



Original Research

## Development of an electrochemical deburring process using ultrasonic waves for combustion engine oil spring ring

Mehdi KianiMajd, Alireza Hajjalimohammadi\*

Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Deburring  
Electrochemical Deburring  
Ultrasonic  
Pulse  
Deburring Time

### ABSTRACT

Electrochemical deburring is one of the methods commonly used to remove machining inclusions on small and micron scales. High accuracy, speed, and possibility of deburring at the same time are the advantages of this electrochemical deburring method. In this article, the effect of applying ultrasonic waves on the electrochemical deburring process for combustion engine oil spring rings has been investigated. The effect of input parameters ultrasonic power, electric current intensity, and electrolyte temperature on the output parameter of material removal rate in electrochemical deburring was investigated. The experiments were designed by the Response Surface method and based on the Box-Behnken design so that each of the three mentioned input parameters is changed in three levels and the other input parameters are kept constant. Two types of electrolytes used in these experiments are NaCl and NaNO<sub>3</sub>. The maximum applied ultrasonic power is one hundred watts. The results of the experiments showed that the effect of ultrasonic on the material removal rate under the same conditions of the maximum electrolyte temperature and the maximum electric current intensity for the oil spring ring in the case of using NaCl electrolyte is 83.87% and in the case of using NaNO<sub>3</sub> electrolyte is 89.74%. Also, for the oil spring ring, the average increase in material removal rate for NaNO<sub>3</sub> electrolyte compared to NaCl electrolyte is 19.6%. After the ultrasonic power, electric current intensity and electrolyte temperature, respectively, had a positive effect on increasing the rate.



© 2024 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

\* Corresponding author

E-mail address: [ahajjali@semnan.ac.ir](mailto:ahajjali@semnan.ac.ir) (A. Hajjalimohammadi)

Received 17 March 2024; Accepted 21 April 2024

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

**Cite this article:** KianiMajd M, Hajjalimohammadi A. Development of an electrochemical deburring process using ultrasonic waves for combustion engine oil spring ring. The Journal of Engine Research. 2024 Jun 21;71(2):55-68. doi: 10.22034/ER.2024.2025121.1040

## توسعه فرایند پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی به کمک امواج فراصوت برای فنر حلقه روغن موتور احتراقی

مهدی کیانی مجد، علیرضا حاجی‌علی‌محمدی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی یکی از روش‌هایی است که معمولاً برای از بین بردن اضافه‌های تراشکاری در مقیاس کوچک و میکرونی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دقت، سرعت و امکان پلیسه‌گیری همزمان از مزایای این روش پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی است. در این مقاله تأثیر اعمال امواج فراصوت بر فرایند پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی برای فنر حلقه روغن موتور احتراقی مورد بررسی قرار گرفته است. اثر متغیرهای ورودی توان فراصوت، شدت جریان برق و دمای مایع رسانا بر متغیر خروجی نرخ پلیسه‌گیری در پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی بررسی شد. آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ و بر مبنای طرح باکس بنکن طراحی شده‌اند، به طوری که هر کدام از سه متغیر ورودی مذکور در سه سطح تغییر داده می‌شوند و سایر متغیرهای ورودی ثابت نگه داشته می‌شوند. از دو نوع مایع رسانا  $\text{NaCl}$  و  $\text{NaNO}_3$  در آزمایش‌ها استفاده شد. حداکثر توان فراصوت اعمال شده صد وات است. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان داد، اثرگذاری فراصوت بر نرخ پلیسه‌گیری در شرایط یکسان دمای مایع رسانا بیشینه و شدت جریان برق بیشینه برای فنر حلقه روغن در حالت استفاده از مایع رسانا  $\text{NaCl}$  به مقدار ۸۳٫۸۷ درصد و در حالت استفاده از مایع رسانا  $\text{NaNO}_3$  به مقدار ۸۹٫۷۴ درصد است. همچنین میانگین افزایش نرخ پلیسه‌گیری برای مایع رسانا  $\text{NaNO}_3$  نسبت به مایع رسانا  $\text{NaCl}$  برای فنر حلقه روغن برابر ۱۹٫۶ درصد است. همچنین ملاحظه شد پس از توان فراصوت، شدت جریان برق و دمای مایع رسانا بترتیب اثر مثبت بر افزایش نرخ پلیسه‌گیری داشتند.

### اطلاعات مقاله

#### کلیدواژه‌ها:

پلیسه  
پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی  
فراصوت  
پالس  
زمان پلیسه‌برداری



© 2024 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

\* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: [ahajiali@semnan.ac.ir](mailto:ahajiali@semnan.ac.ir) (علیرضا حاجی‌علی‌محمدی)

دریافت ۲۷ اسفند ۱۴۰۲؛ پذیرش ۲ اردیبهشت ۱۴۰۳  
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

**Cite this article:** KianiMajd M, Hajjalimohammadi A. Development of an electrochemical deburring process using ultrasonic waves for combustion engine oil spring ring. The Journal of Engine Research. 2024 Jun 21;71(2):55-68. doi: 10.22034/ER.2024.2025121.1040

## ۱- مقدمه

مطالعات متعددی به منظور بهینه‌سازی طراحی مجموعه‌های حلقه سمبه از طریق نظری و عملی، به ویژه روش‌های بهینه‌سازی، برای افزایش کارایی آن‌ها، گزارش شده‌اند [۱-۵]. یکی از موضوعات قابل توجه این است که تا حد امکان باید از به وجود آمدن پلیسه در زمان ساخت فتر حلقه روغن موتور احتراقی جلوگیری کرد. اما به هر حال در اکثر روش‌های تولیدی به عنوان یک محصول جانبی پلیسه ایجاد می‌شود و در اغلب موارد به وجود آمدن پلیسه اجتناب ناپذیر است [۶]. عملیات پلیسه‌گیری شامل حذف پلیسه‌ها و ایجاد شرایط مناسب برای لبه بدون تأثیر بر بقیه سطح است [۷، ۸]. در قطعات دقیق، پلیسه‌گیری و اتمام لبه اغلب ۳۰ درصد از هزینه قطعه و حتی بیشتر برای قطعات کوچک تشکیل می‌دهد و گاهی اوقات، منشأ بسیاری از مشکلات بعدی می‌شود [۹].

پلیسه‌گیری و کیفیت لبه منجر به بهبود عملکرد، هزینه، ایمنی و ظاهر قطعات می‌شود. فرایند پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی براساس اصل الکتروشیمیایی کار می‌کند که اکنون با فناوری فاردیک همراه شده است تا قابلیت فرایند را افزایش دهد. در این روش از ابزاری شبیه به لبه‌ای که پلیسه‌گیری می‌شود استفاده می‌کنند. ابزار با جریان برق و محلول سدیم کلرید یا سدیم نیترات به عنوان مایع رسانا کار می‌کند. پلیسه حذف می‌شود و هر گونه ماده اضافی به وسیله جریان محلول به بیرون حمل می‌شود. طراحی تجهیزات و سطح اتوماسیون برای فرایند مایع رسانای تا حد زیادی تحت تأثیر نوع و اندازه قطعه کار برای پردازش، اندازه پلیسه، نرخ تولید و مقدار پلیسه‌گیری است [۱۰].

حکیم<sup>۱</sup> و همکاران [۱۱]، تأثیر برخی شاخصهای طراحی الکترو در پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی را بررسی کردند. در پژوهش آن‌ها موقعیت الکترو، طول عایق‌بندی نشده الکترو، جنس الکترو و فاصله از مهم‌ترین شاخصهای طراحی الکترو هستند که بر روند پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی تأثیر می‌گذارند. نتایج این تحقیق نشان داد هنگامی که الکترو بالاتر از سطح قطعه کار باشد، پلیسه‌گیری در سطح انتهایی قطعه کار رخ می‌دهد. هنگامی که الکترو پایین‌تر از سطح قطعه کار است، حذف نامطلوب در سطح قطعه کار رخ می‌دهد. هنگامی که ارتفاع الکترو تقریباً برابر با ارتفاع قطعه کار باشد، هیچ حمله‌ای به سطح انتهایی قطعه کار رخ نمی‌دهد که بهترین شرایط پلیسه‌گیری را ایجاد می‌کند. الکترو فولاد ضد زنگ منجر به مقادیر بالاتر شعاع تخریب نسبت به الکتروهای مس می‌شود، در حالی که الکتروهای برنجی بدترین نتایج را می‌دهند.

چوی و کیم<sup>۲</sup> [۱۲]، پلیسه‌گیری سوراخ شفت گاورنر<sup>۳</sup> را بررسی کرده‌اند و ویژگی‌های پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی را از طریق آزمایش‌ها مشخص کردند و عوامل اصلی مانند فاصله و مایع رسانای بررسی شد. آن‌ها از محلول مایع رسانا  $\text{NaNO}_3$  و ابزار مسی با قطر هفت میلی‌متر استفاده نمودند. نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها نشان داد که اگر چگالی جریان بیشتری به فاصله بین الکترو و قطعه کار اعمال شود، سرعت انحلال قطعه کار بیشتر است و مستقل از سختی یا سایر مشخصات فلز است. اگر فاصله تراشکاری در یک فاصله کم حفظ شود تراشکاری الکتروشیمیایی می‌تواند در ولتاژ کمتری رخ دهد. همچنین، هرچه فاصله اولیه کوچکتر باشد، جریان بیشتر خواهد بود زیرا مایع رسانا به عنوان نوعی مقاومت عمل می‌کند، بنابراین فاصله زیاد مقاومت را افزایش می‌دهد. در پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی، حفظ فاصله بین قطعه کار و الکترو مفید است، اما باید از فاصله بسیار کم جلوگیری کرد زیرا این امر باعث ایجاد جرقه و اتصال کوتاه الکتریکی می‌شود.

شریستاه<sup>۴</sup> و همکاران [۱۳]، تغییر هدایت الکتریکی منابع مختلف آب با دما و غلظت محلول مایع رسانا  $\text{NaCl}$  را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه، یکی از مهم‌ترین متغیرهای فیزیکی آب، هدایت الکتریکی، با کمک رسانایی متر بررسی شده است. هدف از کار بررسی تأثیر دما و غلظت محلول مایع رسانا بوده است. هدایت الکتریکی منابع مختلف آب با تغییر محلول مایع رسانا  $\text{NaCl}$  با تغییر غلظت آن از ۲٫۵٪ به ۲۰٪ مقایسه شد. نتیجه این تحقیق نشان داد

<sup>1</sup> Hakim

<sup>2</sup> Choi and Kim

<sup>3</sup> Governor Shaft

<sup>4</sup> Shrestha

که هدایت الکتریکی منابع مختلف آب با افزایش دما و غلظت محلول مایع رسانا افزایش می‌یابد. افزایش دمای محلول باعث کاهش ویسکوزیته و افزایش تحرک یون‌ها در محلول می‌شود. افزایش دما همچنین ممکن است باعث افزایش تعداد یون‌ها در محلول به دلیل تفکیک مولکول‌ها شود. در نتیجه، رسانایی محلول افزایش می‌یابد. وقتی دما از ۴۰ به ۷۰۰ درجه سانتیگراد افزایش یابد، رسانایی الکتریکی بیش از ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. افزایش رسانایی نمونه‌های آب به دلیل افزایش تحرک یون‌ها است. کیانی مجد و همکاران [۱۴] متغیر نرخ براده‌برداری در دو حالت با و بدون استفاده از امواج فراصوت مورد بررسی قرار دادند نتایج نشان داد که با افزایش جریان الکتریکی، نرخ براده‌برداری در هر دو مورد با و بدون فراصوت روند افزایشی دارد و پس از اعمال یک جریان مشخص ثابت می‌ماند. در موردی که امواج فراصوت اعمال شد، نرخ براده‌برداری در جریان ۲،۷ و ۲ آمپر بترتیب از ۲۰ تا ۱۰۰ درصد نسبت به حالت بدون امواج فراصوت افزایش می‌یابد.

مطالعات متعددی در زمینه بررسی متغیرهای مؤثر در پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی انجام شده است. در این تحقیقات، تأثیر متغیرهای مختلف از جمله نوع محلول مایع رسانا، نوع منبع تغذیه، مقدار ولتاژ، مقدار جریان الکتریکی، توان فراصوت، اندازه پلیسه، جنس قطعه کار، دمای مایع رسانا و نوع ابزار مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. در این مقاله تأثیر اعمال امواج فراصوت بر فرایند پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی برای فنر حلقه روغن موتور احتراقی برای اولین بار مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

عملکرد فرایند پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی به متغیرهای متعددی از جمله شدت جریان برق، دمای مایع رسانا، اختلاف پتانسیل، جنس ابزار، مقدار PH وابسته است که هر یک از این متغیرها به سهم خود بر روی نتایج خروجی تأثیر گذارند [۱۳]. متغیرهای متغیر در این پژوهش، توان فراصوت، شدت جریان برق، نوع مایع رسانا و دمای مایع رسانا انتخاب شدند. جنس ابزار، فاصله ابزار و قطعه کار، درصد وزنی مایع رسانا، اختلاف پتانسیل و زمان پلیسه‌گیری به عنوان متغیرهای ثابت در نظر گرفته شدند. از طرف دیگر برای بررسی اثر امواج فراصوت بر فرایند پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی، توان فراصوت به عنوان یک متغیر ورودی در نظر گرفته می‌شود. برای انجام فرایند پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی با اعمال توان فراصوت، دستگاهی طراحی و ساخته شده است که اجزا و نحوه عملکرد این سیستم در زیربخش بعدی توضیح داده شده‌اند. برای بررسی اثر نوع مایع رسانا در این فرایند، از دو نوع مایع رسانا NaCl و  $\text{NaNO}_3$  استفاده شده است. برای تحلیل نتایج تجربی به دست آمده از روش پاسخ سطح بهره گرفته شده است.

در فرایند پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی از قطعه‌کارهایی از جنس فنر حلقه روغن سمبه استفاده شد. حلقه روغن سمبه در پایین‌ترین شیار حلقه قرار دارد (شکل ۱). حلقه روغن برای جمع کردن روغن اضافی از دیواره استوانه در حین حرکت سمبه استفاده می‌شود. روغن اضافی از طریق حلقه روغن و فنر درون آن جمع‌آوری شده و به محفظه روغن موتور<sup>۱</sup> بازگردانده می‌شود. مراحل تولید فنر به این صورت است که ابتدا فولاد را با عملیات کویلینگ<sup>۲</sup> به صورت فنر مارپیچ درآورده و سپس عملیات سنگ‌زنی توسط سنگ سترلس<sup>۳</sup> انجام می‌گردد. در مرحله آخر تولید، عملیات حرارتی<sup>۴</sup> روی فنرها انجام می‌شود. در طی مراحل مذکور در فنر پلیسه ایجاد می‌گردد.

فنر در حلقه روغن با بالا و پایین آمدن سمبه به دور خود در حلقه می‌چرخد که این عملیات باعث می‌شود که تمام روغن از دیواره استوانه جمع‌آوری شود و در وهله دوم فنر در حلقه بر اثر رسوبات قفل نکند. در زمان مونتاژ اگر پلیسه

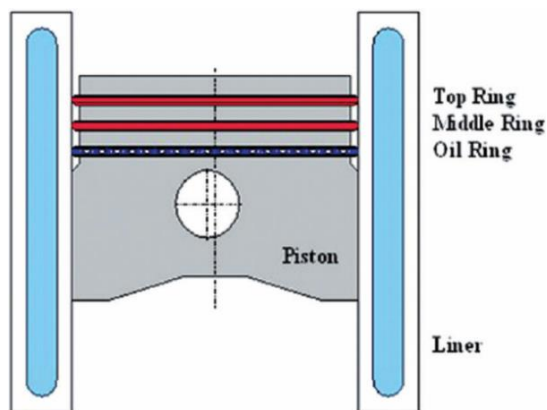
<sup>1</sup> Oil pan

<sup>2</sup> Coiling

<sup>3</sup> Centerless grinding

<sup>4</sup> Heat treatment

وجود داشته باشد فنر در حلقه خود نمی‌چرخد و پلیسه‌ها باعث می‌شود که دیواره استوانه خط بیفتد [۱۵]. شکل ۲ حلقه روغن به همراه فنر را نشان می‌دهد.

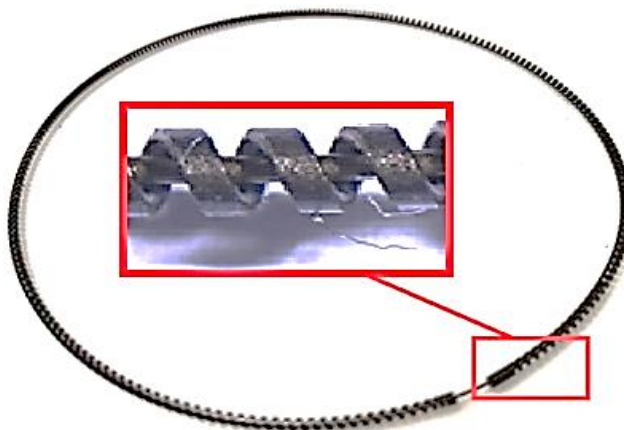


شکل ۱ جایگاه حلقه روغن در سمبه [۱۲]



شکل ۲ حلقه روغن به همراه فنر

در شکل ۳ نمایی از این قطعه کار نشان داده شده است که فنر حلقه از جنس فولاد EN 10270-2:2011 با قطر ۷۳ میلی‌متر و ضخامت ۰٫۸ میلی‌متر است. جنس نمونه قطعه‌کار، فنر حلقه روغنی موتور S81 است.



شکل ۳ نمایی از قطعه کار فنر حلقه قبل از انجام فرایند

در آزمایش‌ها از دو الکتروود مسی مستطیلی شکل (به طول ۱۵۰ میلی‌متر و عرض ۱۰۰ میلی‌متر) که با فاصله ۹۰ میلی‌متر از هم قرار گرفتند، به عنوان ابزار استفاده شده است. نمایی نزدیک از ابزار و قطعه کار درون مخزن اصلی در شکل ۴ آورده شده است.

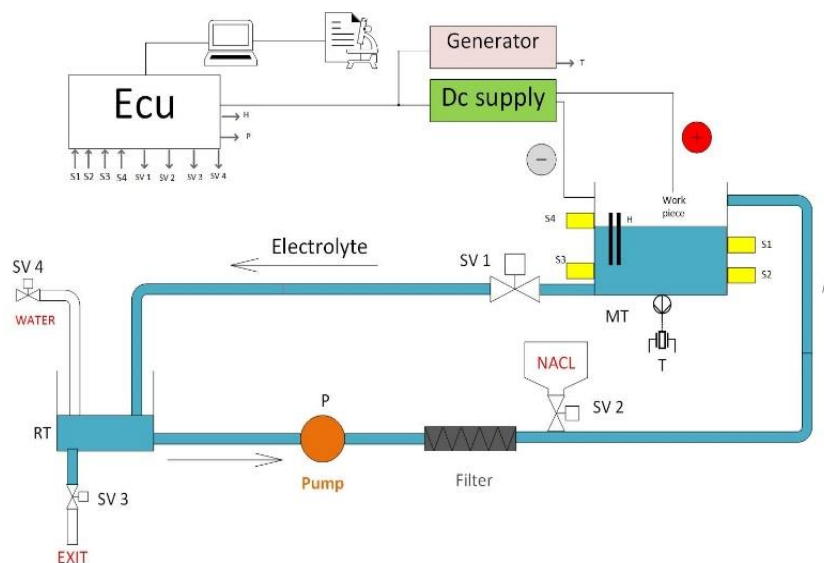


شکل ۴ مجموعه ابزار و قطعه کار

در شکل ۵ دستگاه ساخته شده برای انجام آزمایش‌های فرایند و در شکل ۶ شمای این دستگاه ارائه شده است. نمادهای استفاده شده در شمای دستگاه در جدول ۱ مشاهده می‌شود. دستگاه ساخته شده شامل اجزای مختلفی است. منبع تغذیه دارای جریان ورودی برق ۲۲۰ ولت و جریان خروجی متغیر ۰ تا ۲۰ آمپر تثبیت شده و اختلاف پتانسیل ۰ تا ۱۹ ولت DC به صورت پیوسته است. قطب منفی (کاتد) به ابزار و قطب مثبت (آند) به قطعه کار متصل می‌گردد.



شکل ۵ چیدمان آزمایشگاهی دستگاه طراحی شده



شکل ۶ شماتیک دستگاه طراحی شده

جدول ۱ نمادهای استفاده شده در شماتیک دستگاه

نماد	مفهوم نماد
S	حسگر
SV	شیر سلونوئید
H	گرم‌کن
P	پمپ
T	ترانسدیوسر
MT	مخزن اصلی
RT	مخزن ذخیره

در تحقیق حاضر متغیرهای ورودی توان فراصوت، جریان برق و دمای مایع رسانا است. این متغیرها و سطوح تغییرات آن‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. توان فراصوت (P) بر حسب وات، شدت جریان برق (I) بر حسب آمپر، دمای مایع رسانا بر حسب درجه سلسیوس وارد شده است. نوع مایع رسانا در دو آزمون مجزا NaCl و  $\text{NaNO}_3$  در نظر گرفته شده است. سطح  $P = 0$  برای بررسی حالت بدون اعمال فراصوت در نظر گرفته شد، بیشینه توان در این آزمون  $P = 100\text{W}$  گرفته شده است علت این انتخاب ساکن ماندن قطعه کار و برخورد نکردن آن با ابزار است. این مقدار با انجام آزمایش‌ها به دست آمده است و نتایج نشان داد که برای مقادیر بالاتر از این توان، فتر از جای خود باز شده و با برخورد به ابزار اتصال کوتاه می‌دهد که منجر به خراب شدن قطعه کار می‌گردد.

جدول ۲ متغیرها و سطوح تغییرات آن‌ها

متغیر	سطوح آزمایش		
توان فراصوت (W)	۰	۵۰	۱۰۰
شدت جریان برق (A)	۱	۳٫۵	۶
دمای مایع رسانا (°C)	۲۵	۳۰	۳۵
نوع مایع رسانا	NaCl		$\text{NaNO}_3$

سایر متغیرها در آزمایش‌های تجربی ثابت در نظر گرفته شدند. این متغیرهای ثابت در جدول ۳ ذکر شده‌اند.

جدول ۳ متغیرهای ثابت آزمایش‌های تجربی			
متغیر	مقدار	متغیر	مقدار
جنس ابزار	مس	زمان	۶۰ s
فاصله ابزار و قطعه کار	۴۵ mm	مقادیر PH	۷,۷۵
درصد وزنی مایع رسانا	۳۰ gr/liter	مقادیر رسانایی	۸ میلی‌زیمنس
اختلاف پتانسیل	۱۵ V	ارتفاع سطح مایع	۱۵ سانتی‌متر

به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها و بهره‌مندی از تحلیل آماری، از نرم افزار آماری مینی‌تب<sup>۱</sup> نسخه ۱۸ و روش سطح پاسخ بهره گرفته شده است.

### ۳- نتایج و بحث

پس از انجام عملیات پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی، مقادیر مربوط به نرخ پلیسه‌گیری نمونه‌ها در هر حالت فرایندی، اندازه‌گیری شدند. در شکل ۷ نمایی از قطعه کار فتر حلقه روغن مشاهده می‌شود. در شکل الف پلیسه‌های روی فتر حلقه روغن به وضوح مشاهده می‌شود. شکل ب همان قطعه کار را بعد از انجام فرایند پلیسه‌گیری نشان می‌دهد که سطح قطعه کار صاف و بدون پلیسه شده است.

برای بررسی کفایت الگوی پیش‌بینی شده از آزمون‌های اصلی، نمودار باقیمانده‌ها نظیر نمودار احتمال عادی بودن باقیمانده‌ها، نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده و نمودار باقیمانده‌ها در مقابل ترتیب انجام آزمایش‌ها تهیه و ارائه شده است. نمودار باقیمانده‌ها برای دو نوع مایع رسانا NaCl در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها، مشاهده می‌شود که عوامل مستقل از زمان بوده و تغییرات آن از روند خاصی پیروی نمی‌کند که نشان دهنده کفایت الگوی ریاضی استفاده شده است. بنابراین، از شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که الگوی کیفیت مناسب را دارد و الگوسازی به روش رویه سطح به خوبی انجام شده است.



(ب)

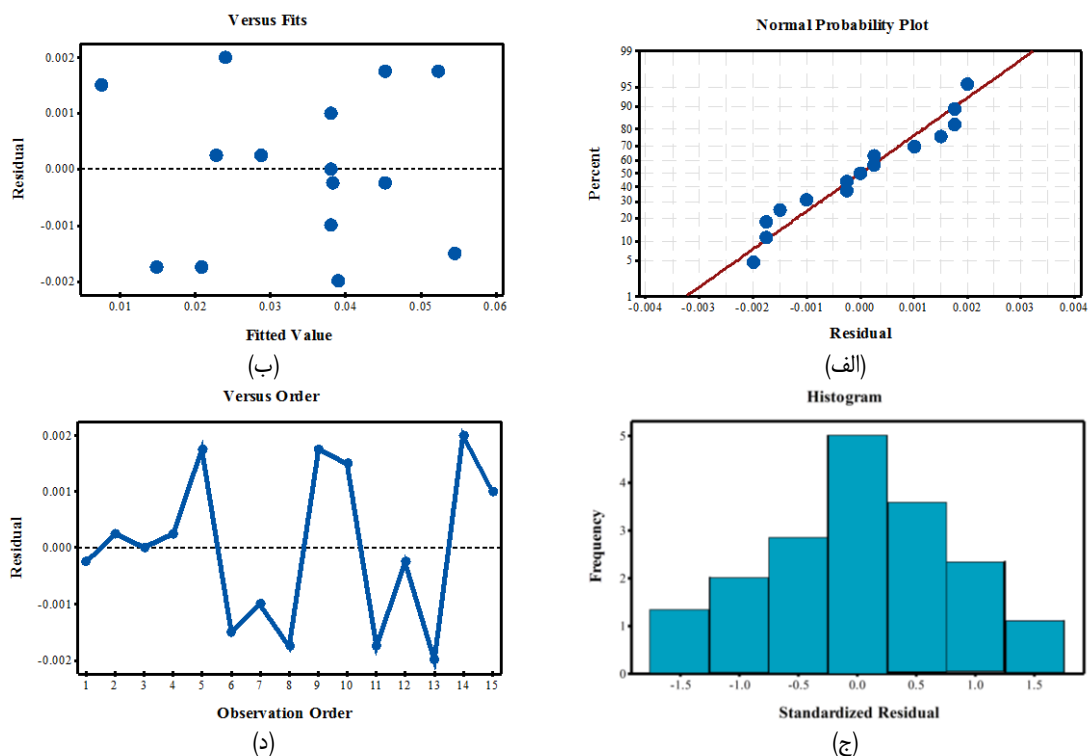


(الف)

شکل ۷ نمایی از قطعه کار فتر حلقه روغن الف) قبل و ب) بعد از فرایند پلیسه‌گیری

<sup>1</sup> MiniTab

نرخ پلیسه‌گیری با محاسبه وزن پلیسه حذف شده به زمان تراشکاری محاسبه گردید. به این ترتیب که، جرم پلیسه برداشته شده در هر حالت فرایندی، با محاسبه اختلاف وزن نمونه قبل و بعد از فرایند محاسبه شد و زمان تراشکاری نمونه نیز از ابتدا تا انتهای فرایند، توسط کرنومتر اندازه‌گیری شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده برای کمیت‌های مورد بررسی در جدول ۴ برای فتر حلقه با مایع رسانا NaCl و مایع رسانا  $\text{NaNO}_3$  ارائه شده است.



شکل ۸ نمودار باقیمانده‌ها برای فتر حلقه روغن با مایع رسانا NaCl

جدول ۴ مقادیر متغیر نرخ پلیسه‌گیری اندازه‌گیری شده برای فتر حلقه روغن به ازای آزمایش‌های مختلف

آزمایش	P (W)	I (A)	T (°C)	MRR <sub>NaCl</sub> (gr/min)	MRR <sub>NaNO3</sub> (gr/min)	RMRR (%)
۱	۵۰	۶,۰	۳۵	۰,۰۴۵	۰,۰۵۴	۲۰
۲	۵۰	۱,۰	۲۵	۰,۰۲۳	۰,۰۲۷	۱۷
۳	۵۰	۳,۵	۳۰	۰,۰۳۸	۰,۰۴۵	۱۸
۴	۵۰	۱,۰	۳۵	۰,۰۲۹	۰,۰۳۵	۲۱
۵	۱۰۰	۳,۵	۲۵	۰,۰۴۷	۰,۰۵۶	۱۹
۶	۱۰۰	۶,۰	۳۰	۰,۰۵۳	۰,۰۶۴	۲۰
۷	۵۰	۳,۵	۳۰	۰,۰۳۷	۰,۰۴۵	۲۱
۸	۰	۳,۵	۳۵	۰,۰۱۹	۰,۰۲۳	۲۱
۹	۱۰۰	۳,۵	۳۵	۰,۰۵۴	۰,۰۶۵	۲۰
۱۰	۰	۱,۰	۳۰	۰,۰۰۹	۰,۰۱۱	۲۲
۱۱	۰	۳,۵	۲۵	۰,۰۱۳	۰,۰۱۵	۱۶
۱۲	۵۰	۶,۰	۲۵	۰,۰۳۸	۰,۰۴۵	۱۸
۱۳	۱۰۰	۱,۰	۳۰	۰,۰۳۷	۰,۰۴۶	۲۱
۱۴	۰	۶,۰	۳۰	۰,۰۲۶	۰,۰۳۱	۱۹
۱۵	۵۰	۳,۵	۳۰	۰,۰۳۹	۰,۰۴۶	۲۱

برای بررسی تکرارپذیری نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، آزمایش‌های ۳، ۷ و ۱۵ با متغیرهای ورودی یکسان ( $T=30^{\circ}\text{C}$  و  $I=3.5\text{A}$ ,  $P=50\text{W}$ ) انجام شده‌اند، نتایج به دست آمده برای نرخ پلیسه‌گیری فتر حلقه در مورد مایع رسانا NaCl برای آزمایش‌ها ۳، ۷ و ۱۵ بترتیب برابر ۰،۰۳۸، ۰،۰۳۷ و ۰،۰۳۹ گرم بر دقیقه به دست آمد. در مورد مایع رسانا  $\text{NaNO}_3$  این مقادیر بترتیب ۰،۰۴۵، ۰،۰۴۵ و ۰،۰۴۶ گرم در دقیقه برابر شدند. مقادیر به دست آمده در تمامی موارد نشان دهنده تکرارپذیری زیاد نتایج است.

به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر نوع مایع رسانا متغیر  $R_{MRR}$  تعریف شده است. از جدول ۴ مشاهده می‌شود به ازای شرایط یکسان آزمایش مقادیر به دست آمده نرخ پلیسه‌گیری برای حالتی که از مایع رسانا  $\text{NaNO}_3$  استفاده شده است بیشتر از حالتی است که از NaCl به عنوان مایع رسانا استفاده گردید. میانگین افزایش نرخ پلیسه‌گیری برای مایع رسانا  $\text{NaNO}_3$  نسبت به مایع رسانا NaCl برای فتر حلقه برابر ۱۹،۶ درصد است. دلیل برتری مایع رسانا  $\text{NaNO}_3$ ، تهاجمی‌تر بودن، ریزتر بودن کریستال‌های آن و بالاتر بودن ظرفیت یونی آن نسبت به مایع رسانا NaCl است [۱۶]. به همین دلایل رسانندگی بهتری دارد که منجر به بیشتر شدن نرخ پلیسه‌گیری آن نسبت به NaCl شده است. البته شایان ذکر است که  $\text{NaNO}_3$  از لحاظ قیمتی به طور متوسط ۶ برابر قیمت NaCl است.

به منظور بررسی تأثیر متغیرهای فرایند بر نرخ پلیسه‌گیری نمونه‌ها و تعیین اهمیت نسبی متغیرها، از تحلیل پراکندگی بهره گرفته شد. جداول ۵ و ۶ تحلیل پراکندگی متغیرهای مؤثر بر نرخ پلیسه‌گیری را نشان می‌دهند. در این تحلیل، تعیین سطوح معنادار نیز با استفاده از مقدار P-Value انجام شده است. از آنجایی که متغیرها با سطح اطمینان ۹۵٪ مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از ۰،۰۵ برای P، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در این جداول مشاهده می‌شود، مقدار P-Value برای جملات P، I و T کوچکتر از سطح معنادار ۰،۰۵ است که نشان می‌دهد این پیش‌بینی‌کننده‌ها، تأثیر قابل توجهی بر جواب داشته‌اند. می‌توان مشاهده کرد تعامل دوتایی متغیرها بر نرخ پلیسه‌گیری چندان تأثیرگذار نیستند.

دلیل اثرگذاری توان فراصوت این است که اعمال فراصوت به محلول مایع رسانا باعث می‌شود که همگن شدن مایع رسانا می‌گردد که از ته نشینی سدیم جلوگیری می‌کند که باعث ثابت ماندن رسانایی مایع رسانا می‌گردد، به عبارت دیگر از افت رسانایی مایع رسانا جلوگیری می‌نماید. دلیل دیگر انفجار حباب‌های اکسیژن در نزدیکی پلیسه است. علت اثرگذاری شدت جریان برق این است که جریان باعث حرکت یون‌ها در محلول مایع رسانا می‌گردد. هر چه شدت جریان برق شدیدتر باشد، جابجایی یون‌ها بیشتر می‌شود. همچنین علت اثرگذاری دما این است که افزایش دمای محلول باعث کاهش گرانش و افزایش تحرک یون‌های موجود در محلول می‌شود؛ افزایش دما همچنین ممکن است باعث افزایش تعداد یون‌های محلول به دلیل تفکیک مولکول‌ها شود. در نتیجه رسانایی محلول افزایش می‌یابد [۱۶]. افزایش رسانایی تأثیر مستقیم بر افزایش مقدار نرخ پلیسه‌گیری دارد.

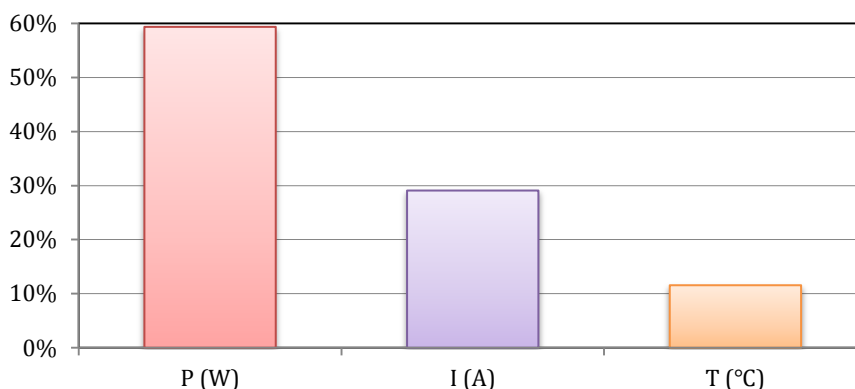
جدول ۵ تحلیل پراکندگی برای متغیر نرخ پلیسه‌گیری برای فتر حلقه روغن با مایع رسانا NaCl

عبارت	ضرایب	مقدار-P	مقدار-F
ثابت	۰،۰۳۸۰۰	۰،۰۰۰	۵۳،۴۹
P	۰،۰۱۵۵۰	۰،۰۰۰	۳۵۵،۹۳
I	۰،۰۰۸۰۰	۰،۰۰۰	۹۴،۸۱
T	۰،۰۰۳۲۵	۰،۰۱۱	۱۵،۶۵
$P^2$	-۰،۰۰۳۶	۰،۰۳۰	۸،۹۹
$I^2$	-۰،۰۰۳۱۳	۰،۰۴۹	۶،۶۸
$T^2$	-۰،۰۰۱۱۲	۰،۳۹۵	۰،۸۷
$P*I$	-۰،۰۰۰۲۵	۰،۸۳۸	۰،۰۵
$P*T$	۰،۰۰۰۲۵	۰،۸۳۸	۰،۰۵
$I*T$	۰،۰۰۰۲۵	۰،۸۳۸	۰،۰۵

توان فراصوت به طور میانگین ۵۹,۳۶ درصد بالاترین مقدار اثرگذاری را داشته است؛ پس از آن شدت جریان برق به طور میانگین با ۲۹,۰۸ درصد و دمای مایع رسانا به طور میانگین با ۱۱,۵۶ درصد بترتیب مؤثر بوده‌اند (شکل ۹).

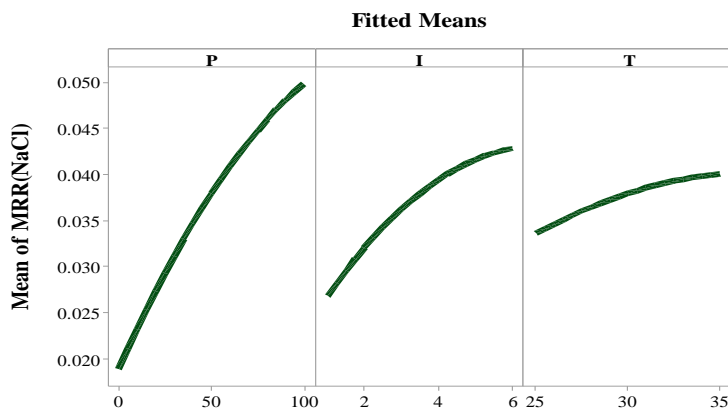
جدول ۶ تحلیل پراکندگی برای متغیر نرخ پلیسه‌گیری برای فتر حلقه روغن با مایع رسانا  $\text{NaNO}_3$

عبارت	ضرایب	مقدار-P	مقدار-F
ثابت	۰,۰۴۵۳۳	۰,۰۰۰	۷۲,۹۵
P	۰,۰۱۸۸۷۵	۰,۰۰۰	۴۹۲,۸۲
I	۰,۰۰۹۳۷۵	۰,۰۰۰	۱۲۱,۵۸
T	۰,۰۰۴۲۵۰	۰,۰۰۴	۲۴,۹۹
$P^2$	-۰,۰۰۳۹۲	۰,۰۲۶	۹,۷۹
$I^2$	-۰,۰۰۳۴۲	۰,۰۴۱	۷,۴۵
$T^2$	-۰,۰۰۱۶۷	۰,۲۴۰	۱,۷۷
$P*I$	-۰,۰۰۰۵۰	۰,۶۹۵	۰,۱۷
$P*T$	۰,۰۰۰۲۵	۰,۸۴۴	۰,۰۴
$I*T$	۰,۰۰۰۲۵	۰,۸۴۴	۰,۰۴

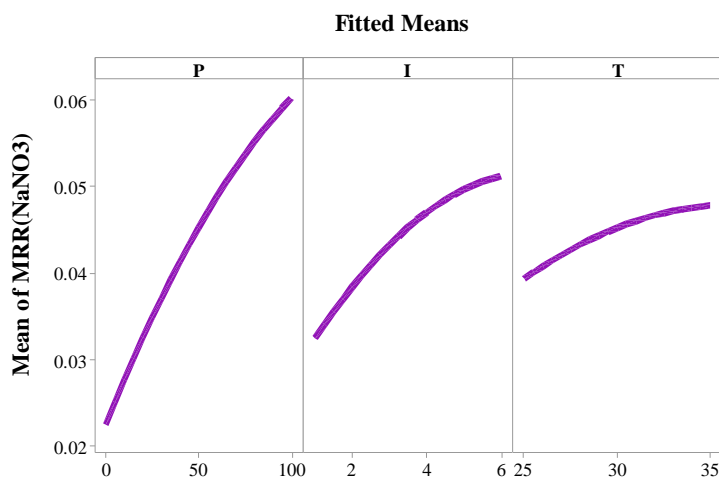


شکل ۹ اثرگذاری متغیرهای مختلف بر نرخ پلیسه‌گیری

برای تعیین مؤثرترین متغیر بر نرخ پلیسه‌گیری، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب نرخ پلیسه‌گیری، ترسیم شد. همانطور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، برای هر دو نوع مایع رسانا و هر دو قطعه کار مورد آزمون، توان فراصوت، شدت جریان برق و دمای مایع رسانا بر نرخ پلیسه‌گیری تأثیر مثبت داشته‌اند.



شکل ۱۰ تأثیر اصلی متغیرها بر نرخ پلیسه‌گیری برای فتر حلقه روغن با مایع رسانا NaCl



شکل ۱۱ نمودار تأثیرات اصلی متغیرها بر نرخ پلیسه‌گیری برای فتر حلقه روغن با مایع رسانا NaNO<sub>3</sub>

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی مقایسه‌ای تأثیر ارتعاشات فراصوت در فرایند پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی بررسی شده است. همانطور که در این پژوهش نشان داده شد، اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایند پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی متغیر خروجی نرخ پلیسه‌گیری را تحت تأثیر قرار داده و باعث افزایش قابل توجه آن می‌شود.

در این راستا دستگاهی طراحی و ساخته شد و با توجه به پیچیدگی‌های عملیات پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی فراصوت، مطالعه تجربی نظام‌مند فرایند به کمک روش پاسخ سطح صورت گرفت و از طرح باکس-بنکن<sup>۱</sup> برای طراحی آزمایش‌های تجربی و بهینه‌سازی برای حصول اهداف مسئله استفاده شد. مهم‌ترین نتایج بدست آمده از این پژوهش عبارتند از:

- نرخ پلیسه‌گیری متناسب با افزایش مقدار توان فراصوت، افزایش شدت جریان برق و نیز افزایش دمای مایع رسانا استفاده شده افزایش می‌یابد.
- طی تحلیل آماری انجام شده توسط نرم‌افزار مینی‌تب با سطح اطمینان ۹۵٪، نتایج نشان داد که توان فراصوت بیشترین تأثیر را در نرخ پلیسه‌گیری از نمونه‌ها داشته است. بعد از آن شدت جریان برق و دمای مایع رسانا استفاده شده عوامل مؤثر بر متغیر خروجی نرخ پلیسه‌گیری هستند.
- شاخص نوع مایع رسانا نیز به طور واضحی بر روی پاسخ تأثیر دارد. با تغییر مایع رسانا از NaCl به NaNO<sub>3</sub> افزایش اندازه نرخ پلیسه‌گیری مشاهده می‌شود. میانگین افزایش نرخ پلیسه‌گیری برای مایع رسانا NaNO<sub>3</sub> نسبت به مایع رسانا NaCl برای فتر حلقه برابر ۱۹٫۶٪ است.
- توان فراصوت به طور میانگین ۵۹٫۳۶ درصد بالاترین مقدار اثرگذاری را داشته است؛ پس از آن شدت جریان برق به طور میانگین با ۲۹٫۰۸ درصد و دمای مایع رسانا به طور میانگین با ۱۱٫۵۶ درصد بترتیب مؤثر بوده‌اند.

تمامی این نتایج ذکر شده حاکی از این است که روش معرفی شده در این مقاله می‌تواند در صنعت ساخت حلقه اثرات مثبتی ایجاد کند.

<sup>1</sup> Box-Behnken

## تشکر و قدردانی

از شرکت رینگ خودرو پارس بابت حمایت‌های مالی و تامین قطعات مورد نیاز این مقاله تشکر و قدردانی می‌نمایم. از شرکت فن‌آفرینان علم گستر بخاطر حمایت‌های مادی و معنوی بی‌دریغ تشکر می‌نمایم.

## فهرست علائم

<i>ECD</i>	پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی
<i>gr/min (MRR)</i>	نرخ پلیسه‌گیری
<i>P(W)</i>	توان فراصوت
<i>I(A)</i>	شدت جریان برق
<i>T(°C)</i>	دمای مایع رسانا
<i>R<sub>MRR</sub> (%)</i>	درصد اثرگذاری نوع مایع رسانا
<i>MRR (NaCl)</i>	نرخ پلیسه‌گیری با مایع رسانا <i>NaCl</i>
<i>MRR (NaNO<sub>3</sub>)</i>	نرخ پلیسه‌گیری با مایع رسانا <i>NaNO<sub>3</sub></i>
<i>RP<sub>MRR</sub> (%)</i>	درصد اثرگذاری توان فراصوت

## References

- [1] Almansoori AQ, Hajjalimohammadi A, Mirsalim SA, Mehrabivaghar M. An experimental and analytical investigation of the evaporation characteristics of engine oil film. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023 Nov;148(21):12037-48. doi: 10.1007/s10973-023-12474-w
- [2] Almansoori AQ, Hajjalimohammadi A, Agha Mirsalim SM, Mehrabivaghar M. Multi-objective optimization and sensitivity analysis of the parameters affecting sealing performance of the piston rings face through the validated model for the four-stroke bi-fuel engine. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2022 Jun 26;15(5):1345-60. doi: 10.47176/jafm.15.05.1073
- [3] Hajjalimohammadi A, Honnery D, Abdullah A, Mirsalim SM. Sensitivity analysis of parameters affecting image processing of high pressure gaseous jet images. *Engine Research*. 2022 Nov 27;33(33):43-52.
- [4] Almansoori AQ, Hajjalimohammadi A, Agha Mirsalim SM, Alizadehnia S. A novel experimental test rig for simulating of the fuel injection system components behavior under cold conditions. *The Journal of Engine Research*. 2017 Jul 10;47(47):31-8.
- [5] Mahmoudzadeh Andwari A, Pesyridis A, Esfahanian V, Salavati-Zadeh A, Hajjalimohammadi A. Modelling and evaluation of waste heat recovery systems in the case of a heavy-duty diesel engine. *Energies*. 2019 Apr 11;12(7):1397. doi: 10.3390/en12071397
- [6] Gillespie LK. *Deburring and edge finishing handbook*. Society of Manufacturing Engineers; 1999: 1.
- [7] Balasubramaniam R, Krishnan J, Ramakrishnan N. Investigation of AJM for deburring. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998 Jul 1;79(1-3):52-8. doi: 10.1016/S0924-0136(97)00305-1
- [8] Aurich JC, Dornfeld D, Arrazola PJ, Franke V, Leitz L, Min S. Burrs—Analysis, control and removal. *CIRP annals*. 2009 Jan 1;58(2):519-42. doi: 10.1016/j.cirp.2009.09.004
- [9] Gillespie LK. Deburring precision miniature parts. *Precision Engineering*. 1979 Oct 1;1(4):189-98. doi: 10.1016/0141-6359(79)90099-0
- [10] Gillespie LK, *Design for Advanced Manufacturing: Technologies and Processes, Electrochemical Micro Deburring, Chapter* (McGraw-Hill Professional), 2017 Access Engineering.
- [11] Hakim ME, Mahdy MA, Sayed MA. The effect of some electrode design factors on electrochemical deburring (ECD). *International Journal of Materials and Product Technology*. 1989 Jan 1;4(3):259-72. doi: 10.1504/IJMPT.1989.036736
- [12] Choi IH, Kim JD. A study of the characteristics of the electrochemical deburring of a governor-shaft cross hole. *Journal of materials processing technology*. 1998 Mar 1;75(1-3):198-203. doi: 10.1016/S0924-0136(97)00365-8

- [13] Shrestha AK, Basnet N, Bohora CK, Khadka P. Variation of electrical conductivity of the different sources of water with temperature and concentration of electrolyte solution NaCl. *International Journal of Recent Research and Review*. 2017 Sep;10(3):24-6.
- [14] KianiMajd, M., Hajjalimohammadi, A., Raiat Roknabadi, A., Golbaz, S. Experimental study of the effect of ultrasonic waves on the parameters of the electrochemical deburring process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023;10(2):1-6. doi: 10.22034/IJME.2023.417555.1836 [In Persian]
- [15] Ahmed Ali MK, Xianjun H, Fiifi Turkson R, Ezzat M. An analytical study of tribological parameters between piston ring and cylinder liner in internal combustion engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. 2016 Dec;230(4):329-49. doi: 10.1177/1464419315605922
- [16] Kadam SP, Mitra S. Electrochemical deburring-A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;46:141-8. doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.059