

### گواهی ارائه مقاله

بدین وسیله گواهی می‌شود مقاله زیر در

سومین کنفرانس بین المللی  
مهندسی صنایع و سیستم‌ها (ICISE 2017)

که در تاریخ ۲۲ و ۲۳ شهریور سال ۱۳۹۶ در دانشگاه فردوسی مشهد برگزار گردید، به صورت شفاهی ارائه شده است:

عنوان مقاله:

مدل سازی ریاضی و بهینه سازی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد گرم کار  
AISIH13 با بهره گیری از رویکرد تاگوچی و الگوریتم ژنتیک

نویسندگان:

میثم بیت الامانی، فرهاد کلاهان

ضمن تشکر از نویسندگان مقاله، توفیق روزافزون ایشان را در عرصه های علمی از خداوند منان خواستاریم.

دکتر حمید ضیاکوشا  
مدیر علمی کنفرانس

دکتر وحید سالاری  
مدیر کنفرانس

<http://icise.um.ac.ir>



مرکز مطالعاتی اطلاع رسانی علوم و فناوری



## مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد گرم کار AISI13 با بهره‌گیری از رویکرد تاگوچی و الگوریتم ژنتیک

میثم بیت‌الامانی<sup>۱</sup>، فرهاد کلاهان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، (meysambeytolamani@mail.um.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشین‌کاری مخصوص برای شکل‌دهی قطعات هادی جریان الکتریسیته است. در این روش ابزار با قطعه کار تماس نداشته و سختی قطعه کار نیز بر سرعت ماشین‌کاری تأثیری ندارد. بنابراین می‌توان این روش را در ماشین‌کاری مواد سخت نظیر فولادهای گرم کار بکار گرفت. در این تحقیق، فولاد AISI13 که از نوع فولادهای گرم کار بوده و به علت مقاومت بالا در برابر حرارت، بیشتر برای ساخت قالب‌های ریخته‌گری و اکستروژن آلیاژهای غیر آهنی مانند آلومینیوم، منیزیم و مس مورد استفاده قرار می‌گیرد، انتخاب شده است. پارامترهای تنظیمی شامل ولتاژ، گپ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و فاکتور کار هستند. نرخ برداشت ماده و کیفیت سطح قطعات تولیدی نیز بعنوان خروجی‌های فرآیند در نظر گرفته شدند. در این تحقیق از طرح تاگوچی به منظور گردآوری داده‌های تجربی در رویکرد طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. بعد از انجام آزمایشات، برای ایجاد ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند، از مدل‌سازی رگرسیونی استفاده شد. سپس از روشهای آماری و آزمایشات صحه‌گذاری به منظور ارزیابی و انتخاب مدل‌های اصلاح به عنوان توابع هدف در بهینه‌سازی استفاده شد. برای بهینه‌سازی نیز از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی و آزمایشات تجربی نشان داد که، به کارگیری روش ارائه شده می‌تواند به ابزاری کارآمد برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند تبدیل شود.

### کلمات کلیدی

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، بهینه‌سازی، طرح تاگوچی، فولاد گرم کار AISI13، الگوریتم ژنتیک.

## Mathematical modeling and optimization of EDM process for AISI13 using Taguchi approach and genetic algorithm

Meysam beytolamani<sup>1</sup>, Farhad Kolahan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

### ABSTRACT

Electro Discharge Machining (EDM) is one of the most popular methods for producing electrically conductive parts. In this technique, the tool has no mechanical contact with the workpiece and also the hardness of workpiece has no effect on the machining pace. Hence, this technique could be employed to machine hard materials such as hot worked steel parts. In this study, AISI13 hot worked steel parts has been used according to its resistance to high temperatures and used as mold and dies for casting and extrusion processes of nonferrous metals. The input parameters are peak current (I), pulse on time (T), duty factor ( $\eta$ ) and voltage (V). Material removal rate (MRR) and surface roughness (SR) are the most important performance characteristics of the EDM process. The experimental data are gathered using Taguchi design matrix. In order to establish the relations between the input and the output parameters, various regression functions have been fitted on the evaluated data based on output characteristics. Then, statistical analyses and validation experiments have been carried out to select the best and most fitted models. Genetic algorithm (GA) has been used for optimizations of process parameters. The results indicate that the proposed technique is quite efficient in modeling and optimization of the process.

### KEYWORDS

Electro Discharge Machining (EDM), optimization, Taguchi Approach, AISI13 hot worked steel, genetic algorithm (GA).

## ۱- مقدمه

از معیار، تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (ولتاژ، جریان، زمان روشنی و خاموشی پالس) را بر روی نرخ برداشت براده، نرخ خوردگی ابزار و کیفیت سطح بررسی کردند. در این تحقیق با انجام آزمایشات صحه‌گذاری مشخص شد که نتایج مدل با مقدار اندازه‌گیری شده مطابقت خوبی دارند. همچنین، شدت جریان و روشنی پالس بیشترین تاثیر را بر خروجی‌ها دارند، بدین ترتیب که با افزایش شدت جریان، نرخ برداشت براده ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، کیفیت سطح افزایش می‌یابد. با استفاده از روش طراحی آزمایشات و آنالیز واریانس، آستا و همکاران [۷] میزان تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (شدت جریان، ولتاژ و زمان روشنی پالس) را در ماشین‌کاری آلیاژ C1023 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق آنان نشان می‌دهد که افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس موجب کاهش نرخ خوردگی ابزار می‌شود. همچنین کاهش شدت جریان و ولتاژ موجب کاهش نرخ برداشت براده می‌شود.

همان‌طور که بیان شد، یکی از کاربردهای این فرآیند، ماشین‌کاری مواد با قابلیت براده‌برداری پایین است. در این راستا، بررسی مقالات نشان می‌دهد که تاکنون در مورد چگونگی تاثیر پارامترهای تنظیمی در ماشین‌کاری فولاد گرم‌کار AISI13 به روش تخلیه الکتریکی و تعیین مقادیر بهینه آن‌ها، با استفاده از رویکرد طراحی آزمایشات و روش تاگوچی و الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک تحقیقی صورت نگرفته است. بنابراین هدف اصلی این پژوهش، بررسی تاثیر این پارامترها بر روی نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح و تعیین سطوح بهینه آن‌ها برای فولاد گرم‌کار AISI13 می‌باشد.

تحقیقات نشان می‌دهد که زمان روشنی پالس، فاکتور روی کار، ولتاژ و شدت جریان تخلیه، موثرترین پارامترهای ماشین‌کاری در این فرآیند می‌باشند [۷-۳]. بنابراین در تحقیق حاضر نیز این پارامترها به عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شده‌اند. برای به دست آوردن سطوح (حدود بالا و پایین) مناسب پارامترها، تعدادی آزمایش اولیه انجام گرفت. با توجه به آزمایشات انجام شده و ویژگی‌های دستگاه مورد استفاده، نهایتاً مقادیر گزارش شده در جدول ۱ به عنوان سطوح هر فاکتور در نظر گرفته شدند.

جدول (۱): پارامترهای ورودی و سطوح مختلف آن‌ها

پارامترها	علامت مشخصه	سطوح		
		۱	۲	۳
زمان روشنی پالس	T	۳۵	۱۰۰	۲۰۰
فاکتور کار	η	۰/۴	۱	۱/۸
جریان	I	۱	۳	۵
ولتاژ	V	۸۰	۲۰۰	---

امروزه معرفی آلیاژهای جدید و همچنین نیاز به تولید اشکال پیچیده در صنایع تولیدی، محدودیت‌های استفاده از روش‌های سنتی ماشین‌کاری و لزوم استفاده از روش‌های ماشین‌کاری مخصوص همچون ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را بیشتر کرده است [۱]. فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی یک فرآیند پیشرفته ماشین‌کاری است که در آن بر اثر جرقه‌های تولید شده تخلیه الکتریکی بین قطعه‌کار و ابزار عمل براده برداری صورت می‌گیرد. در این روش قطعه کار و ابزار در یک سیال دی الکتریک غوطه‌ور بوده و تخلیه الکتریکی باعث ذوب و تبخیر قسمت کوچکی از قطعه‌کار شده که بوسیله سیال دی الکتریک از محدوده ماشین‌کاری دور می‌شود. امکان ماشین‌کاری قطعات نازک و شکننده به دلیل عدم تماس مکانیکی بین قطعه‌کار، امکان ایجاد اشکال پیچیده و دقیق و عدم نیاز به حضور مداوم اپراتور حین براده‌برداری و عدم تاثیر سختی قطعه‌کار بر روی سرعت ماشین‌کاری، از جمله مزایای این روش است [۲]. بنابراین این روش گزینه مناسبی جهت تولید قطعاتی با سختی بالا مانند فولادهای گرم‌کاری‌یافته است.

باین‌حال ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی روشی با نرخ براده‌برداری پایین و زمان‌بر می‌باشد. از طرفی دقت ابعادی و صافی سطح در قطعات تولیدی با این روش معمولاً از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین، نرخ براده‌برداری و صافی سطح قطعه‌کار از جمله مهم‌ترین مشخصه‌های خروجی در این روش است. این خروجی‌ها خود تحت تاثیر مقادیر پارامترهای تنظیمی فرآیند، از جمله ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و فاکتور روی کار، قرار دارند [۱].

مطالعات گسترده‌ای در زمینه بررسی تاثیر متغیرهای ماشین‌کاری و تعیین مقادیر بهینه آن‌ها در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی انجام گرفته است. صادقی و همکاران [۳]. به بررسی اثرات انواع مختلف الکتروود ابزار بر روی کیفیت قطعات تولیدی به روش ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی برای ترکیب بین فلزی آلومینیوم-تیتانیوم پرداخته‌اند. با بررسی سه جنس الکتروود آلومینیومی، گرافیتی و مسی این نتیجه حاصل شد که تغییر جنس الکتروود ابزار تاثیر خاصی بر روی ترکیب شیمیایی سطح قطعه‌کار ندارد و تاثیر اصلی جنس ابزار در نرخ براده‌برداری، خوردگی ابزار و زبری سطح است. اولمن و همکاران [۴] با استفاده از تکنیک طراحی آزمایشات به بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ پاپه نیکل پرداخته‌اند. نتایج آزمایشات آن‌ها حاکی از این بود که شدت جریان و زمان روشنی پالس تاثیرگذارترین پارامترها هستند. وای.بی.جو و همکاران [۵] با تغییر انرژی‌های تخلیه در فرآیند وایر کات سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸، به توپوگرافی و بررسی کیفیت سطح قطعات تولید شده پرداخته‌اند. گوپالاکان و همکاران [۶] با استفاده از روش تاگوچی و تحلیل انحراف

## ۲- طراحی آزمایشات<sup>۱</sup>

پس از هر آزمایش سطح الکترودها مجدداً پرداخت و ماشین کاری گردید. با این‌همه بعد از هر ۶ آزمایش الکترودها تعویض گردید. زمان انجام هر آزمایش به طور متوسط ۵۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. در تمام آزمایشات، به جز پارامترهای تحت کنترل، سایر پارامترهای قابل تنظیم دستگاه مانند زمان خاموشی پالس، فشار پاشش دی‌الکتریک و ... در مقادیر ثابتی تنظیم شده بودند.

## ۴- پارامترهای خروجی

یکی از مهم‌ترین معیارهای اندازه‌گیری کیفیت سطح، زبری سطح و به عبارت دیگر پروفیل و میزان پستی و بلندی‌های سطح می‌باشد. کیفیت سطح در فرآیندهای براده‌برداری، متأثر از پارامترهای ماشین کاری، نوع و پروفیل ابزار و سایر شرایط دستگاه می‌باشد [۵]. در اندازه‌گیری زبری سطح در این تحقیق، معیار متوسط ارتفاع پروفیل‌های سطح انتخاب شده است. بدین منظور بعد از انجام هر آزمایش میزان زبری سطح توسط دستگاه زبری سنج مدل سورترونیک با دقت ۰/۱ میکرومتر در جهات مختلف سه بار اندازه‌گیری شده و میانگین آنها به عنوان عدد زبری مربوطه ثبت شد (شکل ۱). نرخ برداشت ماده مقدار ماده برداشته شده از قطعه کار در واحد زمان است. نرخ برداشت ماده، معیاری از سرعت ماشین کاری است که افزایش آن موجب کاهش زمان انجام کار می‌شود. بدین منظور، از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم، ساخت شرکت ژاپن استفاده گردید. نرخ برداشت ماده مطابق فرمول ۱ بر حسب میلی‌گرم بر دقیقه قابل محاسبه است [۲].



شکل (۱): تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایشات

دو گروه اصلی طرح‌های عاملی کامل<sup>۲</sup> و طرح‌های عاملی کسری<sup>۳</sup> را می‌توان بعنوان طرح‌های مهم در بحث طراحی آزمایشات مطرح کرد. طرح عاملی کسری، مانند طرح تاگوچی، فقط بخشی از مجموع ترکیب‌های ممکن برای آزمایشات را استفاده می‌کنند. بدین ترتیب با انجام تعداد محدودی آزمایش، اطلاعات و سیعی از فرآیند مورد بررسی و اثرات متقابل پارامترهای اصلی آن را می‌توان بدست آورد [۸]. بنابراین در پژوهش حاضر از این روش برای طراحی ماتریس آزمایشات برای انجام تست‌های عملی استفاده شده است. همان‌طور که در قسمت قبل مطرح شد، در این تحقیق ۳ عامل سه سطحی و یک عامل دو سطحی وجود دارد. بدین ترتیب برای بررسی کلیه حالات ممکن به انجام ۵۴ (۳<sup>۳</sup>×۲<sup>۱</sup>) آزمایش احتیاج است. برای کاهش هزینه و زمان آزمایشات از طرح تاگوچی استفاده گردید که تعداد آزمایشات مورد نیاز را به ۱۸ آزمایش کاهش می‌دهد (جدول ۲).

جدول (۲): ماتریس طراحی آزمایشات تاگوچی

ردیف	پارامترهای ورودی			
	ولتاژ	شدت جریان	زمان روشنی پالس	فاکتور کار
۱	۸۰	۱	۳۵	۰/۴
۲	۸۰	۱	۱۰۰	۱
۳	۸۰	۱	۲۰۰	۱/۸
۴	۸۰	۳	۳۵	۰/۴
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
۱۵	۲۰۰	۳	۲۰۰	۰/۴
۱۶	۲۰۰	۵	۳۵	۱/۸
۱۷	۲۰۰	۵	۱۰۰	۰/۴
۱۸	۲۰۰	۵	۲۰۰	۱

## ۳- انجام آزمایشات و اخذ نتایج

برای انجام آزمایشات، از دستگاه اسپارک مدل آذرخش H ۳۰۴ ساخت شرکت تهران اکرام استفاده شد (شکل ۱). در تمام آزمایشات از نفت سفید به‌عنوان سیال دی‌الکتریک استفاده گردید. نمونه‌ها از جنس فولاد گرمکار AISI H13 به شکل استوانه با ضخامت ۴ و قطر ۵۰ میلی‌متر توسط وایرکات برش خورده و دو سمت آن‌ها پرداخت و کدگذاری شدند. همچنین الکترودهای ابزار مورد نیاز از جنس مس با خلوص ۹۹٫۹٪ و قطر ۱۴ میلی‌متر انتخاب شدند. برای افزایش دقت، ترتیب انجام آزمایشات به صورت تصادفی صورت گرفت. همچنین برای کاهش اثر شرایط الکترودها در مقدار زبری سطح،



است.

$$MRR = \frac{\text{wear weight of workpiece}}{\text{time of machining}} \quad (1)$$

جدول (۳): پارامترهای ورودی آزمایشات صحت گذاری

ردیف	ولتاژ (ولت)	فاکتور کار (ثانیه)	شدت جریان (آمپر)	زمان روشنی پالس (میکروثانیه)
۱	۵۵	۰,۷	۲۴	۱۰۰
۲	۵۵	۱	۲۴	۱۵۰
۳	۵۵	۰,۷	۱۸	۱۵۰
۴	۵۵	۱	۱۸	۵۰
۵	۵۵	۰,۷	۱۲	۵۰

جدول ۴، میزان درصد خطای تخمین نرخ برداشت ماده و زبری سطح را برای سری جدید آزمایشات نشان می‌دهد. همان‌گونه که از جدول ۳ می‌توان دید، مقدار خطای محاسبه شده برای نرخ برداشت ماده و برای زبری سطح کمتر از ۴ درصد می‌باشد، که این خود گواهی بر جواب صحیح آزمایشات است. بنابراین برای نرخ برداشت ماده مدل لگاریتمی و برای زبری سطح مدل مرتبه دوم انتخاب می‌شوند.

جدول (۴): درصد خطای تخمین نرخ برداشت ماده و زبری سطح

خروجی فرآیند	خطا (درصد)		
	خطای	مرتبه دو	لگاریتمی
نرخ برداشت ماده	۱۲/۷۱	۶/۸۳	۲/۹۲
زبری سطح	۱۰/۲۷	۲/۹۲	۶/۶۲

### ۶- الگوریتم ژنتیک

امروزه، الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یکی از روش‌های قدرتمند بهینه‌سازی، در حل مسائل بزرگ و پیچیده کاربرد فراوانی دارد. مهمترین خصوصیت الگوریتم ژنتیک این است که به‌طور هم‌زمان مجموعه‌ای از فضاهای جواب را بررسی می‌کند. همچنین در کاربرد الگوریتم ژنتیک نیازی به محاسبه شیب تابع و یا مشتق‌پذیر بودن آن نیست. این بدان دلیل است که الگوریتم فقط بر روی مقادیر تابع هدف (جواب‌ها) عمل می‌کند و هر کروموزوم بر اساس شایستگی آن در جمعیت ارزیابی و رتبه‌بندی می‌شود. مهمترین محدودیت الگوریتم ژنتیک این است که، در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی، محاسبات سنگین‌تری دارد. به‌منظور جلوگیری از اطاله مطلب، از پرداختن به جزئیات این الگوریتم خودداری می‌شود. توضیحات مبسوط در مورد الگوریتم ژنتیک و کاربردهای آن را می‌توان در ادبیات موضوع، از جمله رفرنس [۹]، یافت. در این تحقیق تابع رگرسیون انتخاب شده به‌عنوان تابع هدف انتخاب شده و بهینه می‌شوند. نتایج حاصل از بهینه‌سازی در جدول ۴، خلاصه شده است.

### ۵- مدل‌سازی و تحلیل نتایج

به‌منظور مدل‌سازی فرآیند، توابع مختلف رگرسیونی، شامل توابع خطی، لگاریتمی و توانی، بر داده‌های تجربی حاصل از آزمایشات، برازش داده شد. تهیه مدل‌های ریاضی و تجزیه و تحلیل واریانس در محیط نرم‌افزار آماری مینی‌ت‌ب انجام گردید. به‌منظور افزایش دقت مدل‌سازی و همچنین تعیین میزان تاثیر هر پارامتر، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شد. نتایج محاسباتی و تحلیل‌های آماری نشان می‌دهند که مدل "مرتبه دوم" بهترین انطباق را بر نرخ براده برداری و "مدل لگاریتمی" بهترین انطباق را بر زبری سطح دارند [۵]. مدل‌های مختلف در ادامه ارائه شده است:

مدل رگرسیونی مرتبه اول:

$$MRR = -6.591 + 0.00886 \times V + 1.30719 \times I + 0.0250265 \times T + 2.11614 \times \eta \quad (2)$$

$$SR = 0.393848 + 0.0003583 \times V + 1.34205 \times I + 0.0128686 \times T + 0.161359 \times \eta \quad (3)$$

مدل رگرسیونی مرتبه دوم:

$$MRR = 4.81568 + 0.0340054 \times V - 5.9293 \times I - 0.067071 \times T - 0.0312296 \times (V \times \eta) + 0.597425 \times (I \times I) + 0.0305473 \times (I \times T) + 1.7115 \times (I \times \eta) + 0.0270553 \times (T \times \eta) \quad (4)$$

$$SR = 0.521697 + 2.22346 \times I - 0.281034 \times (I \times I) + 0.00846034 \times (I \times T) + 0.0000273 \times (V \times T) - 0.000054 \times (T \times T) \quad (5)$$

مدل رگرسیونی نمایی:

$$MRR = 0.008324 \times V^{0.0172653} \times I^{1.798} \times T^{0.880033} \times \eta^{0.943937} \quad (6)$$

$$(7) \quad SR = 1.226 \times V^{0.0110355} \times I^{0.634706} \times T^{0.200333} \times \eta^{0.0119906}$$

مدل‌های بدست آمده ضریب همبستگی ۹۲٪ را دارا هستند که این ضریب همبستگی بالا بیانگر برازش خوب مدل‌ها بر فرآیند است. در کنار تحلیل‌های آماری، مدل انتخابی به‌کمک آزمایشات تجربی نیز صحت‌گذاری گردید. برای این‌که بتوان به صحت مدل‌های ایجاد شده اطمینان پیدا کرد، یک سری آزمایشات گواه مطابق جدول ۳ انجام شده

آماری، مدل‌های اصلاح انتخاب، و سطوح بهینه پارامترهای مزبور به‌منظور بیشینه کرده نرخ برداشت ماده و کمینه کردن زبری سطح با بکارگیری الگوریتم ژنتیک تعیین گردید. میزان خطای تخمین کمتر از ۷ درصد است که با توجه به وجود عدم قطعیت‌ها و پارامترهای غیرقابل کنترل در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، این مقدار در حد قابل قبولی به نظر می‌رسد.

#### ۸- منابع

- [1] Yih-fong Tzeng, F. Chen, , 2007. Multi-objective optimization of high-speed electrical discharge machining process using a Taguchi fuzzy-based approach, *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 1159–1168.
- [2] N. Bani Mostafa Arab, 2006. Advanced Machining Process, Tehran: Azadeh, pp. 151-167.
- [3] B. Jabbaripoor, M. H. Sadeghi, M. Shabgard, S. Fereidoonvand, 2011. Investigating the Effects of Tool Materials on the Properties of Electrical Discharge Machining of Ti-Al Intermetallic, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 135-146.
- [4] E. Uhlmann, D. C. Domingosb2013. Development and optimization of the die-sinking EDM-technology for machining the nickel-based alloy MAR-M247 for turbine components, *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp.180 – 185.
- [5] S.Gopalakannan, T. Sinthelevan, 2012. Modeling and Optimization of EDM Process parameter on Machining of AL 7075-B4 MMC using RSM, *Procedia Engineering*, Vol. 38, pp. 685 – 690.
- [6] S.Gopalakannan, T. Sinthelevan, 2012. Modeling and Optimization of EDM Process parameter on Machining of AL 7075-B4 MMC using RSM, *Procedia Engineering*, Vol. 38, pp. 685 – 690.
- [7] Ayestaa, B. Izquierdob, J. A. Sáncheza, J.M. Ramosc, S. Plaza, I. Pombod, 2013. Influence of EDM parameters on slot machining in C1023 aeronautical alloy, *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp.129 – 134.
- [8] D. Antoniou, Design of Analysis of Experiment, 5th edition, 2001. John wiley and sons, United States of America, pp. 230-235.
- [9] G.K. RAO, G. Rangajanardhaa, D.H. Rao, M.S. Rao, 2009. Development of hybrid model and optimization of surface roughness in electric discharge machining using artificial neural networks and genetic algorithm, *Journal of Material Process and Technology*, Vol. 209, pp.1512–1520.

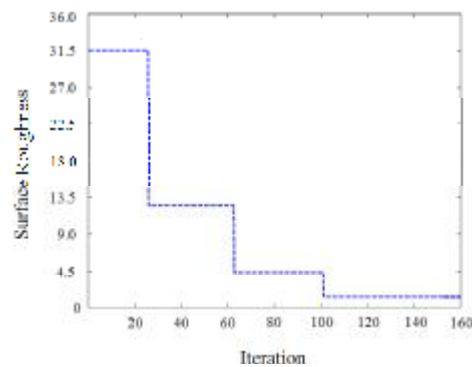
#### زیرنویس‌ها

- <sup>1</sup> Design of Experiments (DOE)
- <sup>2</sup> Full Factorial Design
- <sup>3</sup> Fractional Design
- <sup>4</sup> Fitness Function

شکل ۲، روند همگرایی به جواب بهینه را برای زبری سطح نشان می‌دهد.

جدول (۴): نتایج بهینه‌سازی فرآیند توسط الگوریتم ژنتیک

خروجی فرآیند	مقدار تخمین	مقدار آزمایش	خطا
نرخ برداشت ماده	۳۰/۳۹	۲۹/۱۲	۴/۲
مقدار پارامترهای تنظیمی	T = 200 μs, I = 5A, η = 1.8 S, V = 200V		
زبری سطح	۱/۴۳	۱/۵۲	۶/۳
مقدار پارامترهای تنظیمی	T = 103 μs, I = 1A, η = 0.7S, V = 80 V		



شکل (۲): نحوه همگرایی الگوریتم به جواب بهینه برای زبری سطح

#### ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق، تاثیر پارامترهای تنظیمی و تعیین سطوح بهینه آنها در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی جنس فولاد گرمکار AISI 13 مورد بررسی قرار گرفته است. آلیاژ مزبور به دلیل مقاومت به حرارت و خوردگی بالا دارای کاربردهای مختلف در ساخت قالبهای ریخته‌گری و اکستروژن می‌باشد. سختی و استحکام بالای این آلیاژ، شکل‌دهی آن را چالش برانگیز نموده و بنابراین تعیین سطوح مناسب پارامترهای ماشین‌کاری آن دارای اهمیت خاصی است. در این راستا، چهار فاکتور ولتاژ مدار باز، شدت جریان، زمان روشنی پالس و فاکتور کار به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شدند. با توجه به شرایط دستگاه مورد استفاده و جنس قطعه کار، برای پارامتر ولتاژ دو سطح و برای سایر پارامترها سه سطح در نظر گرفته شد. نرخ برداشت ماده و زبری سطح به عنوان معیارهای سنجش کیفیت مد نظر قرار گرفتند. آزمایشات عملی بر اساس ماتریس بهینه انجام یافت. در مرحله بعد، با به کارگیری نتایج حاصل از آزمایشات عملی و براساس تحلیل‌های