



## Experimental investigation of induction hardening operation of the Saina vehicle's Tulip part

Mehdi Safari<sup>\*a</sup>, Behnam Zamzami<sup>a</sup>, Amir Mohammad Babaei<sup>a</sup>, Omid Ghaderi<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

<sup>b</sup> Department of Materials Science & Engineering, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee Wisconsin 53211, United States

### Original Article

Use your device to scan and read the article online



**Citation:** Safari M, Zamzami B, Babaei A. M, Ghaderi O. Experimental investigation of induction hardening operation of the Saina vehicle's Tulip part. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025; 5(1): 72-87.

 <https://10.52547/masm.4.4.563>

### KEYWORDS

Induction Hardening,  
Tulip of drive shaft,  
Regression equation

### ABSTRACT

In this article, research on the process of induction hardening on the Saina vehicle's Tulip part, which is made of 1055 steel, was investigated. The input parameters discussed in this article include induction power, hardening time and cooling fluid pressure, and in the output parameter, surface hardness and effective case depth were investigated. Using the test design table extracted from the Minitab software and the analyzes performed with the response surface method, the mathematical and statistical equations governing the process were extracted, and using the analysis of variance table, the ineffective parameters of the process were removed and the final regression equation and other required information was extracted. Then the optimization of the process according to the desired values to achieve the desired surface hardness and effective case depth were done by providing a suitable range of induction power settings, induction time and cooling fluid pressure, which helped to reduce destructive tests and increase the quality assurance of parts.

### Extended Abstract

#### 1. Introduction

In the automobile industries, the automotive drive shaft yoke is a critical component responsible for transmitting torque from the gearbox to the wheels, transferring power sequentially through the yoke, the drive shaft, and the universal joint to the wheel hub. To ensure high reliability and durability under operational loads,

it is essential to enhance the surface mechanical properties of steel components, including wear resistance, surface hardness, and fatigue strength. Among various surface hardening techniques, induction hardening is recognized as one of the fastest and most effective methods for achieving significant surface hardness while preserving the mechanical integrity of the core material. Induction hardening involves applying an alternating magnetic field to a conductive steel component through a specially designed coil. The induced eddy currents rapidly heat the surface layer to the austenitization temperature. Immediately afterward, a quenching fluid is sprayed from multiple directions to rapidly cool the surface, forming a hardened outer layer while leaving the core material unaffected. This process results in a wear-resistant and fatigue-resistant surface, significantly enhancing the service life of the component. Figure 1 illustrates the drive shaft yoke specimen and the induction coil used in this study.

\* Corresponding author. Tel.: 09184858715

E-mail address: [m.safari@arakut.ac.ir](mailto:m.safari@arakut.ac.ir)

DOI: <https://10.61186/masm.4.4.563>

Received: October 17, 2025; Received in revised form: November 09, 2025; Accepted: November 22, 2025. 2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



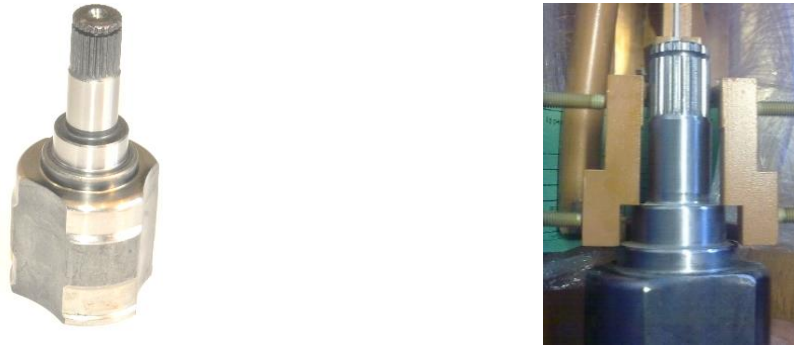


Figure 1 The yoke specimen and the induction coil used in this study

## 2. Material and methods

This study investigates the effect of key process parameters—including induction power, hardening time, and quenching fluid pressure—on surface hardness and hardness penetration depth of the outer splines of the drive shaft yoke. Fifteen identical CK55 steel specimens were prepared through forging, machining, spline rolling, tempering, and surface finishing. Table 1 summarizes the selected ranges of input parameters. The specimens underwent induction hardening using an EFD-manufactured induction heating system, and subsequently, cross-sections were prepared for microhardness measurements to evaluate surface hardness and penetration depth (Table 2).

Table 1 The selected ranges of input parameters

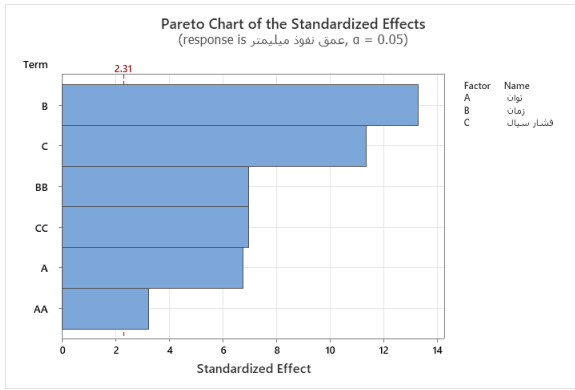
Input parameter	Unit	Abbreviation	Levels	
Induction power	KW	P	42	46
Time	S	S	6	8
Liquid pressure	Kg/cm <sup>2</sup>	Q	2	4

Table 2 The design of experiments (DOE) with the surface hardness and penetration depth

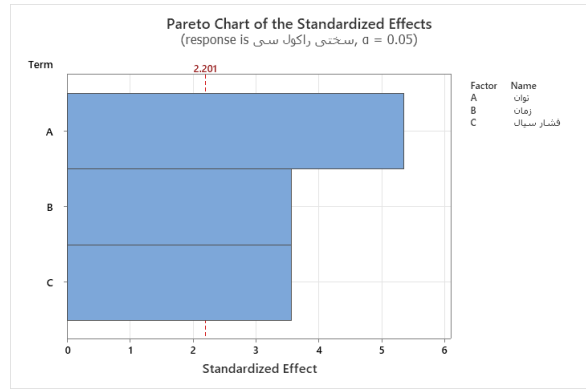
Test number	P	S	Q	Penetration depth (mm)	Surface hardness (HRC)
1	42	6	3	2.5	57
2	46	6	3	3.0	59
3	42	8	3	3.8	58
4	46	8	3	4.5	63
5	42	7	2	3.6	57
6	46	7	2	4.4	59
7	42	7	4	2.5	58
8	46	7	4	3.1	61
9	44	6	2	4.0	56
10	44	8	2	5.5	58
11	44	6	4	3.1	59
12	44	8	4	4.3	60
13	44	7	3	3.2	59
14	44	7	3	3.0	58
15	44	7	3	3.3	59

## 3. Results

Statistical modeling using Response Surface Methodology (RSM) was employed to develop predictive regression models correlating input parameters with output responses. Factor significance was analyzed via Pareto charts (Figure 2), and residual plots (Figure 3) validated model assumptions, confirming normally distributed residuals and homogenous variance. Surface hardness was found to be primarily influenced independently by each parameter, whereas hardness penetration depth was significantly affected by the combined effects of induction power and hardening time, and inversely influenced by quenching fluid pressure. Contour plots (Figures 4 and 5) were generated to visualize parameter interactions and their effects on both penetration depth and surface hardness.

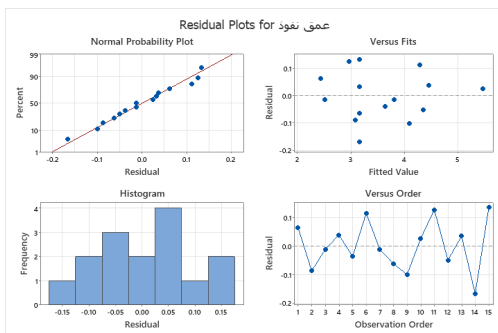


a

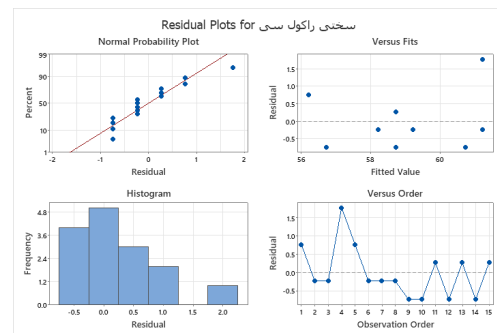


b

Figure 2 Pareto chart for the output results; a- Penetration depth, b- Surface hardness



a



b

Figure 3 The residual plots for the output results; a- Penetration depth, b- Surface hardness

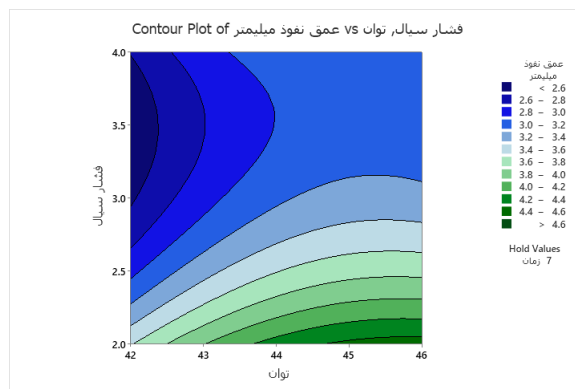


Figure 4 The contour plot of variations of penetration depth with liquid pressure and induction power

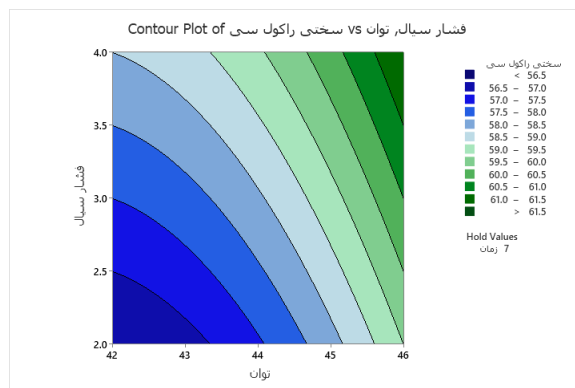


Figure 5 The contour plot of variations of surface hardness with liquid pressure and induction power

Experimental results indicated that increasing induction power and hardening time enhances both surface hardness and penetration depth, whereas higher quenching fluid pressure increases surface hardness but reduces penetration depth due to accelerated surface cooling. Safe operating windows for achieving target surface hardness of 58–60 HRC and penetration depths of 3–4 mm were identified (Figures 6 and 7). As indicated in figure 8 the optimal process parameters for achieving a surface hardness of 60 HRC and a penetration depth of 4 mm were determined as 46 kW induction power, 13.7 s hardening time, and 2.7 kg/cm<sup>2</sup> quenching fluid pressure. These parameters ensure consistent production quality, minimize destructive testing, reduce production costs, and improve overall process reliability.

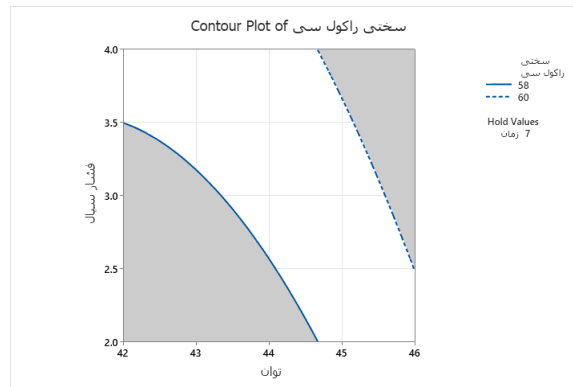


Figure 6 Safe operating windows for achieving target surface hardness of 58–60 HRC

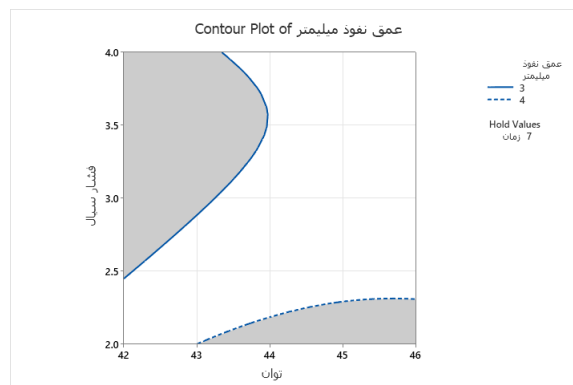


Figure 7 Safe operating windows for achieving penetration depths of 3–4 mm

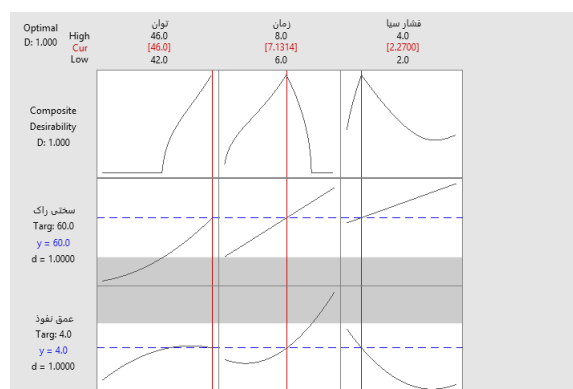


Figure 8 Optimal process parameters for achieving a surface hardness of 60 HRC and a penetration depth of 4 mm

#### 4. Conclusion

This study presents a comprehensive methodology for predicting and optimizing induction hardening of automotive drive shaft yokes. By integrating experimental work with statistical modeling and response surface analysis, the research provides a robust framework for controlling surface hardness and penetration depth. Inclusion of tables and figures throughout the study offers clear visualization of parameter effects, safe operating regions, and optimization strategies. The findings are applicable not only to Saina vehicle drive shaft yokes but also to other automotive and industrial steel components requiring precise surface hardening, ensuring reproducible, high-quality mechanical performance while reducing waste and testing costs.



## بررسی تجربی فرآیند سخت کاری القائی قطعه مشعلی پلوس خودروی ساین

مهدی صفری<sup>الف\*</sup>، بهنام زمزمی<sup>ب</sup>، امیر محمد بابایی<sup>ج</sup>، امید قادری<sup>د</sup>

<sup>الف</sup> دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، [m.safari@arakut.ac.ir](mailto:m.safari@arakut.ac.ir)  
<sup>ب</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، [b.zamzami@arakut.ac.ir](mailto:b.zamzami@arakut.ac.ir)  
<sup>ج</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، [a.m.babaei@arakut.ac.ir](mailto:a.m.babaei@arakut.ac.ir)  
<sup>د</sup> دانشجوی دکتری، گروه علوم مهندسی و مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه ویسکنسین میلواکی، میلواکی، آمریکا، [oghaderi@uwm.edu](mailto:oghaderi@uwm.edu)

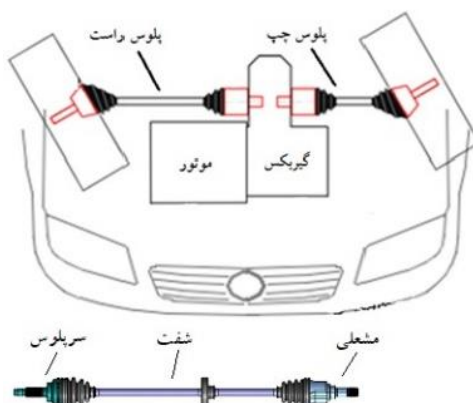
واژگان کلیدی	چکیده
سخت کاری القایی، مشعلی پلوس، معادله رگرسیون.	در این مقاله یک تحقیق درباره فرآیند سخت کاری القائی روی قطعه مشعلی پلوس خودروی ساین مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای ورودی مورد بحث در این مقاله شامل توان القائی، زمان سخت کاری و فشار سیال خنک کاری می باشند و در پارامتر خروجی، میزان سختی سطح و عمق نفوذ سختی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از جدول طراحی آزمایش استخراج شده از نرم افزار مینی تب و آنالیزهای انجام شده با روش سطح پاسخ، معادلات ریاضی و آماری حاکم بر فرآیند استخراج گردید و با استفاده از جدول آنالیز واریانس پارامترهای غیرموثر فرآیند حذف شده و معادله رگرسیون نهایی، نمودار پرتو و سایر اطلاعات مورد نیاز استخراج گردید. سپس بهینه سازی فرآیند مطابق مقادیر مورد نظر برای دستیابی به میزان مطلوب سختی سطح و عمق نفوذ سختی با ارائه محدوده مناسب تنظیمات توان القائی، زمان القائی و فشار سیال خنک کاری انجام گردید که این مورد به کاهش تست های مخرب و افزایش اطمینان کیفیت قطعات کمک می کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱	

### ۱- مقدمه

پلوس مطابق شکل ۱، انتقال گشتاور از گیربکس به چرخها را برعهده دارد که این انتقال، از گیربکس به مشعلی پلوس، شفت پلوس و سپس از طریق سرپلوس به توپی چرخ و در نهایت به چرخ منتقل می شود. کارخانجات تولیدی که از فولاد استفاده می کنند، برای بالا بردن خواص مکانیکی همچون مقاومت در برابر سایش و بالا بردن سختی سطح قطعات تولیدی خود از سخت کاری استفاده می کنند. یکی از بهترین و سریع ترین روش های سخت کاری، روش سخت کاری القائی می باشد. در این فرآیند یک میدان مغناطیسی متناوب برای گرم کردن سطح یک قطعه فلزی رسانا، توسط کوئل (که متناسب با قطعه طراحی و ساخته شده) به قطعه اعمال می شود و در زمان کمی سطح قطعه به دمای آستنیت رسیده و بلافاصله مایع خنک کاری از جهات مختلف به قطعه پاشیده می شود و قطعه سرد می شود که در طی این فرآیند فقط در سطح قطعه میزان سختی به مقدار قابل توجهی افزایش می یابد و مغز قطعه بدون تغییر می ماند در نتیجه، یک لایه سخت و مقاوم در برابر سایش در سطح قطعه تشکیل می شود. قطعات پلوس خودرو نیز توسط این روش سخت کاری می شوند که در این تحقیق به بررسی عمق نفوذ سختی در قسمت بیرونی قطعه مشعلی پلوس خودرو ساین پرداخته شد. تصویر قطعه مشعلی پلوس و کوئل دستگاه اینداکشن مطابق شکل ۲ می باشد.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۸۴۵۸۷۱۵

آدرس پست الکترونیک: [m.safari@arakut.ac.ir](mailto:m.safari@arakut.ac.ir)



شکل ۱ مجموعه پلوس و جانمایی آن در خودرو



شکل ۲ مشعلی پلوس و کوئل اینداکشن

در این فرآیند با توجه به اینکه پارامترهای ورودی زیاد می باشد تنظیمات دستگاه بنا بر تجربه و با انجام منظم تست های مخرب صورت می گیرد و در هر شیفت کاری، میزان سختی و عمق نفوذ بررسی می شود تا از صحت قطعات تولیدی اطمینان حاصل شود. همینطور با استفاده از دستگاههای ترک یاب، ترک های سطحی بررسی می شوند و سعی می شود پارامترهای فرآیند تحت کنترل باشند. این مورد همیشه برای تولید کنندگان دلهره آور است زیرا کم بودن سختی و عمق نفوذ و همینطور وجود ترک های سطحی، عمر قطعه را به شدت پایین آورده و می تواند موجب بروز صدمات جبران ناپذیری گردد. در این مقاله با بررسی برخی پارامترهای ورودی فرآیند، معادله ریاضی حاکم بر فرآیند استخراج شد که می توان به پیش بینی وضعیت تولید با تغییر پارامترها پرداخت و همینطور با بهینه سازی فرآیند، مقادیر مناسب برای تنظیمات دستگاه استخراج گردید. با این روش اطمینان بیشتری روی تولید وجود دارد و هزینه انجام تست های مخرب به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد. همواره یکی از خروجی های مورد علاقه محققین در فرآیندهای تولید بررسی سختی سطحی قطعات تولید شده بوده است [۱-۴]. در این میان روش سطح پاسخ یک ابزار کاربردی برای پیش بینی رفتار هر فرآیند مخصوصا ساخت می باشد و به تحلیل آماری و ریاضی فرآیند کمک می کند [۵-۷]. در سال ۲۰۱۴، موهان میسرا و همکارانش [۸] یک رویکرد جدید با روش چند سطح پاسخ روی قطعه اکسل جلو تراکتور انجام دادند. بزرا و همکارانش [۹] روش سطح پاسخ را بعنوان یک تکنیک قدرتمند برای تحلیل و بهینه سازی معرفی کردند. فاوننک و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۳ سرد شدن سریع را توصیف کرد که فولاد به دلیل سرد شدن ناهموار، تنش های حرارتی ایجاد می کند. جئونگ و کیم [۱۱] در سال ۲۰۰۹ بینش عمیقی در مورد تفاوت روش های متفاوت برای بهینه سازی چند پاسخ ارائه کردند. هوانگ و همکاران [۱۲] در سال ۱۹۷۹ در مورد پیش بینی ترکیبی از پارامترهای فرآیند، یک رویکرد نسبتا قوی و مقرون به صرفه توسط روش تاگوچی پیشنهاد دادند که برای تولیدکنندگان بسیار مفید است.

کارلیل و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۰ اعلام کردند که تابع مطلوبیت یک رویکرد بهتر برای مسایل بهینه سازی کیفیت چندگانه است. سینگ [۱۴] در سال ۲۰۰۶ در مورد فرآیند سخت کاری سطحی صنعتی به نیاز به نظارت دقیق بر پارامترهای سیستم برای به دست آوردن عمق سختی و مقدار سختی مورد نظر بحث کرد و مشاهده شد که پارامترهای فرآیند، پاسخ های کیفی خروجی را به صورت قابل پیش بینی نشان می دهد از این رو، بر اساس خروجی سیستم، پارامترهای ورودی را کنترل کرد و یک مدل توسعه یافته ارائه نمود.

همانطور که در بررسی منابع مشخص است در تحقیقات صورت گرفته بر روی سختکاری قطعه مشعلی پلوس، تا کنون تحقیقی در خصوص بهینه سازی پارامترهای سخت کاری صورت نگرفته است. بنابراین نوآوری اصلی این پژوهش بررسی رفتار پارامترهای توان، زمان و فشار سیال بر سختی پلوس و بهینه سازی آنها می باشد. از نتایج این تحقیق می توان در بهینه سازی فرآیند سخت کاری القائی سایر قطعات خودرویی و صنعتی مشابه استفاده کرد.

## ۲- کار تجربی و روش تحلیل

قطعه مورد بررسی در این پژوهش، مشعلی پلوس سایننا از جنس فولاد CK55 می باشد و خواص شیمیایی این ماده مطابق جدول ۱ می باشد. فرآیندهای تولید این قطعه شامل فورج، تراشکاری، رولینگ هزارخار، عملیات سخت کاری سطحی، تمپرینگ و سنگ زنی می باشند. در شکل ۳ نمایی از دستگاه عملیات حرارتی القائی مورد استفاده در این پژوهش که ساخت شرکت EFD آلمان می باشد ارائه شده است. پارامترهای توان، زمان و فشار سیال به عنوان پارامترهای ورودی فرآیند مطابق جدول ۲ تعریف گردید. در این پژوهش بعد از انجام فرآیندهای ماشینکاری، تعداد ۱۵ عدد قطعه با مشخصات تولیدی یکسان انتخاب شد و مطابق جدول ۳ در دستگاه عملیات حرارتی القائی قرار گرفت و دستگاه با توان القائی مشخص شده و در زمان تعیین شده تحت میدان مغناطیسی قرار داده شد تا قطعه گرم شود سپس سیال خنک کاری با دبی حجمی مشخص از جهات مختلف به قطعه پاشیده شد تا قطعه سرد و سخت گردد، سپس قطعات برش خورده و پس از مانت مقادیر سختی سطحی و عمق نفوذ با دستگاه میکروهاردنس اندازه گیری گردید و جهت کار تحلیلی در جدول ۳ ارائه گردید.

جدول ۱ درصد خواص شیمیایی فولاد CK55

کربن (%)	کروم (%)	مولیبدن (%)	نیکل (%)	سیلیکون (%)	منگنز (%)
C	Cr	Mo	Ni	Si	Mn
۰/۱۵۲ ~ ۰/۱۶	۰/۴	۰/۱	۰/۴	۰/۴	۰/۹ ~ ۰/۱۶



شکل ۳ نمایی از دستگاه عملیات حرارتی القائی

جدول ۲ پارامترهای ورودی

ردیف	نام پارامتر	واحد اندازه گیری	حد پایین	حد بالا
۱	P توان	[kw]	۴۲	۴۶
۲	S زمان	[s]	۶	۸
۳	Q فشار سیال	[Kg/cm <sup>2</sup> ]	۲	۴

جدول ۳ جدول طراحی آزمایش

شماره آزمایش	توان [kw]	زمان [s]	فشار سیال [Kg/cm <sup>2</sup> ]	عمق نفوذ [mm]	سختی سطح [HRC]
1	42	6	3	2.5	57
2	46	6	3	3.0	59
3	42	8	3	3.8	58
4	46	8	3	4.5	63
5	42	7	2	3.6	57
6	46	7	2	4.4	59
7	42	7	4	2.5	58
8	46	7	4	3.1	61
9	44	6	2	4.0	56
10	44	8	2	5.5	58
11	44	6	4	3.1	59
12	44	8	4	4.3	60
13	44	7	3	3.2	59
14	44	7	3	3.0	58
15	44	7	3	3.3	59

معادله رگرسیون اصلاح شده حاکم بر فرآیند، مطابق معادله های (۱) و (۲) ارائه گردید.

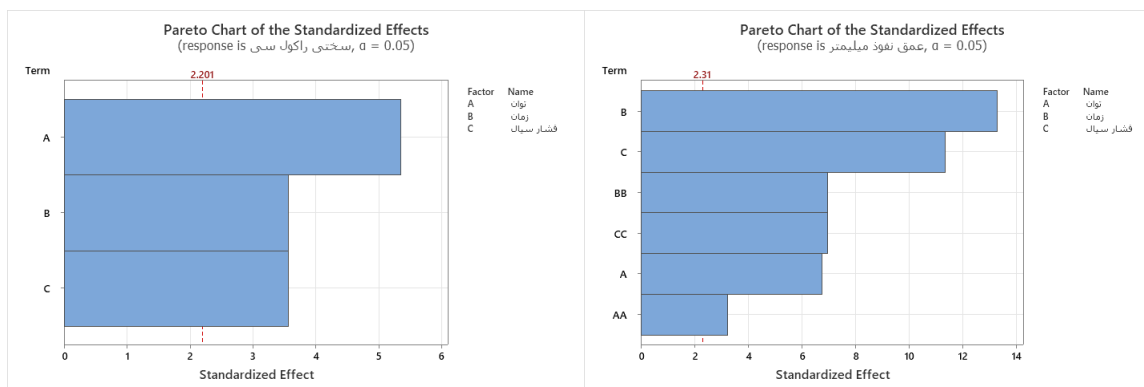
معادله (۱) معادله رگرسیون حاکم بر مدل برای عمق نفوذ

$$\text{عمق نفوذ} = -106.5 + 6.12 P * P * 0.0677 - 3.587Q - 7.071S - P + 0.5542Q * Q * 0.5042 + S * S$$

معادله (۲) معادله رگرسیون حاکم بر مدل برای میزان سختی سطحی

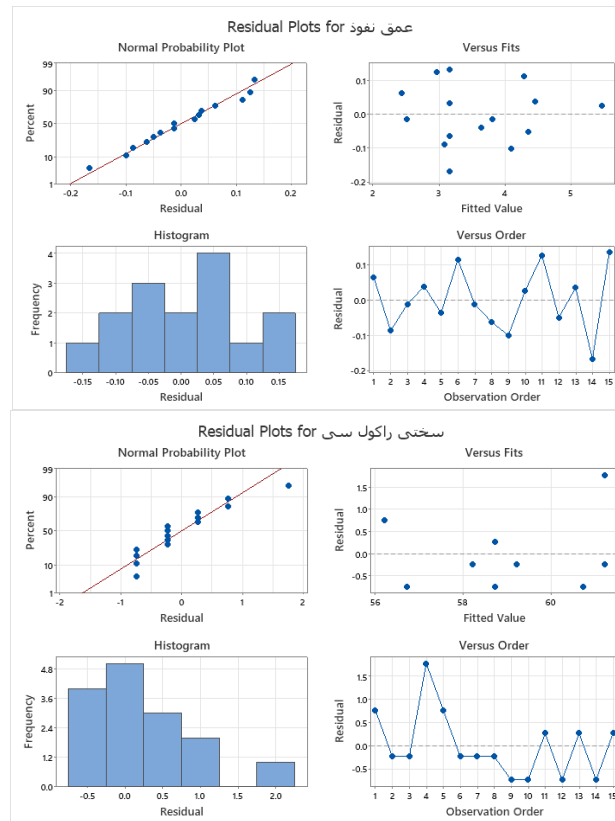
$$\text{سختی راکول سی} = 15.73 + 0.750 Q + S + P$$

در نمودار پرتو پارامترهای بیشتر از خط چین قرمز موثر و کمتر از آن غیر موثر هستند. در شکل ۴ نمودار پرتو بعد از اصلاح دیده می شود. در بررسی میزان سختی سطحی، برهمکنش بین پارامترها موثر نمی باشند و هر پارمتر بطور مجزا تاثیر مستقیم روی میزان سختی دارد.



شکل ۴ نمودار پرتو بعد از اصلاح

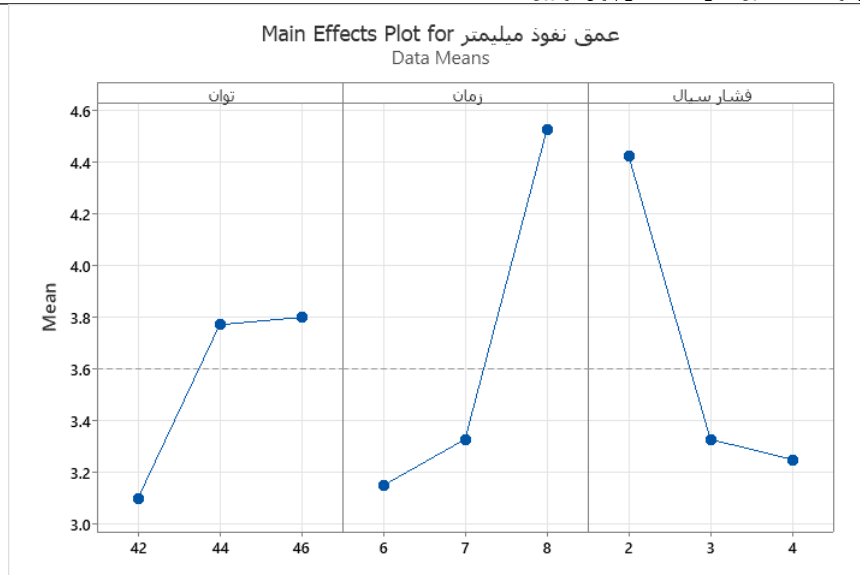
نمودار آنالیز باقیمانده ها برای پاسخ عمق نفوذ و سختی سطحی مطابق شکل ۵ می باشد که مقدار باقیمانده ها را در مقابل مقادیر مورد انتظارشان در زمانی که توزیع نرمال است نشان می دهد. می توان مشاهده کرد که تقریباً تمام آزمایش های انجام شده مطابق با خط توزیع نرمال بوده و دارای پراکندگی مناسبی نسبت به خط معیار می باشند. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که شرایط آزمایشی و پارامترهای انتخاب شده را می توان برای به دست آوردن مقادیر بهینه نتایج خروجی مناسب در نظر گرفت. نمودار باقیمانده در مقابل برازش، باقیمانده ها را روی محور  $Y$  و مقادیر برازش را روی محور  $X$  رسم می کند. در حالت ایده آل، نقاط باید به طور تصادفی در دو طرف صفر قرار گیرند، بدون هیچ الگوی قابل تشخیصی در نقاط و با توجه به اینکه هیچ الگوی در شکل ۵ وجود ندارد و نمودار باقی مانده در مقابل برازش این فرض را تأیید می کند که باقیمانده ها واریانس ثابتی دارند.



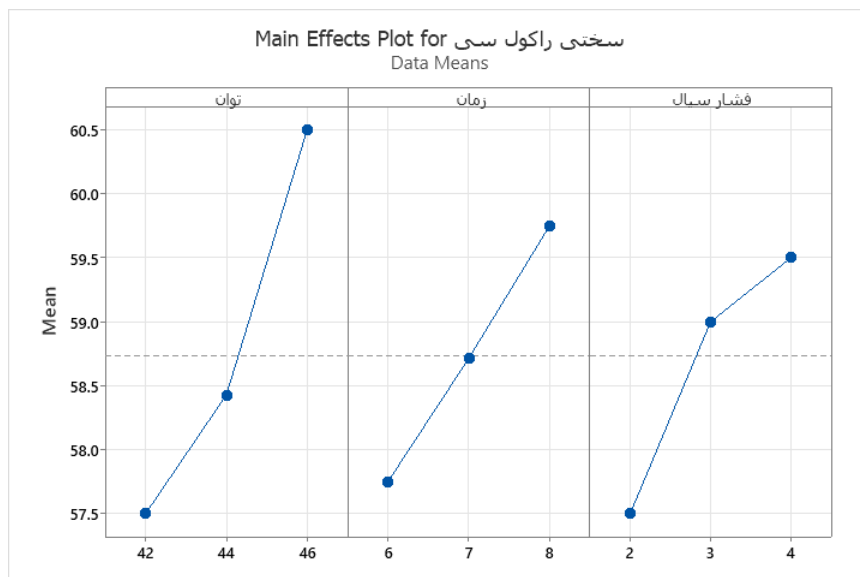
شکل ۵ نمودار آنالیز باقیمانده ها در مقابل مقادیر فیت شده

### ۳- نتایج

در شکل ۶ اثر فاکتورهای اصلی بر مقدار عمق نفوذ مشاهده می شود. با افزایش توان و زمان، مقدار عمق نفوذ افزایش پیدا می کند ولی با افزایش فشار سیال مقدار عمق نفوذ کاهش پیدا می کند. دلیل این نتیجه را می توان اینگونه برداشت کرد که وقتی قطعه تحت میدان مغناطیسی القایی قرار می گیرد و به محدوده آستنیت می رسد، سرد شدن ناگهانی با پاشش سیال خنک کاری باعث افزایش سختی سطحی می گردد و هر چه قطعه سریعتر و با فشار سیال بیشتری سرد شود، میزان سختی سطحی بالاتر می رود و برعکس هر چه فشار سیال خنک کاری بیشتر باشد، سطح قطعه زودتر خنک شده و سختی نمی تواند به عمق قطعه نفوذ کند. در شکل ۷ اثر فاکتورهای اصلی در میزان سختی سطحی مشاهده می شود. با افزایش توان، زمان و فشار سیال، سختی سطحی قطعه افزایش می یابد. می توان نتیجه گرفت که میزان سختی سطحی با پارامترهای ورودی رابطه مستقیم دارد. دلیل این امر را می توان اینگونه برداشت کرد که افزایش توان دستگاه و زمان فرآیند باعث افزایش دمای قطعه می گردد و هر چقدر قطعه در زمان کمتری خنک شود میزان سختی سطحی بیشتر می گردد.

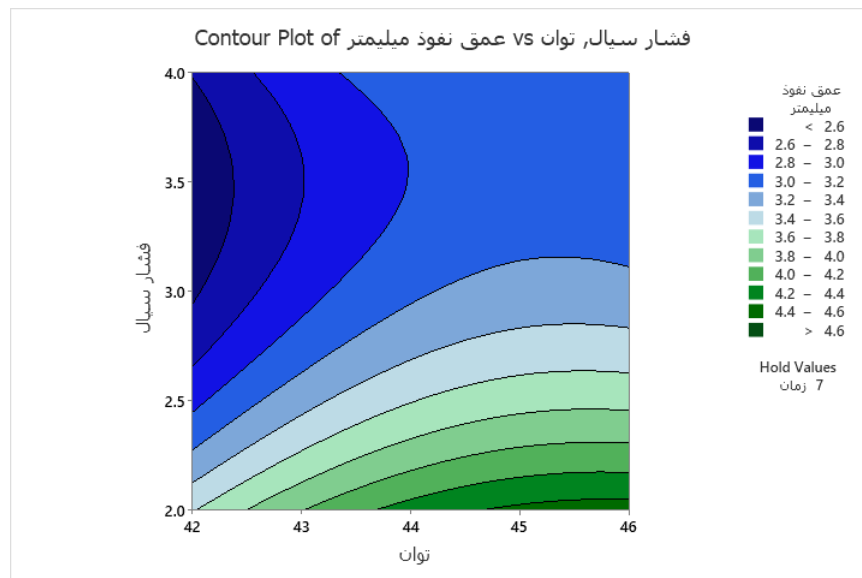


شکل ۶ نمودار اثر فاکتورهای اصلی بر پاسخ عمق نفوذ

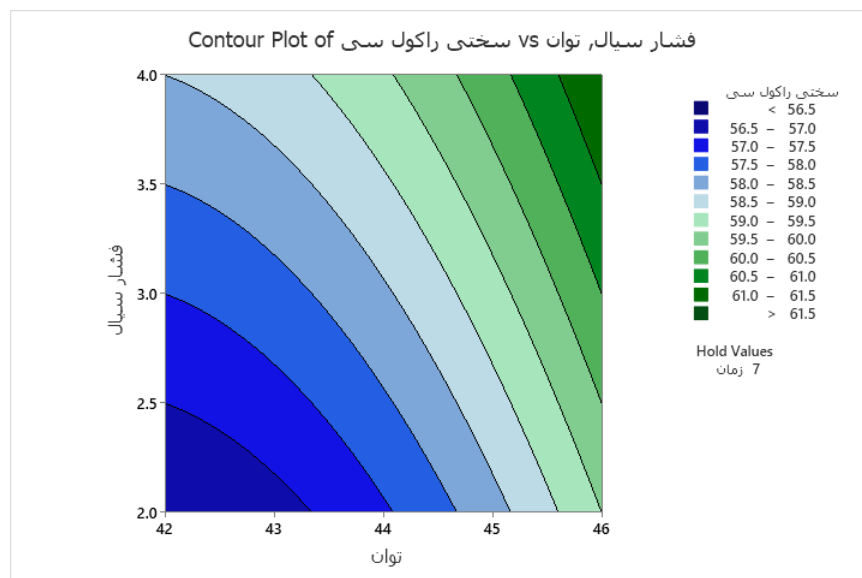


شکل ۷ نمودار اثر فاکتورهای اصلی بر میزان سختی سطحی

با استفاده از کانتورپلات به بررسی دقیق رفتار پارامترها می پردازیم. در شکل ۸، کانتور پلات فشار سیال و توان القائی با عمق نفوذ و در شکل ۹، کانتور پلات فشار سیال و توان القائی با میزان سختی سطحی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش توان القائی و کاهش فشار سیال، عمق نفوذ بیشتر می شود و از طرفی با افزایش توان القائی و افزایش فشار سیال، میزان سختی سطحی نیز افزایش می یابد. دلیل این امر این است که وقتی فشار سیال بالا باشد، سطح قطعه زودتر سرد شده و سختی بالاتری بدست می آید اما وقتی قطعه زود سرد شود، زمان کافی برای نفوذ به عمق ندارد و سختی در سطح می ماند. بنابراین نیاز به محدوده مناسبی برای دستیابی به بهترین پارامترها احساس می شود.

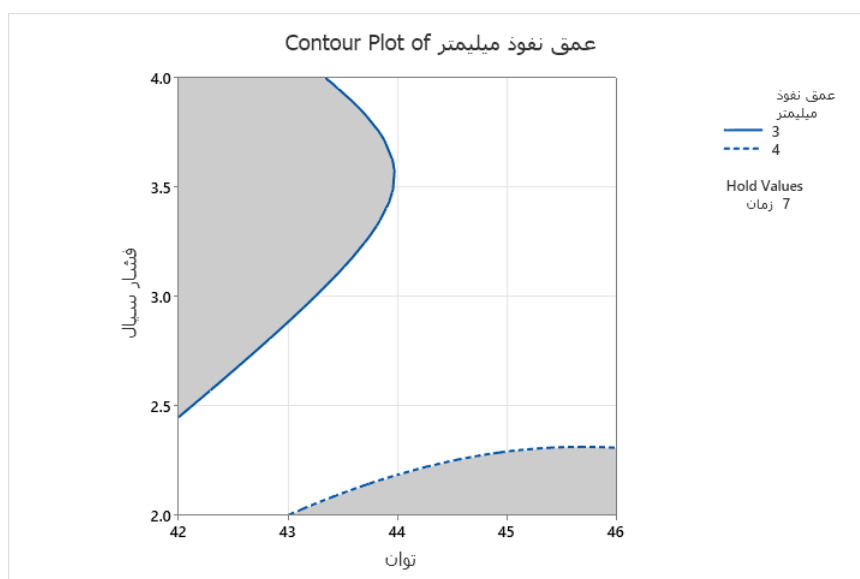


شکل ۸. کانتور پلات فشار سیال و توان القائی با عمق نفوذ



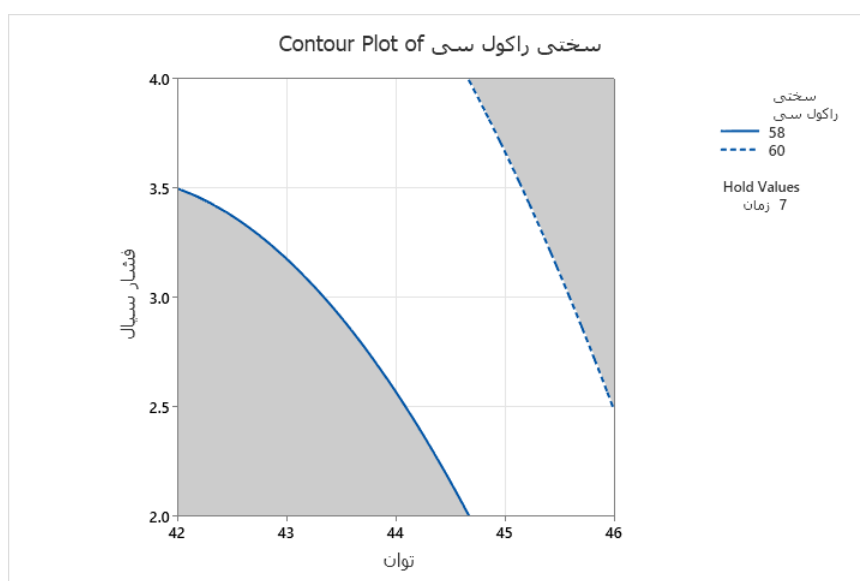
شکل ۹. کانتور پلات فشار سیال و توان القائی با میزان سختی سطحی

منطقه امن برای آوردن مقدار پاسخ عمق نفوذ ۳ تا ۴ میلیمتر با ثابت نگهداشتن زمان ۷ ثانیه، مطابق شکل ۱۰، در محدوده تنظیمات فشار سیال ۲ تا ۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و توان ۴۲ تا ۴۶ کیلووات مطابق محدوده های سفید رنگ از خط ممتد برای عمق ۳ میلی متر تا خط چین برای عمق ۴ میلی متر می باشد. با انتخاب مقادیر در محدوده سفید رنگ متناسب با نیاز، می توان به نتایج دلخواه در عمق نفوذ ۳ تا ۴ میلی متر رسید.



شکل ۱۰ منطقه امن برای بدست آوردن مقدار پاسخ عمق نفوذ در زمان ثابت

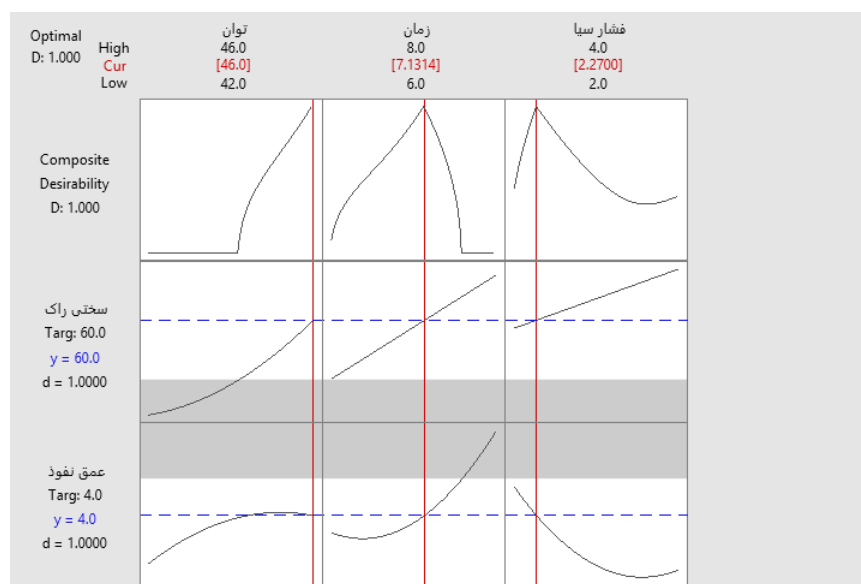
همچنین منطقه امن برای بدست آوردن میزان سختی سطحی ۵۸ تا ۶۰ راکول سی با ثابت نگهداشتن زمان ۷ ثانیه، مطابق شکل ۱۱، در محدوده تنظیمات فشار سیال ۲ تا ۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و توان ۴۲ تا ۴۶ کیلووات مطابق محدوده های سفید رنگ، خط ممتد برای سختی ۵۸ راکول سی تا خط چین برای سختی ۶۰ راکول سی می باشد. با انتخاب مقادیر در محدوده سفید رنگ متناسب با نیاز، می توان به نتایج دلخواه میزان سختی سطحی ۵۸ تا ۶۰ راکول سی رسید.



شکل ۱۱ منطقه امن برای بدست آوردن مقدار پاسخ میزان سختی سطحی در زمان ثابت

## ۴- نتیجه گیری

طبق آزمایشات تجربی و نتایج روش سطح پاسخ، مشاهده شد که با افزایش توان و زمان القائی، میزان سختی سطحی و مقدار عمق نفوذ افزایش یافت اما با افزایش فشار سیال، میزان سختی افزایش و مقدار عمق نفوذ کاهش می یابد. بنابراین پیدا کردن پارامترهای بهینه حائز اهمیت می باشد. مقدار عمق نفوذ مناسب تعریف شده در نقشه برای قطعه مشعلی پلوس ساینه، ۳ تا ۴/۵ میلی متر و میزان سختی سطحی در محدوده ۵۸ تا ۶۴ راکول سی می باشد که با هدف قرار دادن این مقادیر، نمودار بهینه سازی پارامترها به منظور دستیابی به مقدار عمق نفوذ ۴ میلی متر و میزان سختی سطحی ۶۰ راکول سی، مطابق شکل ۱۲ می باشد که توان القائی ۴۶ کیلو وات، زمان القائی ۷/۱۳ ثانیه و فشار سیال خنک کاری ۲/۲۷ می بایست تعریف شود که با استفاده از این تنظیمات بهینه، نتایج مطلوب حاصل خواهد شد و انجام تست های مخرب به حداقل ممکن خواهد رسید که کاهش چشمگیری در هزینه و زمان دارد و همچنین باعث افزایش اطمینان و کنترل بیشتر روی فرآیند سخت کاری القائی می گردد که این اطلاعات برای کارخانجات بسیار ارزشمند می باشد.



شکل ۱۲ مقادیر بهینه پارامترها برای کسب نتایج مطلوب

## Authorship Contribution Statement

**Dr. Mehdi Safari**



**Biography:**

Associate Professor at Arak University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

**Contribution Statement:**

Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

**Behnam Zamzami**



**Biography:**

Ph.D. student at Arak University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

**Contribution Statement:**

Methodology, Resources, Supervision, Project administration, Investigation.

**Amir Mohammad Babaei**



**Biography:**

Ph.D. student at Arak University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

**Contribution Statement:**

Methodology, Resources, Supervision, Project administration, Investigation

**Omid Ghaderi**



**Biography:**

Department of Materials Science & Engineering, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee Wisconsin 53211, United States

**Contribution Statement:**

Methodology, Resources, Supervision, Project administration, Investigation

## ۵- مراجع

- [1] Sedehi SMR, Maraki M, Yazdi SH, Jalali A, Ezazdi H, Khosravi M. Is it possible to improve the surface properties by controlling the machining process at the same time as the parts are made? An empirical study of the effect of speed and flow rate variables of the wire cut machine on the surface properties of CK45. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2024; 4(3):497-512.
- [2] Alizadeh A, Heydari Beni M, Altafi M, Eskandari Jam J. Investigating wear behavior of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Gr hybrid composite prepared by centrifugal casting method. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2023; 3(3):285-309.
- [3] Nickabadi S, Rostami H, Bathaee SH. Experimental study and examination of failure zone factors and causes of destruction of thick metal sheets of rail cranes: mechanical properties, chemical analysis and metallography. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2023; 3(2):267-284.

- [4] Faraji H, Taheri M. Sensitivity analysis of parameters affecting cutting speed and dimensional deviation of wire electrical discharge machining. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2022; 2(3):310-327.
- [5] Zolfaghari M, Heydari H, Ghasemi MJ, Tahmasbi V. Investigating the effect of cutting speed and cutting depth during nickel-iron-chromium alloys nano machining of by response surface methodology and molecular dynamics simulation. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2025; e721440.
- [6] Akhondi A, Tahmasbi V, Qasemi M. Modeling and Global Sensitivity Analysis of Surface Roughness in Cortical Bone Grinding process. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2025; e725126.
- [7] Sousanabadi Farahani A, Taheri M, Mohammadi MJ. Investigating the effectiveness of polymethyl methacrylate drilling parameters using coated tools. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2025; 4(4):563-578.
- [8] Misra MK. Multi response Optimization of Induction Hardening Process -a New Approach. *IFAC*. 2014; 862-869.
- [9] Aslan N. Application of response surface methodology. *Powder Technology*. 2008; 185(1):80-86.
- [10] Favennec Y, Labbe V, Bay F. Induction heating processes optimization a general optimal control approach. *Journal of Computational Physics*. 2003; 187(1):68-94.
- [11] Jeong IJ, Kim KJ. An interactive desirability function method to multi response optimization. *European Journal of Operational Research*. 2009; 195(2):426.
- [12] Hwang CL, Masud ASM. *Multiple objective decision making-methods and applications*; Springer, 1979.
- [13] Carlyle WM, Montgomery DC, Runger GC. *Optimization problems and methods in quality control and improvement*. *Journal of Quality Technology*. 2000; 32(1).
- [14] Singh R. *Introduction to Basic Manufacturing Process and Workshop Technology*; New Age International, 2006.