱	۱۲	۵۰	۶	۶۰	۰	۰/۳۹	۷۸/۵۳	۳۵۰/۳۳	۹/۰۹
۲	۸	۵۰	۵	۴۰	۰	۰/۰۵	۱۱	۲۰۹/۵	۵/۷۰
۳	۱۶	۵۰	۷	۸۰	۰	۰/۴۴	۸۱/۷۶	۳۵۷/۴	۸/۵۴
۴	۱۲	۱۰۰	۵	۴۰	۰	۰/۴۶	۹۱/۶۶	۳۴۵/۶۶	۷/۶۵
۵	۱۶	۱۰۰	۶	۶۰	۰	۰/۴۹	۱۱۰/۴۴	۳۰۷/۵	۷/۶۱
۶	۸	۱۰۰	۷	۸۰	۰	۰/۰۸	۴۸/۸۱	۳۳۶/۵	۶/۴۶
۷	۸	۱۵۰	۵	۴۰	۰	۰/۹	۵۹/۰۲	۳۵۴	۹/۶۰
۸	۱۲	۱۵۰	۶	۶۰	۰	۰/۰۵	۹۴/۹۹	۴۶۵	۱۰/۲۵
۹	۱۶	۱۵۰	۷	۸۰	۰	۱۳/۳۴	۱۹۵/۳۲	۴۸۸/۵	۱۵/۷۰
۱۰	۱۶	۵۰	۵	۴۰	۱	۱/۴۵	۳۶/۶	۲۶۶	۷/۴۰
۱۱	۸	۵۰	۶	۶۰	۱	۱/۴۵	۱۵/۴۱	۲۴۲/۵	۵/۳۵
۱۲	۱۲	۵۰	۷	۸۰	۱	۰/۰۵	۱۰	۲۸۴/۵	۵/۳۳
۱۳	۱۶	۱۰۰	۵	۴۰	۱	۱/۸۲	۶۳/۴۵	۳۲۸/۵	۱۰/۴۰
۱۴	۸	۱۰۰	۶	۶۰	۱	۱/۳۶	۱۸/۴۹	۲۷۲/۵	۶/۴۵
۱۵	۱۲	۱۰۰	۷	۸۰	۱	۱/۷۷	۲۸/۱	۳۶۸/۶	۷/۰۶
۱۶	۱۲	۱۵۰	۵	۴۰	۱	۰/۹۱	۳۸/۴۲	۲۸۵	۸/۹۳
۱۷	۱۶	۱۵۰	۶	۶۰	۱	۰/۸۹	۶۷/۳۲	۳۳۸/۶	۹/۵۰
۱۸	۸	۱۵۰	۷	۸۰	۱	۰/۰۵	۱۶/۸۲	۲۸۲	۷/۶۵



شکل ۲- نمودار اثرات اصلی برای پاسخها

طول زمان ماشینکاری، بایستی جریان در ۸ آمپر قطب مثبت، زمان خاموشی ۶  $\mu$ s و زمان روشنی ۵۰  $\mu$ s انتخاب گردد. با یک نگاه دقیق در این تنظیم پیشنهادی و در نظر گرفتن همزمان ترکیب پارامترها در جدول ۳، با مدنظر قرار دادن آنالیز واریانس و این واقعیت که ولتاژ در اینجا یک پارامتر غیر موثر بوده و اثر مستقیم در کیفیت سطح ندارد، بنابراین این‌طور می‌توان گفت که ترکیب بهینه پیشنهاد شده شرایطی کاملاً مشابه با تست ۱۱ دارد.

جدول ۴- آنالیز واریانس برای زبری سطح (Ra)

Source	SS	DF	MS	F-ratio	P-value	PCR
I	۲۷,۲	۱	۱۳,۶	۴,۹۴	۰,۰۳۲	۲۶,۶
T <sub>on</sub>	۳۷,۹۲	۲	۱۸,۹	۶,۸۹	۰,۰۱۳	۳۷,۲
T <sub>off</sub>	۰,۵۲	۲	۰,۲۶	۰,۰۹	۰,۹۱۱	۰,۵
P	۸,۷۲	۱	۸,۷۲	۳,۱۷	۰,۱۰۵	۸,۵
Error	۲۷,۵۳	۱۰	۲,۷۵			
Total	۱۰۱,۹	۱۷				

SS: sum of square; DF: degree of freedom; MS: mean square; PCR: percentage contribution ratio

همچنین، بررسی رفتار کمی اضافه برش (جدول ۳) نیز به این نکته دلالت می‌کند که در این مورد قطعه کار یکی از کمترین مقادیر اضاف برش شعاعی را تجربه کرده است. در نتیجه می‌توان اظهار داشت که نتایج پیش‌بینی شده تا حدود زیادی خوب عمل کرده است.

همچنین، برای انتخاب مقادیر بهینه پارامترها از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می‌شود. نسبت S/N یک معیار تبدیل شده است که انحراف بین مقادیر تجربی و مقادیر مطلوب داده‌ها را بیان می‌کند [۱۴].

در اینجا بر اساس این اصل که پاسخهای آزمایش (Ra, EW و OC) بایستی حداقل شود، نسبت S/N به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود که در آن مقدار  $y_i$  ith پاسخ و n تعداد تکرار هر آزمایش است. همچنین برای پاسخ نرخ براده برداری نسبت S/N بنا بر رابطه ۵ محاسبه خواهد شد.

$$\eta = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (y_i)^2 \right] \quad (4)$$

$$\eta = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (y_i)^{-2} \right] \quad (5)$$

جدول ۴ نتایج آنالیز واریانس برای Ra، را نشان می‌دهد. با انجام فرایند حذف برگشتی برای خروج جملات ناموثر با P ۰/۰۵ > از این تحلیل، مشاهده می‌شود که بترتیب زمان روشنی پالس و شدت جریان در ارتقاء سطح ماشینکاری موثر بوده و بیشترین درصد مشارکت را دارند. همچنین با استفاده از رابطه (۱)، تنظیم پارامتری بهینه‌ای که در آن مقادیر S/N حداقل شده که متناظر با بهترین پرداخت سطح می‌باشد، در جدول ۵ آمده است. با توجه به این جدول برای داشتن کمترین مقدار Ra میانگین در

جدول ۵- مقادیر S/N برای پرداخت سطح

Cutting parameter	Mean S/N ratio (dB)			
	Level 1	Level 2	Level 3	Max-min
Peak current	-۱۶,۵۷*	-۱۷,۹۳	-۱۹,۵۸	۳,۰۱
Polarity	-۱۸,۶۹	-۱۷,۳۶*	--	۱,۳۳
Pulse off-time	-۱۸,۲	-۱۷,۸۹*	-۱۷,۹۹	۰,۳۱
Pulse on-time	-۱۶,۵۷*	-۱۷,۵	-۲۰	۳,۴۴

\*Optimal level condition.

۳-۲- آنالیز اضافه برش شعاعی

در جدول ۶، نتایج آنالیز واریانس برای شناسایی پارامترهای موثر در پاسخ اضافه برش آمده است. این تحلیل نشان می‌دهد که برترتیب پارامترهای زمان روشنی، شدت جریان، قطبش و زمان خاموشی بیشترین مشارکت را در اضافه برش شعاعی دارند. همچنین رشد شدت جریان از ۱۲ آمپر به ۱۶ آمپر کاهش چشمگیری را در دقت ابعادی قطعه سبب می‌شود. افزایش جریان موجب می‌گردد که گرمای بیشتری در منطقه برش تولید شده و دقت برش، رو به تخریب بیشتر برود. شاهد این مدعا، تنظیم پارمتری بهینه در جدول ۷ می‌باشد.

جدول ۶- آنالیز واریانس برای اضافه برش (OC)

Source	SS	DF	MS	F-ratio	P-value	PCR
I	۱۷۴۱۹	۲	۸۷۱۰	۴,۵۶	۰,۰۳۹	۲۰,۹۲
T <sub>on</sub>	۲۱۰۷۴	۲	۱۰۵۳۷	۵,۵۲	۰,۰۲۴	۲۵,۳۱
T <sub>off</sub>	۹۰۷۲	۲	۴۵۳۶	۲,۷۳	۰,۱۴۳	۱۰,۸۹
P	۱۶۵۷۴	۱	۱۶۵۷۴	۸,۶۸	۰,۰۱۵	۱۹,۹
Error	۱۹۱۰۴	۱۰	۱۹۱۰			
Total	۸۳۲۴۲	۱۷				

SS: sum of square; DF: degree of freedom; MS: mean square; PCR: percentage contribution ratio

در چیدمان بهینه P+IITon1Toff1 پیشنهاد شده است. این چیدمان بسیار نزدیک به همان تست یازدهم در جدول ۳ است که در آنجا، به دلیل اینکه جریان دارای کمترین مقادیر (A) است، زبری سطح در بهترین حالت ممکن (Ra ۵,۳۵) می‌باشد. در واقع در اینجا هم، کاهش شدت جریان، در دستیابی به یک ماشینکاری بهتر، کمک کرده است.

۳-۳- آنالیز نرخ سایش ابزار

در جدول ۸، آنالیز واریانس برای سایش ابزار بر روی داده‌های جدول ۳، آمده است.

بیشترین درصد مشارکت مربوط به متغیر شدت جریان است. نمودار اثرات اصلی این پارامترها (شکل ۲-ج) نشان می‌دهد که با افزایش سطوح از I2 به I3، افزایش بسیار شدید سایش را به همراه دارد. این موضوع برای سه پارامتر T<sub>on</sub>، T<sub>off</sub> و V نیز حکم می‌کند.

جدول ۸- آنالیز واریانس برای سایش ابزار (EWR)

Source	SS	DF	MS	F-ratio	P-value	PCR
I	۲۳,۹۱	۲	۱۱,۹	۱,۱۶	۰,۳۵۰	۱۵,۷
T <sub>on</sub>	۱۴,۴۱	۲	۷,۲۵	۰,۷	۰,۵۲۰	۹,۲۲
T <sub>off</sub>	۱۲,۶	۲	۶,۳	۰,۶۱	۰,۵۶۱	۸,۰۶
P	۲,۳۳	۱	۲,۳۳	۰,۲۲	۰,۶۴۶	۱,۵۳
Error	۱۰۳,۰۴۱	۱۰	۱۰,۳۴			
Total	۱۵۶,۲۲	۱۷				

SS: sum of square; DF: degree of freedom; MS: mean square; PCR: percentage contribution ratio

متناظر با کوچکترین قدر مطلق‌های S/N در جدول ۹، ابزار در ترکیب پارامتری 1T<sub>on</sub>3T<sub>off</sub>IIP-1 کمترین سایش را در سطح فلانک دارد.

جدول ۹- مقادیر S/N برای EWR

Cutting parameter	Mean S/N ratio (dB)			
	Level ۱	Level ۲	Level ۳	Max-min
Peak current	۱۱,۴۹*	۱۰,۴۷	-۲,۷۶	۱۴,۲۶
Polarity	۸,۹۶*	۳,۸۴	--	۵,۱۱
Pulse off-time	۴,۳۴	۵,۹۱	۸,۹۴*	۴,۵۹
Pulse on-time	۱۰,۱۴*	۳,۶۷	۵,۳۸	۶,۴۷

در جداول مقادیر S/N هرچقدر مقادیر بیشینه - کمینه بیشتر باشد نشانگر آنست که سطح بهینه نسبت به سطح‌های

جدول ۷- مقادیر S/N برای OC

Cutting parameter	Mean S/N ratio (dB)			
	Level ۱	Level ۲	Level ۳	Max-min
Peak current	-۴۸,۸۹*	-۵۰,۷۵	-۵۰,۶۷	۱,۸۶
Polarity	-۵۰,۸۴	-۴۹,۳۷*	-	۱,۴۷
Pulse off-time	-۴۹,۳۵*	-۵۰,۱۷	-۵۰,۸۰	۱,۴۵
Pulse on-time	-۴۸,۹۳*	-۵۰,۲۴	-۵۱,۱۳	۲,۱۹

همانطور که مشاهده می‌شود برای داشتن به شرایط ایده‌آل مرتبط به پاسخ اضافه برش (OC)، سطح پایین برای جریان (I)

جدول ۱۰- آنالیز واریانس بر روی نرخ براده برداری (MRR)

Source	SS	DF	MS	F-ratio	P-value	PCR
I	۱۲۴۲۰٫۷	۲	۶۲۱۰٫۳	۱۰٫۳۲	۰٫۰۰۴	۳۳٫۹
T <sub>on</sub>	۴۷۵۱٫۵	۲	۲۳۷۵٫۸	۳٫۹۵	۰٫۰۵۴	۱۳
T <sub>off</sub>	۷۶۴٫۲	۲	۳۸۲٫۱	۰٫۶۴	۰٫۵۵۰	۲٫۰۸
P	۱۲۶۳۶٫۳	۱	۱۲۶۳۶٫۳	۲۱٫۰۱	۰٫۰۰۱	۳۴٫۵
Error	۶۰۱۵٫۳	۱۰	۶۰۱٫۵			
Total	۳۶۵۸۷٫۹	۱۷				

SS: sum of square; DF: degree of freedom; MS: mean square; PCR: percentage contribution ratio

جدول ۱۱- مقدار S/N برای MRR

Cutting parameter	Mean S/N ratio (dB)			
	Level 1	Level 2	Level 3	Max-min
Peak current	۲۷٫۲۷	۳۲٫۸۹	۳۸٫۱۳*	۱۰٫۸۶
Polarity	۳۶٫۸۵*	۲۸٫۶۸	-	۸٫۱۷
Pulse off-time	۳۲٫۴۲	۳۴٫۰*	۳۱٫۸۹	۲٫۱۱
Pulse on-time	۲۸٫۶۷	۳۴٫۰۴	۳۵٫۵۹*	۶٫۹۳

به عنوان یک نکته حائز اهمیت دیگر، در ماشینکاری این آلیاژ با تغییر قطب براده برداری از مثبت به منفی شاهد افت شدید نرخ براده برداری خواهیم بود.

#### ۴- آنالیز خاکستری

این قسمت یک مسئله بهینه‌سازی بر روی چهار پاسخ زبری سطح، اضافه برش، نرخ براده برداری و سایش ابزار می‌باشد که برای دستیابی به یک سطح ماشینکاری شده دقیق قابل قبول، انجام گرفته است و منجر می‌گردد به ارائه بهترین ترکیب از کنترل فاکتورهایی که حداکثر راندمان و کیفیت سطح و نیز حداقل انحراف ابعادی و سایش ابزار را به دنبال دارد.

با بکارگیری روش آنالیز خاکستری در مسائل بهینه‌سازی چند پاسخی تاگوچی، ارزیابی همزمان چندین خروجی ممکن می‌شود به نحوی که شرایط بهینه‌ای پیشنهاد می‌شود که عملکرد مورد انتظار فرایند را برآورده می‌نماید. بدین منظور مراحل زیر بایستی طی شود [۱۵].

در انجام آنالیز خاکستری بایستی دو مرحله عمده: (I) نرمال‌سازی و (II) استخراج ضرایب رابطه خاکستری بر اساس مقادیر به دست آمده از آزمایشات، انجام گیرد.

ابتدا بایستی داده‌های تجربی اولیه نرمالیزه شود. نرمال‌سازی سبب می‌شود که واحدهای مختلف فاکتورها بی‌بعد شده و در

مجاور خود، اهمیت بیشتری خواهد داشت و تأثیرگذاری فاکتور مربوطه در این مقدار بهینه بر روی خروجی، برجسته است. معکوس این قضیه نیز وجود دارد. برای مثال در جدول ۹، با وجود اینکه سطح ۳ برای زمان خاموشی پیشنهاد شده است ولی این پارامتر کمترین بیشینه - کمینه را دارد از طرف دیگر، طبق آنالیز واریانس مربوطه (جدول ۸) پایین ترین مشارکت را دارد. از اینرو، انتخاب سطح ۱ یا سطح ۲ برای این فاکتور از لحاظ تئوری تفاوت زیادی در پاسخ را بدنبال نخواهد داشت در حالیکه بایستی دید که آیا در عمل هم انتخاب سطح مناسب برای این پارامتر ممکن است به تغییراتی محسوسی در سایش ابزار شود یا نه. بهترین ملاک در این مورد، رجوع به نمودار اثرات اصلی پارامترها است چرا که این اینگونه نمودارها (شکل ۲) بازگو کننده شرایط واقعی حاکم بر فرایند می‌باشد. با مراجعه به شکل ۲ قویاً می‌توان پیشنهاد کرد که سطح دوم برای فاکتور T<sub>off</sub> انتخاب شود. بنابراین شرایط بهینه برابر خواهد بود با T<sub>off</sub>2T<sub>on</sub>1.

#### ۳-۴- آنالیز نرخ براده برداری

در جدول ۱۰ نتایج آنالیز بر روی نرخ براده برداری ارائه شده است. همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش شدت جریان، نرخ براده برداری هم افزایش می‌یابد. با مدنظر قراردادن شکل ۲، می‌توان گفت که این پارامتر یک تأثیر خطی افزایشی بیش از سه برابری دارد به طوری که مقدار نرخ براده برداری از مقدار ۲۸ mm<sup>3</sup>/min در ۸ آمپر به ۶۴ mm<sup>3</sup>/min در ۱۲ آمپر و نهایتاً به ۹۴ mm<sup>3</sup>/min در ۱۶ آمپر رسیده است. این موضوع، در تنظیم بهینه‌ای که برای نرخ براده برداری در جدول ۱۱ پیشنهاد شده است، مشهود می‌باشد. در ارتباط با سایر پارامترها، کمترین مشارکت در نرخ براده برداری در آنالیز جدول ۱۰، مربوط به T<sub>off</sub> می‌باشد. این بدان معنی است که عمل شستشو در ماشینکاری آلومینیوم که در طی این زمان اتفاق می‌افتد، چندان تأثیر گذار نیست.

همچنین با توجه به قانون حاکم بر مقادیر بیشینه - کمینه در جدول نرخ S/N که قبلاً توضیح داده شد، می‌توان در عمل مقادیر کمتری را برای T<sub>off</sub> انتخاب کرد. از اینرو بهتر است برای انجام سریعتر عمل ماشینکاری این زمان در حداقل نگه داشته شود تا به راندمان فرایند و همچنین کیفیت سطح نهایی بیشتر، مطابق آنچه که در بخش ۳-۱ گفته شد، کمک کند.

منطق روش تاگوچی و اهداف این تحقیق، برای حداقل کردن آنالیز نسبی، نرخ سایش الکتروود، اضافه‌برش و برای حداکثر کردن نرخ براده‌برداری، نسبت S/N بترتیب بر اساس روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شود.

The lower the better:

$$\gamma = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (8)$$

The higher the better:

$$\gamma = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^{-2} \right] \quad (9)$$

در اینجا  $\gamma$ ، دلالت می‌کند به نسبت S/N محاسبه شده از مقادیر مشاهده شده،  $y_i$  مقدار  $i$ th پاسخ و  $n$  تعداد تکرار هر آزمایش است. مقادیر حاصل از عملیات نرمال‌سازی در جدول ۱۲ ظاهر شده است.

محدوده بین ۰ و ۱ قرار گیرد. با توجه به اینکه در این تحقیق سه کاراکتر آنالیز نسبی، نرخ سایش الکتروود و اضافه‌برش بطور انده ال بایستی در حداقل مقدار باشد، امید (expectency) "the-smaller-the-best" برای آنها انتخاب شده است، رابطه نرمالیزسیون به صورت معادله ۶ تعریف می‌شود. این رابطه متناسب با تغییر هر امید می‌تواند به صورت موردی تغییر کند [۱۵] که برای داشتن پاسخ نرخ براده‌برداری حداکثری، رابطه نرمالیزسیون به صورت معادله ۷ ظاهر می‌شود.

$$X_i^*(k) = \frac{\max x_i^o(k) - x_i^o(k)}{\max x_i^o(k) - \min x_i^o(k)} \quad (6)$$

$$X_i^*(k) = \frac{x_i^o(k) - \min x_i^o(k)}{\max x_i^o(k) - \min x_i^o(k)} \quad (7)$$

$x_i^o(k)$  مقدار تولید-نسبی-خاکستری،

S/N کوچکترین مقدار  $\min x_i^o(k)$  و S/N بزرگترین مقدار

بهترین می‌باشد.  $X_i^*(k) = 1$  است. بطور انده‌آل،

نسبت S/N یک معیار تبدیل شده است که انحراف بین مقادیر تجربی و مقادیر مطلوب داده‌ها را بیان می‌کند [۱۴]. بر اساس

جدول ۱۲- نتایج آنالیز خاکستری برای زبری سطح، اضافه برش، نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار

Expt. run	Normalized data				Grey relational coefficient				GRG	Rank
	Ra	OC	EWR	MRR	Ra	OC	EWR	MRR		
۱	۰.۵۰۲	۰.۵۹۸	۰.۳۶۸	۰.۶۸	۰.۵۰۱	۰.۵۵۴	۰.۴۴	۰.۶۱۰	۰.۵۳	۷
۲	۰.۱۰۶۵	۰	۰.۳۳۳	۰	۰.۳۴۸	۰.۳۳۳	۰.۳۴	۰.۳۳۳	۰.۳۴	۱۸
۳	۰.۴۳	۰.۶۳۱	۰.۳۸۹	۰.۶۹	۰.۴۶۷	۰.۵۷۵	۰.۴۵	۰.۶۱۷	۰.۵۳	۶
۴	۰.۳۳۶	۰.۵۹۲	۰.۳۹۷	۰.۷۳	۰.۴۳۰	۰.۵۵۱	۰.۴۵	۰.۶۴۹	۰.۵۲	۹
۵	۰.۳۳۵	۰.۴۵۵	۰.۴۰۸	۰.۸	۰.۴۲۹	۰.۴۷۸	۰.۴۶	۰.۷۱۴	۰.۵۲	۸
۶	۰.۱۸۳	۰.۵۶۷	۰.۰۸۴	۰.۵۱۸	۰.۳۸۰	۰.۵۳۶	۰.۳۵	۰.۵۰۹	۰.۴۴	۱۳
۷	۰.۵۵۲	۰.۶۲۳	۰.۵۱۷	۰.۵۸	۰.۵۲۷	۰.۵۷	۰.۵۱	۰.۵۴۳	۰.۵۴	۵
۸	۰.۶۱۴	۰.۹۴۴	۰.۳۳۳	۰.۷۴	۰.۵۶۴	۰.۸۹۹	۰.۳۴	۰.۶۵۸	۰.۶۲	۲
۹	۱	۱	۱.۰۰۰	۱	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱
۱۰	۰.۳۱۰	۰.۲۸۱	۰.۶۰۳	۰.۴۱	۰.۴۲	۰.۴۱	۰.۵۶	۰.۴۵۹	۰.۴۶	۱۲
۱۱	۰.۱۰۰۳	۰.۱۷۲	۰.۶۰۳	۰.۱۱	۰.۳۳۴	۰.۳۷۷	۰.۵۶	۰.۳۶	۰.۴۱	۱۶
۱۲	۰	۰.۳۶۴	۰.۱۰۰	۰.۶۶	۰.۳۳۳	۰.۴۴۰	۰.۳۳	۰.۵۹۵	۰.۴۳	۱۵
۱۳	۰.۶۲۳	۰.۵۳۴	۰.۶۴۳	۰.۶۰۸	۰.۵۷۰	۰.۵۱۸	۰.۵۸	۰.۵۶۱	۰.۵۶	۳
۱۴	۰.۱۸۱	۰.۳۱۲	۰.۵۹۱	۰.۱۸	۰.۳۷۹	۰.۴۲۱	۰.۵۵	۰.۳۷۹	۰.۴۳۱	۱۴
۱۵	۰.۲۶۵	۰.۶۷	۰.۶۸۳	۰.۳۲۶	۰.۴۰۵	۰.۶۰۲	۰.۵۸	۰.۴۲۶	۰.۵۰	۱۰
۱۶	۰.۴۸۵	۰.۳۶۶	۰.۵۱۹	۰.۴۳	۰.۴۹۳	۰.۴۴۱	۰.۵۱	۰.۴۶۷	۰.۴۸	۱۱
۱۷	۰.۵۴۳	۰.۵۷۰	۰.۵۱۵	۰.۶۲۹	۰.۵۲۲	۰.۵۳۸	۰.۵۱	۰.۵۷۴	۰.۵۴	۴
۱۸	۰.۳۴۱	۰.۳۵۱	۰.۰۶	۰.۱۴۷	۰.۴۳۱	۰.۴۳۵	۰.۳۵	۰.۳۷	۰.۴۰	۱۷



جدول ۱۳- مقایسه مابین تست‌های پیشنهادی توسط آنالیز تاگوچی

Exp.No.	Parameter levels					Experimental values				Initial GRG	Second GRG
	I	T <sub>On</sub>	T <sub>Off</sub>	V	P	EWR	MRR	OC	Ra		
۲	۸	۵۰	۵	۴۰	۰	۰٫۰۵	۱۱	۲۰۹٫۵	۵٫۷۰	۰٫۳۴	۰٫۴۱
۹	۱۶	۱۵۰	۷	۸۰	۰	۳۴٫۱۳	۱۹۵٫۳۲	۴۸۸٫۵	۱۵٫۷۰	۱٫۰۰	۰٫۹۶

شعاعی و سایش الکتروود شده است اگرچه دقیقاً به همین دلیل کمترین نرخ براده برداری را شاهد هستیم.

در این آزمایش مقادیر پارامترها در کمترین سطح خود قرار گرفته است و از نقطه نظر تکنولوژی، یک ماشینکاری آرام و ظریف تجربه شده است. این در حالی است که بنا بر خروجی‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش شماره ۹، یک براده برداری با حجم بالاتر انجام گرفته است و کیفیت ابعادی و سطح همزمان کاهش یافته است.

جهت مقایسه، تنظیم پارامتری متغیرهای فرایند برای این دو آزمایش در جدول زیر خلاصه شده است.

همچنین، برای اعتبار سنجی نتایج حاصل از آنالیز خاکستری، با تنظیم دوباره این دو ترکیب پارامتری و انجام آزمایشهای مجدد، نتایج نشان می‌دهد که کاراکترهای عملکرد چندگانه ماشینکاری تخلیه الکتریکی آلومینیوم ۷۰۷۵ از طریق روش خاکستری بهبود یافته است بطوریکه درجه نسبی خاکستری از مقدار اولیه ۰٫۳۴ به ۰٫۴۱ تغییر است

### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور دستیابی به یک ماشینکاری دقیق و شناخت پارامترهای موثر در آن، یک مطالعه تجربی به صورت همزمان بر روی کاراکترهای پرداخت سطح، دقت ابعادی، نرخ براده برداری و سایش الکتروود در ماشینکاری تخلیه الکتریکی آلیاژ ۷۰۷۵ Al انجام گرفت. جریان تخلیه، زمان روشنی و خاموشی پالس، پلاریته ابزار و ولتاژ تخلیه بعنوان ورودی‌های قابل کنترل در طراحی آزمایشات در نظر گرفته شدند. یافته‌های کلیدی عبارتند از:

در ماشینکاری تخلیه الکتریکی آلومینیوم بر خلاف فرایند فلزات پایه آهنی، انتخاب قطب ماشینکاری تأثیر چندانی در سایش ابزار ندارد.

اینطور می‌توان گفت که تقریباً در تمامی شرایط پارامتری ارائه شده، مقادیر سایش الکتروود همانند مقادیر Ra بسیار ناچیز و در عین حال قابل قبول می‌باشد.

در اینجا، آنالیز خاکستری بر روی چهار خروجی فرآیند (نرخ سایش ابزار، نرخ براده برداری، اضافه برش و زبری سطح طی دو مرحله انجام گرفته است.

سپس، با استفاده از رابطه ۱۰ و ۱۱ ضرایب رابطه خاکستری (GRG) محاسبه خواهد شد

$$\gamma(X_o^*(k), X_i^*(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \Delta_{\max}}, 0 < \gamma \leq 1,$$

$$\xi \in [0, 1] \quad (10)$$

$$\Delta_{oi}(k) = |X_o^*(k) - X_i^*(k)| \quad (11)$$

$\Delta_{\min}$  و  $\Delta_{\max}$  بترتیب کوچکترین و بزرگترین مقدار  $\Delta_{oi}$  است.  $\xi$  ضریب تشخیص است. در اینجا، هیچ پاسخی بر دیگری ترجیح داده نشده است و کیفیت اهداف بر اساس دستیابی به حداقل مقادیر آنالیز نسبی، نرخ سایش الکتروود، اضافه‌برش و همچنین حداکثر کردن نرخ براده‌برداری تعیین شده است. بنابراین،  $\xi$  بطور یکسان برابر ۰/۵ انتخاب شده است.

در مرحله آخر، درجه نسبی خاکستری (Grey relational grade: GRG) توسط رابطه  $\partial$  تعریف شده است.

$$\partial(X_o^*, X_i^*) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \beta_k \gamma(X_o^*(k), X_i^*(k)),$$

$$\sum_{k=1}^n \beta_k = 1 \quad (12)$$

در اینجا، رابطه میان ترتیب‌ها را نشان می‌دهد. وزن هر ضریب نسبی است. مقادیر بالای GRG نشان می‌دهد که اختلاف بین نتایج تجربی و مقادیر نرمالیزه شده ائده‌آل، حداقل است. به بیان دیگر، GRG بزرگتر نماینده شرایط پارامتریکی است که در آن آزمایش به یکی از سه وضعیت کلی ماکزیمم، منیمم یا تارگت خود خواهند رسید. مقادیر GRG برای هر چهار پاسخ در جدول ۱۲ ذکر شده است.

در اینجا با دو نتیجه مختلف از بهینه‌سازی تاگوچی- خاکستری بر اساس رتبه<sup>۱</sup> درجه نسبی خاکستری در جدول ۱۳، مواجه هستیم. آنها آزمایشات شماره ۲ و ۹ می‌باشند که در آنها مقادیر GRG بترتیب حداقل و حداکثر می‌باشد.

با بررسی همزمان چهار پاسخ متناظر در هر یک از آزمایشات فوق، اینگونه دریافت می‌شود که در عمل، برخلاف پیشنهاد اول آنالیز خاکستری، آزمایش شماره ۲ می‌باشد که در شرایط فرایندی منجر به بهترین صافی سطح، کمترین اضافه برش

<sup>1</sup> Rank

materials", J. Mater. Process. Technol, pp.149, 272–277, 2004.

[9] Dhar S., Purohit R., Saini N., Sharma A., Hemath Kumar, G. Mathematical modeling of electric discharge machining of cast Al–4Cu–6Si alloy–10 wt.% SiCP composites. J. Mater. Process. Technol, 194, 24–29, 2007.

[10] O Belgassim., A Abusaada. Investigation of the influence of EDM parameters on the overcut for AISI D3 tool steel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering Engineers, Part B: Journal of Manufacturing Engineering. DOI: 10.1177/0954405411400498..

[11] Joseph R. Davis, ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys: ISBN: 978-0-87170-496-2, 1993.

[12] Furu T, Pedersen KO. The influence of grain structure and texture on formability and toughness of extruded aluminium alloys. Mater Sci Forum; 519–521:1421–8, 2006.

[13] [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: pp. 591–610, 2010.

[14] D.C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments. 7th ed, John Wiley & Sons Inc, 2008.

[15] R. Venkata Rao, Advanced modeling and optimization of manufacturing processes: International research and development, 1th ed. Springer-Verlag, 2011.

در مرحله اول، هر خروجی با ورودی‌های متناظر با آن به صورت مستقل تحلیل شد چرا که در مورد برخی از پاسخ‌ها از جمله پاسخ اضافه برش به صورت اصولی نیاز بود که در ابتدا این پاسخ به صورت انفرادی مورد شناسایی و تحلیل قرار گیرد زیرا اینکار به فهم دقیق‌تر و راحت‌تر این پاسخ‌ها کمک می‌کرد.

در مرحله دوم، با لحاظ کردن تمامی خروجی‌های فرآیند با استفاده از روش آنالیز خاکستری یک بهینه‌سازی بر روی کل فرآیند انجام گرفت و به ماشینکاری تخلیه الکتریکی آلومینیوم به طور کلی نگریسته شده است. در هر دو مرحله و بخصوص مرحله بهینه‌سازی با آنالیز خاکستری اثبات شده که برای داشتن یک ماشینکاری دقیق‌تر نیاز است که پارامترهای ورودی ماشینکاری در حداقل مقدار خود تنظیم شوند. تنظیم پارامترها با مقادیر کوچکتر، حاکی از آن است که ماشینکاری آلومینیوم یک فرآیند کند و زمان‌بر است.

### مراجع

[1] Ho KH., Newman ST. State of the art electrical discharge machining (EDM). Int J Mach Tools Manuf, pp.43, 1287–1300, 2003.

[2] Amorim F. L., Weingaertner W. L., "Influence of Duty Factor on the Die-Sinking Electrical Discharge Machining of High-Strength Aluminum Alloy under Rough Machining", J. the Braz. Soc. Mechanical Sciences, 24(3), pp.194-199, 2002.

[3] R. Karthikeyan., P.R. Lakshmi Narayanan., R.S. Naagarazan. Mathematical modelling for electric discharge machining of aluminium–silicon carbide particulate composites. J. Mater. Process. Technol., 87, 59–63, 1999.

[4] Y. Uno., A. Okada., Y. Hayashi., Y. Tabuchi. Surface Integrity in EDM of Aluminum Bronze with Nickel Powder Mixed Fluid. J. Jpn. Soc. Elec. Mach. Eng, 32, 24–31, 1998.

[5] A.A Khan. Electrode wear and material removal rate during EDM of aluminum and mild steel using copper and brass electrodes. Int J Adv Manuf Technol., 39, 482–487, 2008.

[6] Jun Qu., Albert J. Shih., Ronald O. Scattergood. Development of the Cylindrical Wire Electrical Discharge Machining Process, Part 1: Concept, Design, and Material Removal Rate. Transactions of the ASME, J Manuf Science and Eng, DOI: 10.1115/1.1475321, 2002.

[7] Yakup Yildiz., Murali M. Sundaram., Kamlakar P. Rajurkar. Statistical analysis and optimization study on the machinability of beryllium-copper alloy in electro discharge machining. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering Engineers, Part B: Journal of Manufacturing Engineering. DOI: 10.1177/0954405412457610.

[8] Singh S., Maheshwari S., Pandey P. C., "Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode