

بهینه‌سازی همزمان پاسخهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک تحت اثر گازهای مختلف با استفاده از آنالیز گری مبتنی بر روش تاگوچی

سامان فتاحی

کارشناس ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی واحد آمل، آمل، ایران

حمید باصری*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

چکیده

فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک، فرآیندی دوستدار محیط زیست می باشد که در آن به جای دی الکتریک مایع که عموماً از مشتقات نفتی می باشد، از گازهایی مانند هوا یا نیتروژن به عنوان دی الکتریک استفاده می‌شود. در این مقاله، در ابتدا هر یک از پاسخهای این فرآیند شامل نرخ براده برداری، زبری سطح و اضافه برش شعاعی با در نظر گرفتن شش پارامتر ورودی جریان، زمان روشنایی پالس، سیکل کاری، سرعت دوران اسپیندل، فشار گاز و نوع گاز بهینه سازی می شوند. از بین پارامترهای ورودی، ۵ پارامتر کمی و یک پارامتر کیفی (نوع گاز) وجود دارد که علاوه بر بررسی دی الکتریک معمول در ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک که هوا می‌باشد، گازهای نیتروژن و مخلوط آرگون/ هوا نیز به عنوان سایر ورودیهای این پارامتر بررسی شده اند. هدف اصلی این مقاله بهینه‌سازی همزمان پاسخهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک با استفاده از روش آنالیز گری مبتنی بر روش تاگوچی می‌باشد. نتایج بهینه سازی نشان می دهد که سطوح بهینه حاصل از تحلیل درجات گری در جریان $I=12\text{ A}$ ، زمان روشنایی پالس $T_{on}=100\ \mu\text{s}$ ، سیکل کاری $D=66$ ، فشار گاز $P=3\text{ bar}$ ، سرعت دورانی اسپیندل $N=300\text{ rpm}$ و در حضور گاز نیتروژن به عنوان محیط دی الکتریک حاصل می‌شود آزمایش تایید در حالت بهینه سازی شده توسط روش آنالیز گری نشان می‌دهد که حالت بهینه دارای حداکثر درجه گری می‌باشد که این مطلب خود صحت پیش بینی شرایط بهینه توسط آنالیز گری را تایید می‌کند همچنین با توجه به وزن در نظر گرفته شده مساوی برای پاسخ ها و با توجه به اثر مشابه پارامترهای کیفی زبری سطح و اضافه برش شعاعی که هر دو دارای خصوصیت هر چه کوچکتر بهتر می باشند، در آنالیز گری، اثر بهینه سازی صورت گرفته بر این دو پاسخ بیشتر از نرخ براده برداری بوده است و **واژه‌های کلیدی:** ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک، روش تاگوچی، آنالیز گری، بهینه سازی همزمان پاسخها.

Multi-response Optimization of Dry EDM with Different Mediums Using the Taguchi Based Grey Relational Analysis

S. Fattahi

Young Researchers and Elite Club of Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran

H. Baseri

Mechanical Engineering Department, Babol University of Technology, Babol, Iran

Abstract

Dry electrical discharge machining is a sustainable machining process that is used gas medium such as air or Nitrogen instead of liquid dielectric mediums that are mainly based on oil derivation. In the current research, first each of three main responses including material removal rate (MRR), surface roughness (Ra) and radial overcut (ROC) have been optimized considering the effects of six main input factors including current (I), pulse on time (Ton), duty factor (D), spindle rotational speed (N), gas pressure (P) and the gas type. Regarding the input factors, there are five quantitative and one qualitative input factor (gas type). So, in addition of air as most common dielectric medium, Nitrogen and mixture of Argon and air have been investigated as the other input factors of this parameter. The main purpose of this study is the multi objective optimization of dry electrical discharge machining responses by using the Grey relational analysis based on the Taguchi method. The results of this optimization method show the optimized level at $I=12\text{A}$, Pulse on time (T_{on})= $100\ \mu\text{s}$, Duty factor (D)= 66 , Gas Pressure (P)= 3 bar and Spindle rotational speed (N)= 300 rpm and Nitrogen as the dielectric medium. The confirmation experiment at the optimized level by this method depicts that the optimized level has the maximum grey grade, hence it confirms the accuracy of the optimized level by Grey Relational Analysis method. Also, regarding the equal weights of responses and considering the same effects of the surface roughness and radial over cut that both of them have the smaller the better characteristics, the optimization results in more effect on these responses in comparison with material removal rate.

Keywords: Dry EDM, Taguchi method, Grey relational analysis, multi-objective optimization.

دی الکتریک^۱ مایع می‌باشد که در آن به جای مایع دی الکتریک که عمدتاً از مشتقات نفت و یا آب مقطر می باشد، از گاز استفاده می شود. در این روش، گاز با سرعت بالا موجب سهولت خروج براده‌ها از سطح قطعه کار شده و از گرمای بیش از اندازه قطعه کار و ابزار در ناحیه

۱- مقدمه

ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک، حالت تغییر یافته و همچنین دوستدار محیط زیست [۱] ماشینکاری تخلیه الکتریکی رایج (در حضور

¹ Dielectric

مینای آرایه‌های^۶ عمودی می‌باشد، تنها شامل کسری از طراحی آزمایش فاکتوریل کامل^۷ می‌باشد و می‌توان با تعداد آزمایشات کمتر، اثر تمام پارامترهای ورودی را بر روی پاسخهای فرایند بررسی نمود [۸]. روش تاگوچی برای بهینه سازی یک پاسخ در هر مرحله طراحی شده است. به عنوان مثال سطوح بهینه انتخاب شده برای نرخ براده برداری با سطوح بهینه انتخاب شده برای زبری سطح کاملا متفاوت می‌باشد.

کاربرد روش آنالیز گری^۸ برای حل مسایل بهینه سازی برای نخستین بار توسط دنگ [۹] مطرح شد. به علت طبیعت پیچیده فرایندهای ماشینکاری، این روش مقبولیت گسترده ای در بهینه سازی پاسخها در این فرایندها از جمله ماشینکاری تخلیه الکتریکی یافته است. در سال ۲۰۰۲ لین و همکاران [۱۰] از آنالیز گری برای بهینه سازی همزمان پاسخهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی شامل نرخ براده برداری، زبری سطح و نرخ خوردگی ابزار استفاده کردند. نتایج این مطالعات نشان داد که پاسخهای فرایند تخلیه الکتریکی به طور موثر توسط این روش بهینه سازی شده‌اند. سینگ و همکاران [۷] از آنالیز گری به همراه روش تاگوچی برای بهینه‌سازی پنج پاسخ ماشینکاری تخلیه الکتریکی کامپوزیت آلومینیوم-سیلیسیم شامل نرخ براده‌برداری، زبری سطح، نرخ خوردگی ابزار، مخروطی بودن و اضافه برش شعاعی استفاده کردند. اخیرا در سال ۲۰۱۲ سیواسانکار و همکاران [۱۱] از آنالیز گری بر پایه آنروپی برای بهینه سازی ماشینکاری تخلیه الکتریکی استفاده کردند. البته به علت این که فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک، فرایندی جدید می‌باشد، تا کنون تحقیقات اندکی در زمینه بهینه سازی همزمان پاسخهای این فرایند صورت گرفته است.

در این مقاله، ابتدا حالت بهینه هر یک از پاسخها با در نظر گرفتن تنها یک پاسخ، با استفاده از آنالیز واریانس برای هر یک از پاسخها استخراج می‌شود. سپس با استفاده از آنالیز گری مبتنی بر روش طراحی آزمایشات تاگوچی، بهینه سازی پاسخها به طور همزمان صورت خواهد پذیرفت و حالت بهینه با در نظر گرفتن اثر تمام پاسخها، به دست خواهد آمد.

۲- تجهیزات و آزمایشها

تمامی آزمایشات صورت گرفته، توسط ماشین اسپارک شرکت تهران اکرام با اعمال تغییرات در مکانیزم مرسوم آن، انجام گرفته است. به منظور اجرای آزمایشات در حالت خشک، مکانیزمی به دستگاه اسپارک موجود اضافه شده است. چرا که روش ورود دی الکتریک به محیط ماشینکاری با حالت مورد استفاده در دستگاه متفاوت می‌باشد. همچنین با توجه به لزوم حرکت چرخشی الکترود در این نوع ماشینکاری، مکانیزمی برای حرکت چرخشی الکترود به سیستم موجود اضافه شده است. در شکل ۱ طرح کلی مکانیزم دستگاه تخلیه الکتریکی خشک به کار رفته در این تحقیق و همچنین نمایی از مکانیزم اضافه شده به دستگاه نشان داده شده است.

تخلیه الکتریکی جلوگیری می‌کند (تخلیه براده و انتقال گرما از ناحیه ماشینکاری). حرکت چرخشی الکترود برای نگهداشتن پایداری فرایند در این ماشینکاری ضروری می‌باشد [۲]. در این فرایند الکترود به شکل تو خالی می‌باشد تا گاز در حین چرخش الکترود با سرعت بالا از داخل آن عبور کند. این گاز در فاصله^۱ بین ابزار و قطعه نقش محیط دی الکتریک را ایفا می‌کند. همچنین، جریان پیوسته گاز در فاصله گپ باعث راندن براده‌ها از آن می‌شود. چرخش الکترود در طول ماشینکاری نه تنها شرایط شستشو را بهتر می‌کند، بلکه باعث افزایش پایداری فرایند و کاهش احتمال اتصال کوتاه^۲ بین الکترودها می‌شود. نخستین کار انجام گرفته در زمینه ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک مربوط به گزارش فنی از سازمان هوا فضای آمریکا در سال ۱۹۸۵ می‌باشد [۳]. در این گزارش به طور مختصر ذکر شده است که از گاز آرگون و هلیوم برای سوراخ کاری توسط الکترود مسی لوله‌ای شکل استفاده شده است. البته در این گزارش جزئیات بیشتری درباره نحوه انجام این کار ذکر نشده است. در سال ۱۹۹۱ کنیدا و همکارانش [۴] با اضافه کردن گاز اکسیژن در فاصله بین الکترود و قطعه کار در حضور دی الکتریک آب سبب افزایش نرخ براده برداری ماشینکاری تخلیه الکتریکی شدند. در سال ۱۹۹۷ برای نخستین بار در یک کار تحقیقاتی از گاز اکسیژن به عنوان محیط دی الکتریک استفاده شد. این کار با عبور گاز با فشار بالا از داخل الکترود چرخان توخالی مسی انجام پذیرفت [۲]. در تحقیقات انجام گرفته کنیدا و همکارانش [۲، ۵، ۶] در مورد فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک مزایای استفاده از این روش ماشینکاری را روشن کرد. این مزایا عبارتند از: خوردگی ابزار بسیار کم، فاصله گپ کم، تنش‌های پسماند کم، لایه انجماد مجدد^۳ کوچک‌تر و ناحیه متأثر از گرما کوچک‌تر. این تحقیق مشخص کرد که حرکت چرخشی الکترود برای جلوگیری از به وقوع پیوستن اتصال کوتاه و آرک در این نوع ماشینکاری الزامی می‌باشد. همچنین وجود اکسیژن در حضور گرمای بالا در ناحیه ماشینکاری منجر به افزایش یافتن سرعت اکسایش^۴ و در نتیجه افزایش نرخ براده برداری خواهد شد.

عموما در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به علت وجود پارامترهای موثر بسیار و همچنین خروجی های زیاد فرایند، بهینه سازی فرایند امری بسیار دشوار است. معمولا روابط پیچیده ای بین تاثیر این پارامترها بر روی پاسخ های فرایند حکمفرماست و با بهینه سازی تنها یکی از پاسخ ها نمی توان به حالت بهینه برای سایر پاسخ ها دست یافت. به عنوان مثال معمولا با بهینه سازی نرخ براده برداری (MRR) در ماشینکاری تخلیه الکتریکی، عموما پارامترهای زبری سطح و دقت ابعادی در شرایط حداقلی قرار می گیرند و بالعکس. بنابراین بهینه سازی تنها یکی از پاسخ های ماشینکاری، به منظور بهینه سازی کل فرایند نمی تواند چندان موثر باشد [۷].

با توجه به تعداد بالای ورودیها در فرایندهای ماشینکاری، برای بررسی اثر تمامی فاکتورها بر روی پاسخها نیاز به روشهای طراحی آزمایش جهت کاهش تعداد مراحل آزمایشات می باشد. روش تاگوچی^۵ که بر

¹ Gap

² Arc

³ Recast layer

⁴ Oxidation

⁵ Taguchi

⁶ Array

⁷ Full factorial

⁸ Grey rational analysis

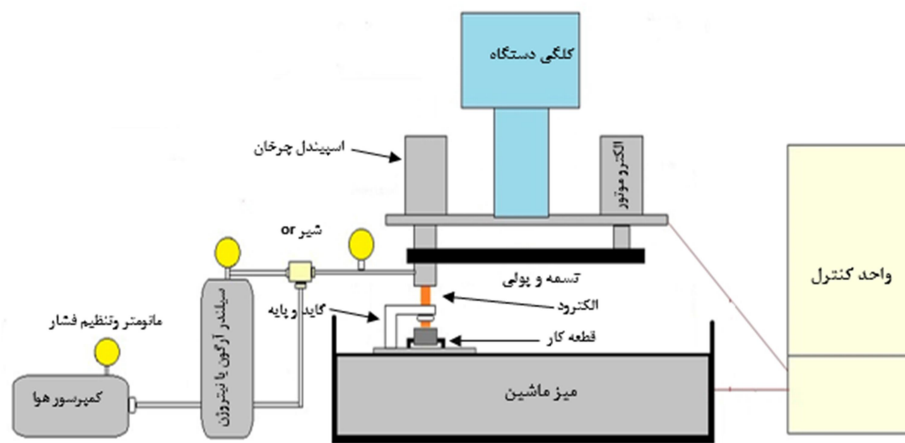
برای افزایش دقت نتایج، تمام آزمایشات در این تحقیق سه بار تکرار شده‌اند و نسبت سیگنال به نویز پاسخ‌ها تحلیل شده است. نرخ براده برداری به عنوان یکی از مهمترین پاسخ‌های مورد بررسی در این تحقیق می‌باشد.

برای اندازه‌گیری نرخ براده برداری، جرم قطعه کار قبل و بعد از ماشینکاری اندازه‌گیری می‌شود و نرخ براده برداری عبارتست از نسبت ماده برداشته شده از قطعه به زمان ماشینکاری.

در این تحقیق، از فولاد تندبر سری M35 استفاده شده است. در جدول ۱، درصد عناصر آلیاژی این ماده نشان داده شده است. الکتروود مورد استفاده در این تحقیق نیز الکتروود مسی ۳ کاناله، با درجه خلوص ۹۹٫۹۹ درصد و قطر ۳ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی قطعه کار M35

عنصر	Cr	W	Mn	Mo	C	V	Fe
درصد وزنی %	۴/۱	۶	۰/۳۰	۵	۰/۹۴	۲	باقی



شکل ۱- مکانیزم ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک

در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به توضیحات ذکر شده، آرایه عمودی L27 برای روش طراحی آزمایش تاگوچی انتخاب شده است.

جدول ۲- انتخاب سطوح پارامترهای ورودی برای طراحی آزمایشات

پارامتر ورودی طراحی آزمایش	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
جریان (A)	۱۲	۲۱	۳۰
زمان روشنایی پالس (μs)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
سیکل کاری	۴۰	۶۶	۸۶
سرعت دورانی اسپیندل (rpm)	۱۵۰	۳۰۰	۴۵۰
فشار گاز (bar)	۱	۲	۳
نوع گاز	هوا	نیتروژن	آرگون+هوا

با توجه به احتمال وقوع خطا در مراحل آزمایشات هر آزمایش ۳ مرتبه انجام گرفته است. معمولاً دو نوع تحلیل پاسخ‌ها وجود دارد: تحلیل نسبت سیگنال به نویز^۱ (S/N) و تحلیل میانگین پاسخ‌ها که معمولاً هنگامی که تعداد تکرار آزمایشات زیاد باشد، برای جلوگیری از عدم تاثیر اغتشاش (نویز) پاسخ‌ها از تحلیل نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌شود به این صورت که ابتدا پاسخ‌ها به نسبت سیگنال به نویز با توجه به ویژگی آنها (هر چه بزرگتر بهتر، هر چه کوچکتر بهتر و هر چه به مقدار اسمی نزدیکتر بهتر) تبدیل می‌شوند و سپس این نسبت سیگنال به نویز به عنوان پاسخ تحلیل خواهد شد. در این تحقیق، نرخ براده برداری دارای ویژگی هر چه بزرگتر بهتر و زبری سطح و اضافه

۳- روش بهینه‌سازی همزمان پاسخها بر اساس آنالیز گری مبتنی بر طراحی آزمایش تاگوچی

۳-۱- پارامترهای ورودی و طراحی آزمایشات بر مبنای روش تاگوچی

در این مقاله، از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای بررسی پاسخهای آزمایشات استفاده شده است و از آنالیز گری مبتنی بر روش تاگوچی به منظور بهینه‌سازی همزمان پاسخهای آزمایشات استفاده شده است. در ادامه مختصری درباره روش تاگوچی و حالت بهینه شده هر یک از پاسخها به منظور مقایسه و ارزیابی با حالت بهینه شده توسط روش آنالیز گری بحث خواهد شد.

مطابق توضیحات و همان گونه که در مرجع [۱۲] ذکر شده است، طراحی آزمایش شامل شش پارامتر ورودی شامل جریان (I)، زمان روشنایی پالس (Ton)، سیکل کاری (D)، فشار گاز (P)، سرعت دورانی اسپیندل (N) و نوع گاز مورد استفاده که پارامتری کیفی است و همچنین سه پارامتر خروجی (پاسخ فرایند) شامل نرخ براده برداری (MRR)، زبری سطح (Ra) و اضافه برش شعاعی (ROC) می‌باشد. در جدول ۲، مقادیر سه سطح در نظر گرفته شده با توجه به آزمایشات اکتشافی صورت گرفته ذکر شده است. با توجه به تحقیقات پیشین [۷] و مکانیزم ماشینکاری و محدودیت انتخاب حداکثر ۳ تداخل، و اثر بیشتر پارامترهای ماشین (جریان، زمان روشنایی پالس و سیکل کاری) بر روی پاسخهای در نظر گرفته شده، تداخل پارامترهای ماشین یعنی جریان×زمان روشنایی پالس، جریان×سیکل کاری و زمان روشنایی پالس×سیکل کاری به عنوان ۳ تداخل در طراحی آزمایش تاگوچی مورد نظر

¹ Signal-to-noise ratio

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \psi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(j) + \psi \Delta_{\max}} \quad (5)$$

که در این رابطه $\Delta_{0i}(j) = |x_0(j) - x_i(j)|$ و $0 < \psi < 1$ ضریب تشخیص برای هر پارامتر می باشد که معمولاً برابر ۰/۵ در نظر گرفته می شود. Δ_{\max} و Δ_{\min} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار Δ_{0i} می باشد. در نهایت درجه گیری بر اساس رابطه زیر به دست می آید:

$$\delta(j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \xi_{ij} \quad (6)$$

که m تعداد پاسخها می باشد که در این تحقیق ۳ می باشد.

۳-۲-۲- انتخاب سطوح بهینه و برآورد شرایط بهینه

درجه گیری، در واقع پاسخی است که شامل اثر تمام پاسخ های فرایند می باشد. در این مرحله پس از تحلیل واریانس درجات گیری، سطوح بهینه و پارامترهایی که دارای اثر معنادار بر پاسخ که در اینجا همان درجات گیری می باشند، مشخص می شوند. اگر سطوح بهینه در طراحی آزمایشات موجود نباشند، نیاز به ارزیابی شرایط بهینه داریم. پیش بینی حالت بهینه مطابق رابطه ۷ صورت می پذیرد:

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^q (\gamma_i - \gamma_m) \quad (7)$$

در این رابطه γ_m میانگین درجات گیری، γ_i میانگین درجات گیری برای هر فاکتور در سطوح بهینه و q تعداد پارامترهایی است که در سطح اطمینان در نظر گرفته شده از نظر آماری معنا دار می باشند. برای ارزیابی و صحت شرایط پیش بینی شده، این مقدار با نتیجه آزمون تایید که در شرایط بهینه انجام می پذیرد، مقایسه می شود.

۴- نتایج و بحث

در جدول ۳، آرایه عمودی L27 تاگوچی به همراه سطوح پارامترهای ورودی و مقادیر پاسخ ها نشان داده شده است. همان طور که ذکر شد، با استفاده از تحلیل واریانس و نمودار اثرات اصلی، شرایط بهینه برای هر پاسخ استخراج می شود. در شکل ۲ نمودار اثرات اصلی پاسخ ها به همراه حالت بهینه برای هر پاسخ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲، حداکثر نرخ نسبت سیگنال به نویز برای هر سه پاسخ به عنوان حالت بهینه در نظر گرفته می شود، بنابراین برای نرخ براده برداری، حالت بهینه برداری در جریان $I=30$ A، زمان روشنایی پالس $T_{on}=300$ μ s، سیکل کاری $D=86$ ، فشارگاز $P=3$ bar، سرعت دورانی اسپیندل $N=300$ rpm و در حضور ترکیب گاز هوا و آرگون به عنوان محیط دی الکتریک رخ می دهد. شرایط بهینه برای دست یابی به حداقل زبری سطح (حالت بهینه) در جریان $I=12$ A، زمان روشنایی پالس $T_{on}=100$ μ s، سیکل کاری $D=40$ ، فشارگاز $P=3$ bar، سرعت دورانی اسپیندل $N=450$ rpm و در حضور گاز نیتروژن به عنوان محیط دی الکتریک رخ می دهد و شرایط بهینه برای دستیابی به حداقل ROC (حالت بهینه) در جریان $I=14$ A، زمان روشنایی پالس $T_{on}=100$ μ s، سیکل کاری $D=40$ ، فشارگاز $P=1$ bar، سرعت دورانی $N=150$ rpm و در حضور گاز نیتروژن به عنوان محیط دی الکتریک رخ می دهد.

برش شعاعی دارای ویژگی هر چه کوچکتر بهتر می باشند. برای تبدیل پاسخ ها به نسبت سیگنال به نویز، در حالتی که خصوصیت کیفی بصورت "هر چه بزرگتر، بهتر" باشد از HB و در حالتی که خصوصیت کیفی بصورت "هر چه کوچکتر، بهتر" باشد از LB بصورت زیر استفاده می شود:

$$HB: S/N = -10 \log\left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}\right) \quad (1)$$

$$LB: S/N = -10 \log\left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}\right) \quad (2)$$

که در این روابط، n تعداد پاسخها، x_i هر یک از پاسخها و S/N نسبت سیگنال به نویز می باشد

پس از تبدیل، نسبت سیگنال به نویز به عنوان پاسخ مورد تحلیل قرار خواهد گرفت و با استفاده از آنالیز واریانس و نمودار اثرات اصلی حالت های بهینه هر یک از پاسخها که در واقع حداکثر نسبت سیگنال به نویز برای هر پاسخ می باشد، استخراج خواهد شد. در بخش ۴، نمودارهای اثرات اصلی برای هر پاسخ به منظور بررسی حالت بهینه بدون در نظر گرفتن اثر سایر پاسخ ها و مقایسه آن با حالت بهینه سازی شده همزمان توسط آنالیز گیری نشان داده خواهد شد.

۳-۲-۳- بهینه سازی همزمان پاسخ ها توسط آنالیز گیری

مبتنی بر روش طراحی آزمایشات تاگوچی

استفاده از آنالیز گیری برای بهینه سازی همزمان پاسخها شامل مراحل زیر می باشد

- نرمال سازی پاسخها برای تمام آزمایشات
- محاسبه ضرایب گیری
- محاسبه درجه گیری با استفاده از میانگین گرفتن ضرایب گیری
- در نظر گرفتن درجه گیری به عنوان یک پاسخ و تحلیل واریانس
- انتخاب سطوح بهینه بر اساس این تحلیل
- مقایسه این پاسخ با پاسخ حاصل از آزمون تایید

۳-۲-۱- پردازش داده ها توسط آنالیز گیری

اولین مرحله در آنالیز گیری، نرمال سازی داده ها به اعدادی بین صفر و یک می باشد. برای پاسخهایی با ویژگی هر چه کوچکتر این عمل با استفاده از رابطه زیر صورت می پذیرد:

$$x_{ij} = \frac{\max y_{ij} - y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}} \quad (3)$$

و برای پاسخهایی با خصوصیت هر چه بزرگتر، بهتر داریم:

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}} \quad (4)$$

در این روابط x_{ij} مقادیر نرمال سازی شده می باشند. $\max y_{ij}$ و $\min y_{ij}$ به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر برای پاسخ z می باشند. بهترین ترتیب قرارگیری، بزرگترین مقدار x_{ij} برای هر z می باشد. مرحله بعد، محاسبه ضرایب گیری برای پاسخها می باشد که از رابطه زیر به دست می آید:

جدول ۳- آرایه L27 تاگوچی به همراه پاسخ‌ها برای ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک

Run No.	I (A)	Ton (μs)	D (%)	P (bar)	N (rpm)	نوع گاز	نرخ براده برداری در سه تکرار بر حسب mm ³ /min			زبری سطح در سه تکرار بر حسب میکرومتر			اضافه برش شعاعی در سه تکرار بر حسب میکرومتر			نسبت سیگنال به نویز بر حسب db		
							MRR1	MRR2	MRR3	Ra1	Ra2	Ra3	ROC1	ROC2	ROC3	MRR	Ra	ROC
							1	12	100	40	1	150	هوا	0.56	0.58	0.48	4.11	3.74
2	12	100	66	2	300	آرگون+هوا	0.84	0.73	0.87	2.97	2.90	2.61	103.3	100.9	90.8	-1.87	-9.04	-39.86
3	12	100	86	3	450	نیترژن	0.18	0.19	0.25	2.41	2.27	1.95	105.5	99.5	85.2	-13.94	-6.92	-39.75
4	12	200	40	2	300	نیترژن	0.18	0.19	0.19	2.37	2.68	2.44	92.1	104.1	94.6	-14.48	-7.97	-39.74
5	12	200	66	3	450	هوا	1.11	1.27	1.31	4.02	3.74	3.74	138.6	128.8	128.8	1.73	-11.67	-42.42
6	12	200	86	1	150	آرگون+هوا	1.42	1.24	1.29	4.10	4.43	4.43	114.8	124.0	124.0	2.34	-12.71	-41.66
7	12	300	40	3	450	آرگون+هوا	1.00	1.19	0.91	4.08	3.88	3.98	151.1	143.7	147.4	0.12	-12.00	-43.37
8	12	300	66	1	150	نیترژن	0.27	0.25	0.31	4.00	4.26	3.07	116.4	124.1	89.5	-11.31	-11.62	-40.91
9	12	300	86	2	300	هوا	1.84	2.11	1.89	5.19	6.12	5.05	163.2	192.3	158.6	5.75	-14.76	-44.71
10	21	100	40	2	450	آرگون+هوا	1.20	1.28	1.18	3.47	2.87	1.94	155.2	128.6	86.9	1.71	-9.04	-42.06
11	21	100	66	3	150	نیترژن	0.18	0.18	0.15	2.57	2.45	2.12	110.4	105.0	91.1	-15.45	-7.56	-40.22
12	21	100	86	1	300	هوا	1.35	1.29	1.39	4.33	4.23	3.81	155.4	151.8	136.6	2.54	-12.32	-43.42
13	21	200	40	3	150	هوا	1.37	1.21	1.64	3.73	4.27	4.47	138.8	159.1	166.5	2.78	-12.40	-43.82
14	21	200	66	1	300	آرگون+هوا	1.85	2.03	1.92	4.23	4.14	3.72	151.0	147.6	132.8	5.71	-12.12	-43.17
15	21	200	86	2	450	نیترژن	0.45	0.50	0.54	2.83	3.41	3.11	114.9	138.5	126.3	-6.19	-9.90	-42.07
16	21	300	40	1	300	نیترژن	0.38	0.32	0.41	4.14	4.22	3.81	131.6	134.1	121.1	-8.84	-12.18	-42.22
17	21	300	66	2	450	هوا	1.58	1.33	1.32	5.74	5.71	4.93	193.1	192.3	165.7	2.89	-14.76	-45.30
18	21	300	86	3	150	آرگون+هوا	3.60	3.33	3.66	5.09	5.18	4.45	191.4	194.9	167.5	10.94	-13.84	-45.34
19	30	100	40	3	300	نیترژن	0.32	0.38	0.36	2.54	2.63	2.60	116.7	120.9	119.7	-9.13	-8.26	-41.52
20	30	100	66	1	450	هوا	1.43	1.45	1.53	4.74	4.84	3.91	146.2	149.5	120.7	3.32	-13.09	-42.88
21	30	100	86	2	150	آرگون+هوا	1.63	1.58	1.76	3.84	4.09	3.82	140.2	149.4	139.5	4.36	-11.86	-43.11
22	30	200	40	1	450	آرگون+هوا	2.13	2.18	1.86	4.86	4.74	4.27	157.6	153.9	138.5	6.20	-13.31	-43.54
23	30	200	66	2	150	نیترژن	0.47	0.57	0.48	4.02	3.89	3.29	133.0	128.7	109.0	-6.05	-11.47	-41.87
24	30	200	86	3	300	هوا	3.33	3.30	3.48	5.82	5.61	5.19	196.1	189.1	175.1	10.54	-14.88	-45.44
25	30	300	40	2	150	هوا	2.09	2.13	1.87	5.32	6.38	7.72	156.9	188.2	227.7	6.10	-16.32	-45.72
26	30	300	66	3	300	آرگون+هوا	3.77	3.54	3.39	5.03	5.51	5.44	179.2	196.5	193.8	11.02	-14.53	-45.58
27	30	300	86	1	450	نیترژن	0.53	0.52	0.55	4.67	5.14	4.95	164.8	181.4	174.6	-5.44	-13.84	-44.80

براده برداری دارای خصوصیت هرچه بزرگتر، بهتر می‌باشد و زبری سطح و اضافه برش شعاعی دارای خصوصیت هر چه کوچکتر، بهتر می‌باشند. با استفاده از روابط (۳) و (۴) مطابق ویژگی هر یک از این پاسخ‌ها مقادیر نرمال سازی شده استخراج خواهند شد.

جدول ۵ مقادیر نرمال سازی شده برای این پاسخ‌ها را نشان می‌دهد. مرحله بعدی محاسبه ضرایب گری (با استفاده از رابطه (۵)) از این مقادیر نرمال سازی شده می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به مساوی در نظر گرفتن وزن همه پاسخ‌ها، مقدار $\psi=0.5$ (ضریب تشخیص) در نظر گرفته می‌شود. در نهایت درجه گری از رابطه (۶) به دست می‌آید. جدول ۶ ضرایب گری و درجه گری محاسبه شده را نشان می‌دهد.

طبق تئوری دنگ، هرچه درجه گری برای پاسخی بیشتر باشد، آن پاسخ به شرایط بهینه نزدیکتر می‌باشد. ستون آخر جدول ۶ شماره آزمایشات بر مبنای ترتیب ضرایب گری از مقادیر بزرگ به کوچک را نشان می‌دهد. این ترتیب بر مبنای بهینه ترین شرایط پیش بین شده بر مبنای آنالیز گری می‌باشد. طبق این ترتیب آزمایش شماره ۳ دارای

جدول ۴ نتایج آزمایشات تایید صورت گرفته در هر یک از حالت‌های ذکر شده و پاسخ بهینه برای هر یک از خروجی‌های فرایند به صورت جداگانه و بدون در نظر گرفتن سایر خروجی‌ها را نشان می‌دهد. همان طور که ذکر شد عیب این نوع بهینه سازی پاسخ‌ها نادیده گرفته شدن سایر پاسخ‌ها می‌باشد. مثلاً در اینجا در بهینه (حداکثر) نرخ براده برداری، شرایط زبری سطح و اضافه برش شعاعی مطلوب نمی‌باشد. در ادامه حالت بهینه سازی شده همزمان توسط آنالیز گری با حالت‌های بهینه شده به صورت جداگانه مقایسه خواهد شد.

۴-۱- بهینه سازی همزمان پاسخ‌ها توسط آنالیز گری

در این قسمت ابتدا به مراحل بهینه سازی داده‌ها در این تحقیق، توسط آنالیز گری پرداخته و سپس نتایج حالت بهینه شده را با حالت‌های بهینه سازی شده به صورت تک پاسخ مقایسه خواهیم کرد.

همان طور که در قسمت قبل توضیح داده شد، برای نرمال سازی داده‌ها از روابط (۳) و (۴) مطابق خصوصیت پاسخ استفاده می‌کنیم. نرخ

پاسخ‌ها را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود جریان، زمان روشنایی پالس، فشار گاز و نوع گاز در سطح اطمینان ۹۵ درصد از نظر آماری معنا دار می‌باشند. همچنین شکل ۳ نمودار اثرات اصلی برای نسبت سیگنال به نویز درجه گری را نشان می‌دهد.

۴-۲-۱- انتخاب سطوح بهینه بر مبنای تحلیل درجات گری

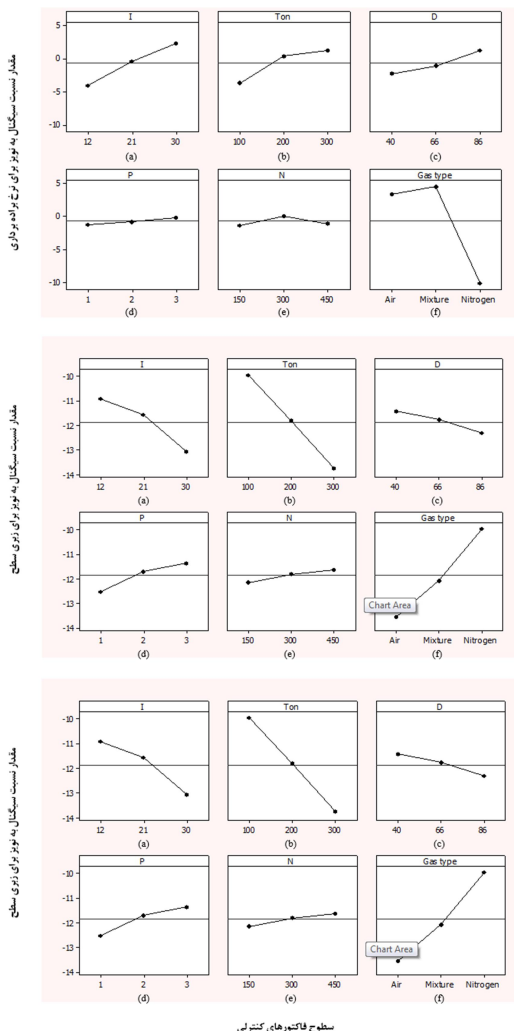
مطابق شکل ۳، سطوح بهینه حاصل از تحلیل درجات گری در جریان $I=12\text{ A}$ ، زمان روشنایی پالس $T_{on}=100\ \mu\text{s}$ ، سیکل کاری $D=66$ ، فشار گاز $P=3\text{ bar}$ ، سرعت دورانی اسپیندل $N=300\text{ rpm}$ و در حضور گاز نیتروژن به عنوان محیط دی الکتریک حاصل می‌شود. سطوح بهینه مورد نظر در آرایه‌های طراحی آزمایشات موجود نمی‌باشد. بنابراین از رابطه (۷) پاسخ در شرایط بهینه پیش بینی می‌شود. همچنین برای ارزیابی صحت پاسخ، نتیجه با آزمون تایید در شرایط بهینه مقایسه می‌شود. جدول ۹ نتایج پیش بینی شده و آزمون تایید در شرایط بهینه به همراه شرایط پیشینه موجود در طراحی آزمایشات را نشان می‌دهد. نتایج جدول نشان می‌دهد که آزمایش تایید در حالت بهینه دارای حداکثر درجه گری می‌باشد که این مطلب خود صحت پیش بینی شرایط بهینه توسط آنالیز گری را تایید می‌کند. البته درجه گری در حالت پیش بینی شده کمتر از درجه گری در شرایط بهینه موجود در طراحی آزمایش می‌باشد. که علت به وجود آمدن این خطا، در نظر نگرفتن دو پارامتر سیکل کاری و سرعت دوران اسپیندل به علت معنا دار نبودن از نظر آماری می‌باشد.

۴-۲-۲- مقایسه حالت بهینه سازی شده همزمان توسط آنالیز

گری با حالت‌های بهینه سازی شده هر پاسخ به صورت مجزا

درجه گری، در واقع پاسخی است که شامل هر سه پاسخ فرایند می‌باشد. از سه پاسخ فرایند، دو پاسخ زبری سطح و اضافه برش شعاعی بیشتر پارامترهایی کیفی بوده و دارای خصوصیت هر چه کوچکتر، بهتر می‌باشند. در حالی که پارامتر نرخ براده برداری پارامتری کمی بوده که دارای ویژگی هر چه بزرگتر بهتر می‌باشد. معمولاً بهینه کردن نرخ براده برداری (افزایش) باعث بدتر شدن شرایط زبری سطح و اضافه برش شعاعی می‌شود و بالعکس. با توجه به این که در آنالیز گری وزن همه پاسخها یکسان در نظر گرفته شده، بنابراین با توجه به ویژگیهای مشابه دو پارامتر کیفی زبری سطح و اضافه برش شعاعی، وزن پارامترهای کیفی مذکور در پاسخ نهایی بهینه سازی شده توسط آنالیز گری بیشتر می‌باشد و اثر بهینه سازی بر روی افزایش نرخ براده برداری کمتر می‌باشد. با مقایسه جدول ۹ و جدول ۴ مشاهده می‌شود که در حالت بهینه سازی شده همزمان توسط آنالیز گری نرخ براده برداری ۰.۲۶ و در حالت بهینه سازی شده به صورت مجزا نرخ براده برداری ۰.۸۳ می‌باشد که نسبتاً اختلاف چشمگیری وجود دارد. اما برای مقادیر زبری سطح و اضافه برش شعاعی مقادیر به دست آمده از آزمون تایید روش بهینه سازی آنالیز گری به مقادیر بهینه سازی شده به صورت مجزا بسیار نزدیک می‌باشد که این مورد موید مطالب ذکر شده بالاست و نشان دهنده این است که با توجه به وزن بالاتر مجموع پارامترهای کیفی در بهینه سازی همزمان پاسخها توسط آنالیز گری، بهینه سازی به درستی صورت پذیرفته است و نتیجه به دست آمده مطلوب می‌باشد.

شرایط بهینه می‌باشد. مقادیر درجات گری برای هر یک از سطوح ماشینکاری (هر یک از سطوح مرتبط با ۶ ورودی) با میانگین گرفتن از مقادیر درجات گری مرتبط با سطح ماشینکاری مربوط به دست می‌آید. جدول ۷ مقادیر میانگین برای سطوح ماشینکاری را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمودارهای اثرات اصلی برای نسبت سیگنال به نویز (الف) نرخ براده برداری، (ب) زبری سطح و (ج) اضافه برش شعاعی

۴-۲-۳- تحلیل واریانس درجات گری

همان گونه که ذکر شد، برای در نظر گرفتن اثر تمام پاسخ‌ها در آنالیز گری و به منظور بهینه سازی همزمان پاسخها، مجموعه تمام پاسخها به یک پاسخ که همان درجه گری می‌باشد، تبدیل می‌شود. حال، این پاسخ مانند ارزیابی حالت بهینه یک پاسخ از فرایند بهینه سازی می‌شود و به منظور ارزیابی اثر این پاسخ بر پارامترهای ماشینکاری و پیش بینی حالت بهینه، تحلیل واریانس انجام می‌گیرد. همان گونه که بیان شد، هرچه درجه گری بزرگتر باشد، شرایط آزمایش به شرایط بهینه مورد نظر نزدیکتر است. بنابراین در تحلیل این پارامتر، خصوصیت کیفی به صورت هرچه بزرگتر، بهتر در نظر گرفته می‌شود. جدول ۸ نتایج تحلیل واریانس برای نسبت سیگنال به نویز

جدول ۴- مقایسه نتایج پیش بینی شده و آزمون تایید برای حالت بهینه نرخ براده برداری، زبری سطح و اضافه برش شعاعی

درصد اختلاف (خطا) حالت بهینه پیش بینی شده با نتایج آزمون تایید	آزمایش تایید		پیش بینی حالت بهینه		شرایط بهینه موجود در طراحی آزمایش		نرخ براده برداری
	مقدار	سطح	مقدار	سطح	مقدار	سطح	
درصد (%)							
۱/۶	۳/۸۳	A ₃ B ₃ C ₃ D ₃ E ₂ F ₂	۳/۷۷	A ₃ B ₃ C ₃ D ₃ E ₂ F ₂	۳/۵۷	A ₃ B ₃ C ₂ D ₃ E ₂ F ₂	
۳/۰۱	۲/۰۵	A ₁ B ₁ C ₁ D ₃ E ₃ F ₃	۱/۹۹	A ₁ B ₁ C ₁ D ₃ E ₃ F ₃	۲/۲۲	A ₁ B ₁ C ₃ D ₃ E ₃ F ₃	زبری سطح
۷/۲۶	۹۰/۱	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁ F ₃	۸۴	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁ F ₃	۹۷	A ₁ B ₁ C ₃ D ₃ E ₃ F ₃	اضافه برش شعاعی

جدول ۵- بخشی از داده‌های پیش پردازش شده و پاسخ‌های نرمال سازی شده

Run No.	I (A)	T _{on} (μs)	D (%)	P (bar)	N (rpm)	نوع گاز	نرمال سازی شده MRR			نرمال سازی شده Ra			نرمال سازی شده ROC		
							MRR1	MRR2	MRR3	Ra1	Ra2	Ra3	ROC1	ROC2	ROC3
1	12	100	40	1	150	هوا	0.106	0.119	0.094	0.496	0.642	0.744	0.943	0.944	0.941
2	12	100	66	2	300	آرگون+هوا	0.184	0.164	0.205	0.826	0.847	0.884	0.892	0.986	0.961
3	12	100	86	3	450	نیتروژن	0.000	0.003	0.028	0.988	1.000	0.998	0.871	1.000	1.000
...
25	30	300	40	2	150	هوا	0.532	0.580	0.490	0.145	0.000	0.000	0.377	0.086	0.000
26	30	300	66	3	300	آرگون+هوا	1.000	1.000	0.923	0.229	0.212	0.394	0.163	0.000	0.238
27	30	300	86	1	450	نیتروژن	0.097	0.101	0.114	0.333	0.302	0.479	0.301	0.156	0.373

جدول ۶- بخشی از ضرایب گری و درجه گری پاسخ‌ها

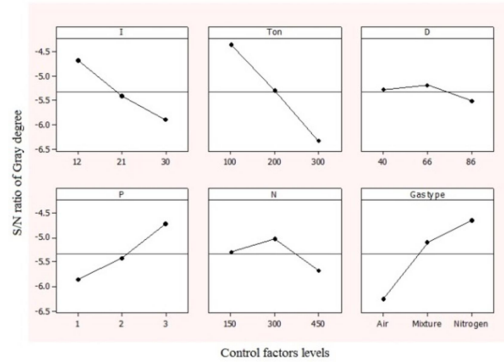
Run No.	I (A)	T _{on} (μs)	D (%)	P (bar)	N (rpm)	نوع گاز	نرخ براده برداری در سه تکرار برحسب mm ³ /min			زبری سطح در سه تکرار برحسب میکرومتر			اضافه برش شعاعی در سه تکرار برحسب میکرومتر			درجه گری	ترتیب
							MRR1	MRR2	MRR3	R _{a1}	R _{a2}	R _{a3}	ROC1	ROC2	ROC3		
1	12	100	40	1	150	هوا	0.359	0.362	0.356	0.498	0.583	0.661	0.898	0.900	0.895	0.612	7
2	12	100	66	2	300	آرگون+هوا	0.380	0.374	0.386	0.742	0.765	0.812	0.823	0.972	0.927	0.687	4
3	12	100	86	3	450	نیتروژن	0.333	0.334	0.340	0.977	1.000	0.997	0.795	1.000	1.000	0.753	1
...
25	30	300	40	2	150	هوا	0.517	0.544	0.495	0.369	0.333	0.333	0.445	0.353	0.333	0.414	25
26	30	300	66	3	300	آرگون+هوا	1.000	1.000	0.867	0.393	0.388	0.452	0.374	0.333	0.396	0.578	9
27	30	300	86	1	450	نیتروژن	0.357	0.357	0.361	0.429	0.417	0.490	0.417	0.372	0.444	0.405	27

جدول ۸- تحلیل واریانس برای نسبت سیگنال به نویز درجه گری

فاکتور	DF	SS	V	F	P	تشخیص
I	2	6.62	3.31	4.82	0.02	بله
T _{on}	2	17.93	8.96	13.05	0.01	بله
D	2	0.49	0.24	0.36	0.70	خیر
P	2	6.02	3.01	4.39	0.03	بله
N	2	1.94	0.43	4.34	0.18	خیر
نوع گاز	2	12.44	6.22	9.06	0.00	بله
خطا	14	9.61	0.68			
کل	26	55.08				

جدول ۷- مقادیر میانگین درجات گری برای سطوح مختلف

فاکتور	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	Max-Min
I	0.592	0.543	0.512	0.800
T _{on}	0.613	0.547	0.487	0.126
D	0.552	0.556	0.538	0.019
P	0.512	0.546	0.588	0.075
N	0.549	0.568	0.530	0.038
نوع گاز	0.490	0.560	0.596	0.105
میانگین درجات گری = 0.549				



شکل ۳- نمودارهای اثرات اصلی برای نسبت سیگنال به نویز در جات گری

جدول ۹- شرایط بهینه پیش‌بینی شده توسط آنالیز گری و آزمون تایید

آزمایش تایید	پیش بینی حالت بهینه	شرایط بهینه موجود در طراحی آزمایش	شرایط اولیه آزمایش	
A ₁ B ₁ C ₂ D ₃ E ₂ F ₃	A ₁ B ₁ C ₂ D ₃ E ₂ F ₃	A ₁ B ₁ C ₃ D ₃ E ₃ F ₃	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁ F ₁	سطح
۰/۳۶		۰/۳۱	۰/۵۴	میانگین نرخ براده برداری (mm ³ /min)
۱/۹۵		۲/۲۱	۳/۷۶	میانگین زبری سطح (μm)
۸۹/۳		۹۶/۷	۹۸/۸	میانگین اضافه برش شعاعی (μm)
۰/۷۷۳	۰/۷۴۲	۰/۷۵۳	۰/۶۱۲	درجه گری

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، برای بهینه‌سازی همزمان پاسخهای فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک در حضور گازهای مختلف از روش آنالیز گری استفاده شده است که مبتنی بر روش طراحی آزمایشات تاگوچی می‌باشد. از تحقیق حاضر موارد ذکر شده ذیل را می‌توان نتیجه گرفت:

- سطوح بهینه حاصل از تحلیل در جات گری در جریان $I=12 A$ ، زمان روشنایی پالس $T_{on}=100 \mu s$ ، سیکل کاری $D=66$ ، فشار گاز $P=3 \text{ bar}$ ، سرعت دورانی اسپیندل $N=300 \text{ rpm}$ و در حضور گاز نیتروژن به عنوان محیط دی الکتریک حاصل می‌شود.
- پس از استخراج حالت بهینه ذکر شده و با انجام آزمون تایید در حالت ذکر شده، به ترتیب مقادیر نرخ براده برداری، زبری سطح و اضافه برش شعاعی $۰/۲۶$ ، $۱/۹۵$ و $۸۶/۳$ می‌باشد که با محاسبه درجه گری برای این حالت و مقایسه آن با در جات گری آزمایشات انجام شده مشاهده می‌شود که این حالت دارای حداکثر درجه گری بوده که این امر موید صحت بهینه سازی صورت گرفته می‌باشد.
- با توجه به اثر مشابه پارامترهای کیفی زبری سطح و اضافه برش که هر دو دارای خصوصیت هر چه کوچکتر بهتر می‌باشند در آنالیز گری، در نهایت با توجه به همپوشانی این دو پاسخ، اثر بهینه سازی صورت گرفته بر این دو پاسخ بیشتر از نرخ براده برداری بوده است و در واقع وزن واقعی این پارامترها بیشتر خواهد بود.

۶- مراجع

- [2] Kunieda M., Yoshida M., Taniguchi N., Electrical Discharge Machining in Gas, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 46, No. 1, pp. 143-146, 1997.
- [3] Ramani V., Cassidenti M. L., *Inert-Gas Electrical Discharge Machining*, National Technology Transfer Center (NTTC), NASA, 1985.
- [4] Kunieda M., Furuoya S., Taniguchi N., Improvement of EDM Efficiency by Supplying Oxygen Gas into Gap, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 40, No. 1, pp. 215-218, 1991.
- [5] Kunieda M., Miyoshi Y., Takaya T., Nakajima N., ZhanBo Y., Yoshida M., High Speed 3D Milling by Dry EDM, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 52, No. 1, pp. 147-150, 2003 .
- [6] Kunieda M., Takaya T., Nakano S., Improvement of Dry EDM Characteristics Using Piezoelectric Actuator, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 53, No. 1, pp. 183-186, 2004 .
- [7] Singh P. N., Raghukandan K., Pai B. C., Optimization by Grey relational analysis of EDM parameters on machining Al-10%SiCP composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155-15۶, No. 0, pp. 1658-1661, 2004.
- [8] Roy R. K., *Design of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*: Wiley, 2001.
- [9] Deng J. L., Introduction to grey systems, *The journal of grey systems*, Vol. 1, pp. 1-24, 1989.
- [10] Lin J. L., Lin C. L., The use of the orthogonal array with grey relational analysis to optimize the electrical discharge machining process with multiple performance characteristics, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 2, pp. 237-244, 2002.
- [11] Sivasankar S., Jeyapaul R., Application of Grey Entropy and Regression Analysis for Modelling and Prediction on Tool Materials Performance During EDM of Hot Pressed ZrB₂ at Different Duty Cycles, *Procedia Engineering*, Vol. 38, No. 0, pp. 3977-3991, 2012 .
- [12] S. Fattahi, H. Baseri, Analysis of dry electrical discharge machining in different dielectric mediums, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 231, No. 3, 2017.
- [1] Leão F. N., Pashby I. R., A review on the use of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, No. 1-3, pp. 341-346, 2004 .