

Evaluation of Surface Integrity of AISI 304 in Electrochemical Grinding through Simultaneous Analysis of Surface Roughness and Porosity

Armin Rezaei¹, Amir Rasti^{1*}, Mohammad Yazdani¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT

The electrochemical grinding (ECG) process, as a hybrid technique combining mechanical abrasion and anodic dissolution, offers an efficient approach for improving surface quality and minimizing thermal damage in hard-to-machine steels, particularly AISI 304 stainless steel. However, the surface roughness and porosity in this process are strongly affected by operating conditions, exhibiting inherently nonlinear behavior. In this study, a dedicated experimental setup was designed and developed to investigate the effects of three key parameters: electrolyte concentration (20–180 g/L), applied voltage (5–25 V), and wheel rotational speed (500–2500 rpm). Surface roughness was measured using a laser profilometer, while porosity was quantified through image analysis in ImageJ software. Results indicated that increasing electrolyte concentration gradually reduced surface roughness from approximately 15 to 4 μm , while porosity increased from 1.2% to over 5%. Moreover, voltage variation exhibited a nonlinear trend, and an optimal balance between roughness and porosity was achieved within the range of 10–15 V. Higher voltages led to excessive corrosion and loss of surface uniformity. Increasing wheel speed up to around 1500 rpm also resulted in a moderate improvement in surface finish. Overall, the combination of 180 g/L electrolyte concentration and 15 V applied voltage was identified as the optimal condition for producing a smooth surface with controlled porosity.

KEYWORDS

Electrochemical grinding (ECG), AISI 304 stainless steel, surface roughness, surface porosity

* Corresponding Author. Email: a.rasti@modares.ac.ir

1. Introduction

AISI 304 austenitic stainless steel is widely used in biomedical, chemical, food, and energy industries because of its corrosion resistance, toughness, formability, and manufacturability. Nevertheless, its service performance is strongly influenced by surface integrity, including roughness, residual stresses, contamination, and localized defects, which affect wear, fatigue, coating adhesion, and pitting corrosion [1,2]. Conventional grinding can improve dimensional accuracy, but high contact stresses and localized heating may generate burns, tensile residual stresses, microcracks, and microstructural damage. Electrochemical grinding (ECG) reduces these limitations by combining anodic dissolution with limited mechanical abrasion; the workpiece acts as the anode, while the conductive grinding wheel serves as the cathode. Process variables such as electrolyte conditions, voltage, current density, and wheel motion significantly control material removal and surface quality [3,4]. Since conventional Ra measurements cannot fully describe three-dimensional surface topography, the areal parameter Sa and surface porosity should be evaluated together for a more reliable assessment of surface integrity [5]. Accordingly, the objective of the present study was to evaluate the effects of electrolyte concentration, applied voltage, and grinding-wheel rotational speed on both Sa and surface porosity during ECG of AISI 304 stainless steel. The principal contribution of the study is the concurrent evaluation of these two complementary indicators and the interpretation of their changes in terms of the balance between anodic dissolution and mechanical abrasion.

2. Methodology

A laboratory-scale electrochemical grinding system was designed and fabricated, comprising a conductive grinding wheel, adjustable DC power supply, electrolyte circulation unit, drive mechanism, and electrically insulated workpiece fixture (Figure 1). A 120-mm-diameter cup-shaped Tyrolit wheel containing 125-grit aluminium oxide abrasives and a conductive metal bond was used. Approximately 90% of the wheel structure was conductive material and 10% abrasive particles, enabling simultaneous anodic dissolution and limited mechanical removal of the passive film. The AISI 304 workpiece served as the anode, while the grinding wheel acted as the cathode. NaCl electrolyte was supplied to the contact zone at 5 L/min through a 5-mm nozzle.

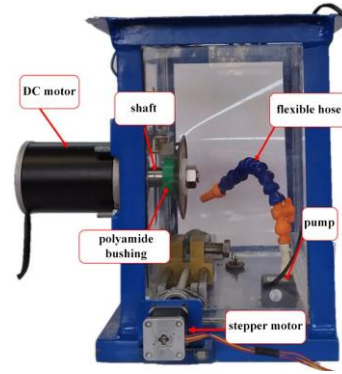


Figure 1. Main components of the electrochemical grinding apparatus used in the experimental investigation

Rectangular specimens measuring $6 \times 6 \times 60$ mm were polished to 800 grit, ultrasonically cleaned in ethanol, rinsed, and dried. Electrolyte concentration, voltage, and wheel speed were investigated at five levels (Table 1), while feed rate, temperature, depth of cut, and contact length were fixed at 10 mm/min, 25 °C, 0.1 mm, and 6 mm, respectively.

Table 1. Main electrochemical grinding parameters and their experimental levels

Process Parameter	experimental levels				
	-2	-1	0	+1	+2
Electrolyte Voltage (V)	5	10	15	20	25
Motor Speed (rpm)	500	1000	1500	2000	2500
Electrolyte Concentration (g/L)	20	60	100	140	180

3. Results and Discussion

The experimental results showed that the surface integrity of AISI 304 stainless steel during electrochemical grinding was governed by the combined effects of electrolyte concentration, applied voltage, and grinding-wheel speed. The analysis of variance indicated that electrolyte concentration was the dominant linear factor affecting the three-dimensional surface roughness, Sa, with a contribution of 58.21%. The corresponding contributions of voltage and rotational speed were 9.40% and 2.00%, respectively. The fitted response-surface model exhibited a high coefficient of determination ($R^2 = 99.72\%$), confirming its suitability for describing the experimental data.

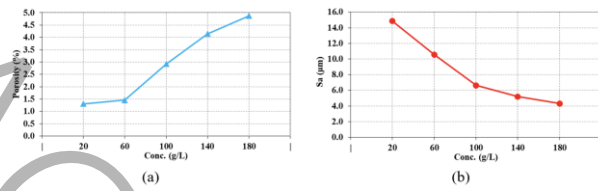


Figure 2. Effects of electrolyte concentration on (a) surface roughness (Sa) and (b) porosity of AISI 304 steel..

As shown in Figure 2(a,b), increasing the NaCl concentration from 20 to 180 g/L reduced Sa from 14.84 μm to 4.31 μm . This improvement was attributed to increased electrolyte conductivity and more uniform anodic dissolution, which enhanced the removal of surface asperities. However, the surface porosity increased from 1.304% to 4.875% over the same concentration range. Therefore, higher electrolyte concentration improved surface smoothness but simultaneously promoted localized dissolution and pore formation.

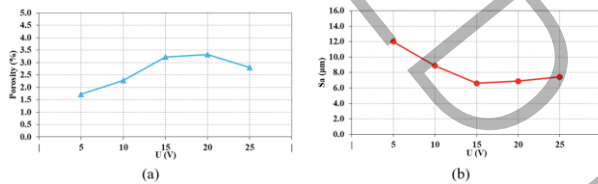


Figure 3. Effects of voltage on (a) surface roughness (Sa) and (b) porosity of AISI 304 steel.

Applied voltage produced a nonlinear effect, as illustrated in Figure 3(a,b). At 5 V, Sa was 12.00 μm , whereas increasing the voltage to 15 V considerably improved the surface finish. At the central condition of 100 g/L electrolyte concentration and 1500 rpm, repeated tests at 15 V produced Sa values between 4.96 and 5.42 μm . Increasing the voltage to 25 V raised Sa to 7.43 μm , indicating that excessive anodic dissolution and local over-etching reduced surface uniformity. Porosity generally increased at intermediate voltage levels but decreased at 25 V, where a value of 1.459% was recorded.

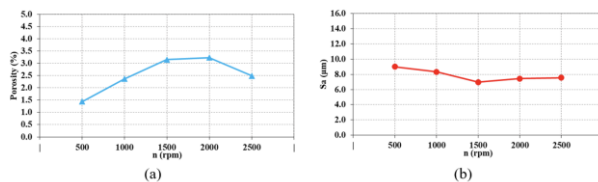


Figure 4. Effects of grinding-wheel rotational speed on (a) surface roughness (Sa) and (b) porosity of AISI 304 steel.

Wheel speed had a smaller direct effect than concentration and voltage. According to Figure 4(a,b), increasing speed from 500 rpm to the intermediate range

improved electrolyte renewal and reduced Sa. At 500 rpm, Sa was 9.00 μm , while at 2500 rpm it was 6.80 μm . Surface porosity was lower at the minimum speed (1.443%) and increased at intermediate speeds, where the interaction between passive-film removal and anodic dissolution was more effective. At higher speeds, centrifugal forces limited electrolyte penetration into the contact zone and reduced further improvement.

4. Conclusions

Electrolyte concentration, applied voltage, and grinding-wheel speed significantly influenced the surface integrity of AISI 304 stainless steel during electrochemical grinding. Electrolyte concentration was the dominant factor affecting Sa. Increasing NaCl concentration from 20 to 180 g/L reduced Sa from approximately 15 to 4 μm , while increasing surface porosity from about 1.3% to nearly 5%. Intermediate voltages improved surface smoothness, whereas higher voltages caused localized over-etching and reduced uniformity. Increasing wheel speed up to 1500 rpm enhanced electrolyte renewal and surface finish, but higher speeds restricted electrolyte penetration. The most favorable condition was 180 g/L NaCl, 15 V, and 1500 rpm. These findings confirm that simultaneous evaluation of Sa and porosity provides a more reliable assessment of ECG-induced surface integrity than roughness alone.

5. References

- [1] R. Kumar, A.K. Das, A comprehensive review of AISI 304 steel based on different thick coating process, *Materials Today: Proceedings*, 98 (2024) 180-186.
- [2] E. Messinese, L. Casanova, L. Paterlini, F. Capelli, F. Bolzoni, M. Ormellese, A. Brenna, A Comprehensive Investigation on the Effects of Surface Finishing on the Resistance of Stainless Steel to Localized Corrosion, *Metals*, 12(10) (2022) 1751.
- [3] F. Wang, Y. He, X. Wu, M. Kang, Flow field characteristics and experimental research on inner-jet electrochemical face grinding of SUS420J2 stainless steel, *Scientific Reports*, 12(1) (2022) 11789.
- [4] M. Yazdani, A. Rasti, Assessment on surface integrity in electrochemical grinding of AISI 304, *Heliyon*, 11(1) (2025) 1-14.
- [5] F.W. DelRio, R.M. Khan, M.J. Heiden, P.G. Kotula, P.A. Renner, E.K. Karasz, M.A. Melia, Porosity, roughness, and passive film morphology influence the corrosion behavior of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion, *Journal of Manufacturing Processes*, 102 (2023) 654-662.

بررسی یکپارچگی سطح فولاد زنگ‌نزن AISI 304 در سنگ‌زنی الکتروشیمیایی با تحلیل

هم‌زمان زبری سطح و درصد تخلخل

آرمین رضائی^۱، امیر راستی^{۱*}، محمد یزدانی^۱

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

سنگ‌زنی الکتروشیمیایی با ترکیب سایش مکانیکی و انحلال آندی، روشی برای بهبود کیفیت سطح و کاهش آسیب‌های حرارتی در فولادهای سخت‌برش مانند فولاد زنگ‌نزن AISI 304 است. در این پژوهش، اثر غلظت الکترولیت ۲۰ تا ۱۸۰ گرم بر لیتر، ولتاژ ۵ تا ۲۵ ولت و سرعت چرخش سنگ ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ دور بر دقیقه بر زبری و تخلخل سطح بررسی شد. یک سامانه آزمایشگاهی ساخته شد و زبری با پروفیلومتر لیزری و درصد تخلخل با ImageJ اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد افزایش غلظت الکترولیت، زبری را از حدود ۱۵ به نزدیک ۴ میکرومتر کاهش داد، در حالی که تخلخل از ۱/۲ به بیش از ۵ درصد افزایش یافت. اثر ولتاژ غیرخطی بود و در بازه ۱۰ تا ۱۵ ولت، مطلوب‌ترین تعادل میان صافی و تخلخل حاصل شد؛ اما در ولتاژهای بالاتر، خوردگی بیش از حد موجب کاهش یکنواختی سطح گردید. افزایش سرعت چرخش تا حدود ۱۵۰۰ دور بر دقیقه صافی سطح را بهبود داد، در حالی که در سرعت‌های بالاتر، غلبه اثرات مکانیکی و محدود شدن عملکرد الکترولیت در ناحیه تماس، کارایی فرآیند را کاهش داد. در مجموع، غلظت ۱۸۰ گرم بر لیتر و ولتاژ ۱۵ ولت، شرایط دستیابی به سطح صاف با تخلخل کنترل‌شده فراهم کرد. نتایج، ضرورت ارزیابی هم‌زمان زبری و تخلخل را برای بهینه‌سازی یکپارچگی سطح نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: سنگ‌زنی الکتروشیمیایی، فولاد زنگ‌نزن AISI 304، یکپارچگی سطح، زبری سطح، تخلخل سطح.

فولاد زنگ‌نزن آستینیتی AISI 304 به دلیل ساختار آستینیتی پایدار و لایه غیرفعال غنی از کروم، ترکیبی مطلوب از چقرمگی، شکل‌پذیری و مقاومت به خوردگی ارائه می‌دهد و به همین دلیل در حوزه‌های پزشکی، شیمی و انرژی کاربرد گسترده دارد. دوام و اطمینان عملکرد این آلیاژ به‌طور مستقیم تحت تأثیر کیفیت سطح، شامل زبری، تنش‌های پسماند و آلودگی‌های سطحی است که می‌تواند محل‌های آغاز خوردگی موضعی و ترک ناشی از تنش را کنترل یا تشدید کند. تغییرات ریزساختاری مانند اندازه دانه و توزیع فازها، همراه با ویژگی‌های سطح‌پردازی، آستانه آغاز خوردگی و ترک‌زایی در محیط‌های کلریدی را به‌طور معناداری کاهش می‌دهد [۱، ۲]. از میان عوامل مختلف تعیین‌کننده کیفیت سطح، صافی و ریزتوپوگرافی^۱ بیشترین تأثیر را بر آغاز و گسترش خوردگی موضعی و رفتار مکانیکی دارند، صافی سطح به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی یکپارچگی سطح، نقشی تعیین‌کننده در رفتار تریبولوژیکی، آغاز و گسترش خوردگی موضعی و استحکام چسبندگی پوشش‌ها دارد. تغییرات ریزتوپوگرافی در فولادهای زنگ‌نزن می‌تواند مقاومت به خوردگی را به‌طور معناداری تغییر دهد. از این‌رو انتخاب و پایش شاخص‌های زبری مانند Ra ، Rq ، Rz و همچنین پارامترهای آماری پروفیل سطح، همراه با کنترل فرآیندهای پرداخت و روش‌های سنجش، برای تضمین دوام و قابلیت اطمینان قطعه در شرایط سرویس ضروری است [۳، ۴]. با وجود این، دستیابی به سطوح با کیفیت بالا در عمل همواره چالش‌برانگیز است، چراکه فرآیندهای پرداخت مرسوم مانند سنگ‌زنی می‌توانند خود به‌عنوان منبع آسیب‌های سطحی عمل کنند، سنگ‌زنی به‌عنوان روش متداول پرداخت نهایی، اگرچه دستیابی به دقت ابعادی و زبری پایین را ممکن می‌سازد، اما به‌واسطه‌ی میدان‌های حرارتی و بارهای مکانیکی تماس، می‌تواند تنش‌های پسماند کششی، سوختگی، میکروترک و دگرگونی‌های نامطلوب ریزساختاری ایجاد کند. این پیامدها با تضعیف یکپارچگی سطح، افزایش زبری مؤثر و کاهش آستانه ترک، نهایتاً کیفیت سطح، دوام خستگی و مقاومت به خوردگی را کاهش می‌دهند. شواهد نشان می‌دهد که انتخاب نامناسب چرخ ساینده، پارامترهای باربرداری و شرایط خنک‌کاری، ریسک آسیب‌های سطحی را به‌طور معناداری افزایش داده و با تغییر ریزساختار و توزیع تنش‌های پسماند، بروز عیوب مرتبط با سنگ‌زنی را تسهیل می‌کند [۵، ۶]. این چالش‌ها سبب شده‌اند که توسعه و به‌کارگیری روش‌های جایگزین با هدف کاهش آسیب‌های حرارتی و مکانیکی به‌عنوان یک ضرورت مطرح شود.

در همین راستا، سنگ‌زنی الکتروشیمیایی^۲ به‌عنوان یک فرآیند هیبریدی معرفی شده است که با ترکیب انحلال آندی کنترل‌شده و تماس سایشی محدود، محدودیت‌های سنگ‌زنی متداول را تا حد زیادی برطرف می‌کند و سطحی هموارتر در آلیاژهای سخت‌برش فراهم می‌آورد. شواهد آزمایشگاهی اخیر نشان می‌دهد که تنظیم ولتاژ و چگالی جریان، مدیریت ویژگی‌های الکترولیت و کنترل دینامیک تماس، امکان بهبود کیفیت سطح، کاهش زبری و مهار آثار حرارتی ناخواسته را فراهم می‌سازد [۷، ۸]. بیشتر مطالعات سنگ‌زنی الکتروشیمیایی زبری را با شاخص‌های خطی نظیر Ra گزارش کرده‌اند و وابستگی آن به پارامترهایی چون ولتاژ، سرعت و الکترولیت را بررسی نموده‌اند؛ اما این سنجه‌های یک‌بعدی قادر به بازنمایی کامل هندسه و ناهمسانگردی سطح نیستند. در مقابل، شاخص Sa مطابق استاندارد ISO 25178-2، توصیف جامع‌تری از توپوگرافی فراهم کرده و برای تحلیل تماس، رفتار تریبولوژیکی و آغاز خوردگی مناسب‌تر ارزیابی می‌شود [۷، ۹]. تخلخل سطح به‌عنوان ناپیوستگی‌های هندسی، با ایجاد تمرکز تنش، تسهیل به‌دام‌افتادن الکترولیت و کاهش چسبندگی پوشش، آغازگر خوردگی

^۱ Micro-Topography

^۲ ECG

حفره‌ای محسوب می‌شوند. افزایش میزان و پیوستگی منافذ، سطح مؤثر تماس با محیط خورنده را گسترش داده و مقاومت به خوردگی را کاهش می‌دهد. معمولاً ارزیابی کمی این ویژگی با روش‌های آنالیز تصویر، مانند نرم‌افزار ImageJ، از طریق محاسبه درصد ناحیه حفرات نسبت به کل سطح انجام می‌گیرد [۱۰-۱۲]. در ادامه، در راستای تبیین بستر علمی پژوهش حاضر، برجسته‌ترین و مرتبط‌ترین مطالعات پیشین به صورت خلاصه مرور شده‌اند تا چارچوب نظری و جایگاه تحقیق حاضر به طور دقیق مشخص شود.

برای ارتقای راهبردهای پارامتری در سنگ‌زنی الکتروشیمیایی، یانگ و همکاران فرایند ECG پیوسته را با ولتاژ پالسی بهینه و الکترولیت NaNO_3 معرفی کردند و نشان دادند که در مقایسه با سنگ‌زنی مکانیکی، زمان فرایند $63/3\%$ و تنش پسماند فشاری سطح $90/5\%$ کاهش می‌یابد؛ افزون بر این، با انتخاب چرخه وظیفه مناسب به زبری سطح $Ra \approx 0.824 \mu\text{m}$ و نرخ برداشت $8.46 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$ دست یافتند، بی‌آنکه دچار خوردگی ناشی از جریان سرگردان^۱ شوند. این نتایج منطق تنظیم دینامیک تماس و پلاریزاسیون را برای دستیابی هم‌زمان به صافی و کارایی تبیین می‌کند [۸]. چاوداری و همکاران در پرداخت سایشی مغناطیسی الکتروشیمیایی برای SS304 نشان دادند که انتخاب صحیح چگالی جریان، زمان پالسی و میدان مغناطیسی، منجر به افت معنادار Ra و هموارشدن قله-دره‌های بحرانی می‌شود؛ این تغییرات توپوگرافی بهبود پتانسیل شکست لایه پسیو و کاهش احتمال آغاز حفره را دنبال می‌کند [۱۳].

تان و همکاران [۱۴] نشان دادند که نسبت “عمق به عرض” شیارهای ماشین‌کاری شده، شاخص دقیق‌تری نسبت به پارامتر زبری (Ra) برای پیش‌بینی رفتار حفره‌زنی است. طبق گزارش آن‌ها، با افزایش این نسبت، مقادیر دمای بحرانی آغاز حفره‌زایی و پتانسیل آغاز حفره‌زایی^۲ به صورت خطی کاهش می‌یابد. این یافته، بر ضرورت ارزیابی سه‌بعدی و توپوگرافی سطح به منظور درک دقیق‌تر پایداری لایه پسیو تأکید دارد. هو و همکاران در مطالعه‌ای بر فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ نشان دادند که به‌کارگیری روش سنگ‌زنی با پیش‌تنیدگی^۳ و اعمال پیش‌تنیدگی بهینه در محدوده ۹۰-۱۱۰ MPa موجب کاهش تنش‌های پسماند کششی، کنترل سهم مارتنزیت کرنش‌زا و در نتیجه ارتقای مقاومت به ترک‌خوردگی تنشی در محیط MgCl_2 جوشان می‌شود. این نتایج بر اهمیت راهبردی کنترل هم‌زمان تنش و تحولات فازی در کاهش حساسیت کلردی تأکید دارند [۱۵]. در چارچوب رویکردهای سبزِ پسا‌فرایندی، مطالعه‌ای بر فولاد زنگ‌نزن AISI 304 نشان داد که استفاده از سامانه الکترولیت پولیشینگ دوستدار محیط‌زیست $\text{EG}-\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ با مهار تولید پسماندهای اسیدی و کنترل دقیق ولتاژ-جریان، منجر به کاهش زبری سطح و تقویت پایداری لایه پسیو می‌شود؛ از این رو می‌تواند به‌عنوان جایگزینی کم‌خطر برای اسیدهای متداول توصیه گردد [۱۶].

در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای به بهبود کیفیت سطح و ارتقای یکپارچگی فولادهای زنگ‌نزن در فرآیندهای الکتروشیمیایی معطوف شده است و پژوهش‌های جدید مسیرهای نوینی برای کنترل زبری و تخلخل معرفی کرده‌اند. قرزی و همکاران [۱۷] روش جدیدی به نام پلاسما الکترولیت جت پولیشینگ ارائه کردند که نسبت به روش‌های مرسوم الکترود پولیشینگ و پلاسما الکترود پولیشینگ بازده انرژی بالاتری داشت و توانست سطح فولادهای آستنیتی را با کارایی بیشتر اصلاح نماید. این یافته‌ها نشان می‌دهند که توسعه فناوری‌های نوین در حوزه پلاسما الکترولیتی می‌تواند به‌طور مستقیم کیفیت سطح و کارایی انرژی را بهبود دهد و زمینه مناسبی برای کاربردهای صنعتی ایجاد کند. پراباگران

^۱ Stray Current Corrosion

^۲ Epit

^۳ Pre-stress Grinding

و همکاران [۱۸] در پژوهشی پیرامون میکرو ماشین کاری الکتروشیمیایی بر روی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ تأثیر ولتاژ، غلظت الکترولیت و زمان ماشین کاری را بر نرخ برداشت ماده و کیفیت سطح بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که تنظیم دقیق این متغیرها نه تنها سرعت برداشت ماده را تحت تأثیر قرار می‌دهد بلکه بر الگوی سطحی ایجادشده و توزیع تخلخل نیز اثرگذار است. این مطالعه اهمیت بهینه‌سازی چندعاملی در فرآیندهای الکتروشیمیایی را برجسته کرده و نشان داد که حتی در مقیاس‌های میکرو نیز تعامل میان پارامترها نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی سطح دارد. لیو و همکاران [۱۹] نیز رفتار انحلال آندی فولادهای زنگ‌نزن با فازهای متالورژیکی متفاوت را بررسی کردند و دریافتند که ناهمگونی ریزساختاری اثر مستقیمی بر یکنواختی انحلال دارد. نتایج آن‌ها نشان داد که تفاوت در توزیع فازها می‌تواند موجب تغییرات قابل توجه در مورفولوژی سطح و میزان تخلخل گردد و بنابراین توجه به ترکیب فازی آلیاژ پیش از انجام فرآیندهای الکتروشیمیایی ضروری است.

یزدانی و راستی با به‌کارگیری طراحی آزمایش‌ها در سنگ‌زنی الکتروشیمیایی فولاد زنگ‌نزن AISI 304 نشان دادند که افزایش ولتاژ و غلظت الکترولیت به‌ترتیب موجب افزایش چشمگیر چگالی جریان (حدود ۳۶۸٪ و ۲۴۱٪) می‌شود. همچنین، تنظیم بهینه سرعت چرخش و پیشروی سبب کاهش معنادار زبری و محدود شدن اثرات حرارتی گردید. مقایسه با سنگ‌زنی متعارف نشان داد که ECG تغییرات سختی زیرسطح را کمتر کرده و سطحی یکنواخت‌تر ایجاد می‌کند، که در نهایت آغاز خوردگی موضعی را کاهش داده و دوام و پایداری خوردگی قطعه را بهبود می‌بخشد [۹]. جی و همکاران [۲۰] با استفاده از روش الکترو پلازما پولیشینگ نشان دادند که اصلاح شرایط انحلال می‌تواند کاهش چشمگیری در زبری سطح ایجاد کند، به‌گونه‌ای که مقدار Ra از $0.445 \mu\text{m}$ به $0.070 \mu\text{m}$ رسید. این یافته‌ها اهمیت انتخاب دقیق پارامترهای عملیاتی و ترکیب روش‌های الکتروشیمیایی را برای دستیابی به سطوح با کیفیت بالا آشکار ساخت. سیاپتارا و همکاران [۲۱] رویکردی نوین در الکتروپولیشینگ معرفی کردند که در آن افزودن اتانول به محلول الکترولیت و به‌کارگیری میدان مغناطیسی خارجی آزمایش شد. نتایج نشان داد که این تغییرات موجب افزایش نرخ برداشت ماده و هم‌زمان بهبود یکنواختی سطح گردید. این پژوهش اهمیت بهره‌گیری از ترکیبات الکترولیتی جایگزین و تأثیر شرایط فیزیکی محیطی را در بهبود کیفیت سطح برجسته می‌سازد.

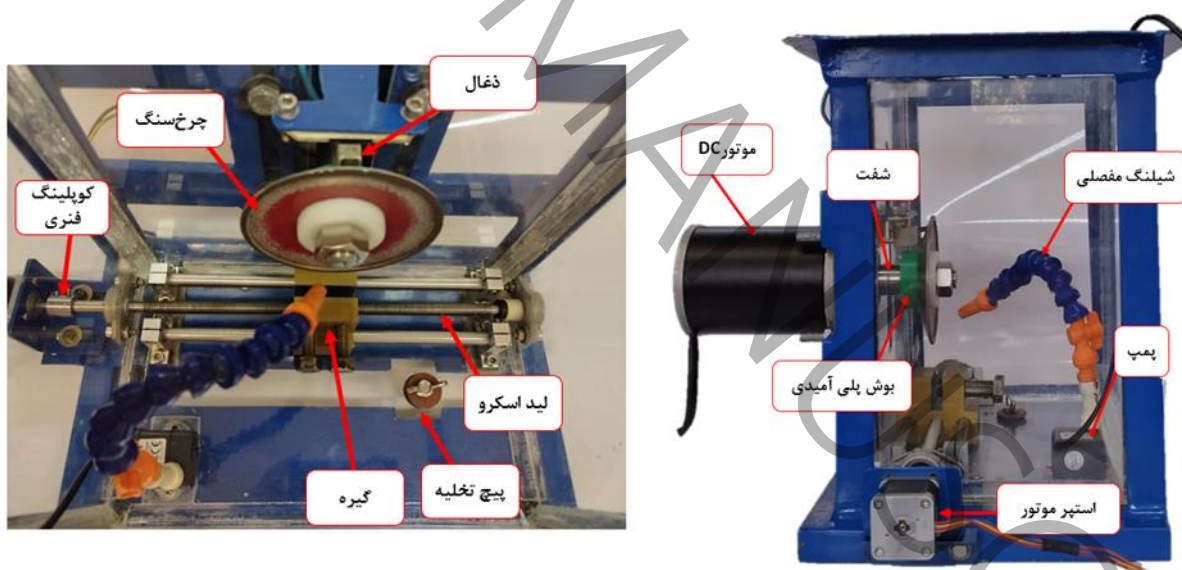
این مجموعه از پژوهش‌های اخیر چشم‌انداز دقیق‌تری از عوامل اثرگذار بر زبری و تخلخل در فرآیندهای الکتروشیمیایی ارائه و نشان می‌دهد که ارتقای کیفیت سطح صرفاً با تغییر یک پارامتر امکان‌پذیر نیست، بلکه مستلزم رویکردی جامع است که در آن ترکیب شیمیایی الکترولیت، ریزساختار آلیاژ، شرایط عملیاتی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند. به‌طور کلی، اکثر پژوهش‌های پیشین در حوزه سنگ‌زنی الکتروشیمیایی فولادهای زنگ‌نزن عمدتاً بر اثر پارامترهای فرآیندی بر نرخ برداشت ماده و شاخص‌های زبری خطی مانند Ra متمرکز بوده‌اند. اگرچه در این زمینه بهبودهای قابل توجهی گزارش شده است، اما ارزیابی نظام‌مند زبری سطح با معیار میانگین قدرمطلق ارتفاع سطح^۱ (Sa) و میزان تخلخل سطح تحت شرایط فرآیندی مختلف کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به بیان دیگر، مرور ادبیات آشکار می‌سازد که خلأیی پژوهشی در زمینه بررسی هم‌زمان Sa و تخلخل در فرآیند سنگ‌زنی الکتروشیمیایی فولادهای زنگ‌نزن وجود دارد. پژوهش حاضر با رویکردی جامع، اثر سه پارامتر کلیدی شامل غلظت الکترولیت، ولتاژ اعمالی و سرعت چرخش سنگ را به‌طور هم‌زمان بر Sa و تخلخل سطح تحلیل می‌کند. نوآوری اصلی این پژوهش در تمرکز بر تحلیل هم‌زمان این دو شاخص و تبیین ارتباط آن‌ها با مکانیزم‌های

^۱ Arithmetical Mean Height

ترکیبی الکتروشیمیایی-مکانیکی است. نتایج مورد انتظار نه تنها شرایط بهینه فرآیندی را مشخص می سازند، بلکه می توانند به عنوان راهنمایی کاربردی برای ارتقای یکپارچگی سطح و افزایش دوام عملکردی قطعات فولادی در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرند.

مواد و روش ها

در این پژوهش به منظور بررسی هم زمان زبری سطح (Sa) و تخلخل سطح فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 در فرآیند سنگ زنی الکتروشیمیایی، یک سامانه آزمایشگاهی اختصاصی طراحی و ساخته شد. این دستگاه، همان طور که در شکل نمایش داده شده است، از چهار بخش اصلی شامل سیستم چرخ سنگ زنی رسانا، منبع تغذیه جریان مستقیم، مدار پمپاژ و گردش الکتrolیت، و مکانیزم نگهدارنده و جابجایی نمونه تشکیل شده است. طراحی دقیق و کنترل شده این سامانه امکان آن را فراهم ساخت که تغییرات پارامترهای کلیدی مانند ولتاژ، سرعت چرخ و غلظت الکتrolیت با دقت بالا اعمال و اثرات آن ها بر کیفیت سطح نمونه ها بررسی شود. چرخ سنگ زنی مورد استفاده از نوع فنجان‌ی شکل Tyrolit با قطر ۱۲۰ میلی متر انتخاب شد. دلیل انتخاب این نوع چرخ آن است که هم امکان انتقال جریان الکتریکی به سطح قطعه کار و هم برداشت مکانیکی محدود ماده را به طور هم زمان فراهم می سازد. سطح چرخ با پوششی از ذرات آلومینیوم اکسید (Al_2O_3) با اندازه دانه ۱۲۵ و پیوند متال باند رسانا پوشیده شده بود. ترکیب انتخاب شده به گونه ای طراحی شد که حدود ۹۰ درصد آن را مواد رسانا و تنها ۱۰ درصد آن را ذرات ساینده تشکیل دهند. این نسبت، تعادل مناسبی میان هدایت الکتریکی برای ایجاد واکنش های آندی و میزان سایش مکانیکی جهت حذف لایه غیرفعال سطحی فولاد برقرار می سازد.



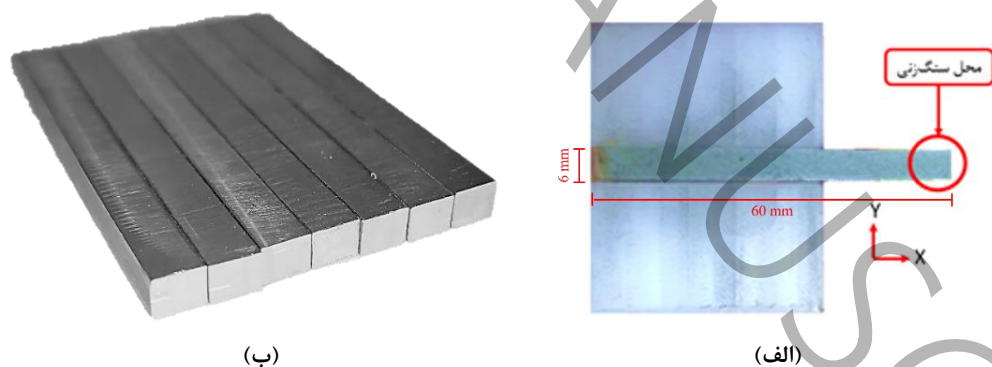
شکل ۱: اجزای دستگاه سنگ زنی الکتروشیمیایی مورد استفاده در آزمایش های تجربی.

Figure 1. Components of the electrochemical grinding apparatus used in the experimental tests.

برای دوران چرخ سنگ زنی، از موتور جریان مستقیم استفاده شد که قابلیت تنظیم سرعت در بازه ۵۰۰ rpm تا ۲۵۰۰ rpm را داشت. این بازه سرعت با توجه به مطالعات پیشین و نیاز به بررسی اثر تغییرات سرعت بر کیفیت سطح انتخاب شد. کنترل سرعت توسط تاکومتر

کالیبره شده انجام گرفت تا اطمینان حاصل شود که سرعت تنظیم شده با سرعت واقعی یکسان است و خطای ناشی از تغییرات بار یا لغزش موتور حذف گردد. همچنین برای انتقال پایدار جریان الکتریکی به چرخ سنگ زنی در حال دوران، از یک جاروبک تماس استفاده شد که امکان عبور جریان بدون ایجاد نویز یا افت شدید ولتاژ را فراهم می کرد. واحد تأمین توان الکتریکی سامانه یک منبع تغذیه جریان مستقیم^۱ قابل تنظیم بود که توانایی اعمال ولتاژ در محدوده صفر تا ۳۰ ولت و جریان تا ۱۵ آمپر را داشت. پایانه مثبت منبع تغذیه به قطعه کار (آند) و پایانه منفی آن به چرخ سنگ زنی (کاتد) متصل شد. بخش دیگری از دستگاه به تأمین و گردش الکترولیت اختصاص داشت. در این پژوهش از یک پمپ غوطه ور SUBO WP-3200 با دبی اسمی ۵ لیتر بر دقیقه استفاده شد. الکترولیت پس از مکش از مخزن ذخیره، توسط نازل با قطر ۵ میلی متر مستقیماً به ناحیه تماس میان چرخ و قطعه کار تزریق می شد و موجب انتقال مؤثر یون ها و تأمین رسانایی مناسب شده و هم زمان حرارت ایجاد شده در ناحیه تماس را دفع می کند و از تشکیل نواحی داغ و آسیب های حرارتی جلوگیری به عمل می آورد. مکانیزم نگهدارنده نمونه ها از جنس PTFE طراحی شد تا علاوه بر تثبیت موقعیت قطعه کار، نقش عایق الکتریکی ایفا کند و مانع از ایجاد مسیرهای جریان ناخواسته گردد. موقعیت نمونه ها به گونه ای تنظیم شد که همواره سطح فعال در تماس مستقیم با چرخ قرار گیرد و شرایط تکرارپذیر برای همه آزمون ها فراهم شود.

برای اجرای آزمایش های تجربی، از فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 به عنوان ماده پایه استفاده شد که این آلیاژ در صنایع مختلف به طور گسترده استفاده می شود و کیفیت سطح آن نقش تعیین کننده ای در دوام عملکردی دارد. نمونه ها به شکل منشوره های مکعبی با ابعاد ۶۰×۶×۶ میلی متر تهیه شدند (شکل). ابعاد نمونه ها به گونه ای انتخاب شد که طول ۶۰ میلی متر امکان تثبیت پایدار آن ها را در فیکسچر فراهم کند و سطح مقطع ۶×۶ میلی متر نیز تماس کافی با چرخ سنگ زنی ایجاد نماید بدون آن که نیروهای مکانیکی بیش از حد به سیستم وارد شود. همچنین ابعاد نسبتاً کوچک سبب کاهش اتلاف الکترولیت و افزایش تکرارپذیری نتایج در شرایط آزمایشگاهی گردید. برای حفظ یکنواختی شرایط، تمامی نمونه ها از یک شمش واحد برش کاری شدند تا اثر تفاوت های احتمالی در ترکیب شیمیایی یا ریزساختار بر نتایج حذف شود.



شکل ۲: (الف) نحوه قرارگیری نمونه در نگهدارنده، (ب) بلوک های AISI 304 مورد استفاده جهت بررسی فرایند سنگ زنی الکتروشیمیایی.

Figure 2. (a) Positioning of the specimen in the fixture and (b) AISI 304 blocks used to investigate the electrochemical grinding process.

^۱ DC Power Supply

پیش از شروع هر آزمایش تجربی، آماده سازی نمونه ها به صورت چند مرحله ای انجام شد. ابتدا نمونه ها پس از برش با سمباده های SiC با مش های متوالی تا شماره ۸۰۰ صیقل شدند تا ناهمواری های اولیه و اثرات ماشین کاری حذف گردد. سپس نمونه ها در حمام فراصوت حاوی اتانول به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شدند تا ذرات ریز و آلودگی های سطحی پاک شود. در نهایت، شست و شو با آب دی یونیزه و خشک کردن با هوای فشرده بدون روغن انجام گرفت. این رویکرد سبب می شد که سطح اولیه نمونه ها همگن و بدون آلودگی باشد و اثرات مشاهده شده در آزمایش تجربی تنها ناشی از فرآیند سنگ زنی الکتروشیمیایی باشد. انتخاب محلول کلرید سدیم (NaCl) به عنوان الکترولیت بر پایه سه دلیل علمی و عملی صورت گرفت. نخست، NaCl در غلظت های نسبتاً پایین رسانایی بالایی دارد و می تواند مسیر یون ها میان آند و کاتد را به خوبی فراهم کند. دوم، یون های کلرید قابلیت نفوذ به لایه غیر فعال کروم دار فولاد زنگ زن را دارند و با شکستن این لایه، واکنش های انحلال آندی را تسهیل می کنند. این ویژگی به ویژه در ECG اهمیت دارد، زیرا بدون این شکست لایه، عبور جریان محدود شده و فرآیند به برداشت مکانیکی وابسته می ماند. سوم، NaCl یک الکترولیت ارزان، در دسترس و نسبتاً بی خطر است که امکان استفاده مکرر در آزمایش های تکراری را بدون نیاز به مدیریت پسماندهای خطرناک فراهم می کند. غلظت الکترولیت در بازه ۲۰ تا ۱۸۰ گرم بر لیتر انتخاب شد. دلیل این انتخاب آن بود که در غلظت های پایین، رسانایی محدود است و واکنش های الکتروشیمیایی به آرامی انجام می شوند که می تواند به زبری سطح بالاتر منجر گردد. در مقابل، در غلظت های بالا، واکنش های آندی شدت می یابند و صافی سطح بهبود می یابد، اما هم زمان احتمال تشکیل حفرات و افزایش درصد تخلخل بیشتر می شود. بنابراین انتخاب این بازه وسیع امکان بررسی کامل طیف رفتار سطحی و یافتن نقطه بهینه میان زبری سطح و تخلخل را فراهم می کرد.

فرآیند سنگ زنی الکتروشیمیایی در این پژوهش بر اساس ترکیب سه عامل کلیدی یعنی ولتاژ اعمالی، سرعت چرخش چرخ سنگ زنی و غلظت الکترولیت طراحی گردید (جدول ۱). این سه متغیر به عنوان عوامل اصلی انتخاب شدند، زیرا هر یک نقش مستقیم و تعیین کننده ای در رفتار سطحی دارند و به صورت هم زمان مکانیزم های الکتروشیمیایی و مکانیکی را تحت تأثیر قرار می دهند. سایر شرایط از جمله نرخ پیشروی، دمای الکترولیت و عمق و طول براده برداری در طول تمامی آزمایش ها ثابت نگه داشته شدند تا اثرات اختصاصی سه عامل اصلی به روشنی آشکار شود. محدوده ولتاژ در بازه ۵ تا ۲۵ ولت در نظر گرفته شد که شامل سطوح پنج گانه ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ بود. در ولتاژ های کمتر از ۵ ولت، واکنش های آندی به شدت محدود می شوند و در نتیجه برداشت مکانیکی ناشی از تماس چرخ با قطعه کار غالب می گردد. در ولتاژ های بالاتر از ۲۵ ولت، خطر بروز خوردگی بیش از حد^۱ و ایجاد ناهمواری های غیر قابل کنترل وجود دارد. انتخاب این سطوح به گونه ای انجام شد که امکان بررسی رفتار غیر خطی و شناسایی ناحیه بهینه میان صافی سطح و کنترل درصد تخلخل فراهم شود.

سرعت چرخش چرخ سنگ زنی در بازه ۵۰۰ rpm تا ۲۵۰۰ rpm تنظیم شد. در سرعت های پایین تر مانند ۵۰۰ rpm تماس مکانیکی ناکافی بوده و تجدید الکترولیت در ناحیه تماس محدود می شود، در حالی که در سرعت های بالاتر از ۲۵۰۰ rpm، نیروی گریز از مرکز، مانع نفوذ مؤثر الکترولیت به سطح شده و کیفیت سطح کاهش می یابد. بر همین اساس، بازه پنج سطحی شامل ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ rpm انتخاب گردید تا رفتارهای انتقالی میان نقش مکانیکی و الکتروشیمیایی به طور کامل بررسی شود. غلظت الکترولیت نیز در محدوده ۲۰ تا ۱۸۰ گرم در لیتر (g/L)، در نظر گرفته شد. این بازه گسترده امکان بررسی شرایطی با رسانایی ضعیف تا بسیار بالا را فراهم می کند. سایر پارامترهای فرآیند ثابت نگه داشته شدند. نرخ پیشروی در تمامی آزمایش ها برابر با ۱۰ میلی متر بر دقیقه (mm/min)، دمای الکترولیت ۲۵

^۱ over-etching

درجه سانتی گراد و عمق براده برداری ۰/۱ میلیمتر تنظیم شد. انتخاب این مقادیر بر اساس مطالعات مقدماتی و مرور ادبیات انجام گرفت که نشان داده‌اند تغییرات این عوامل در بازه‌های یادشده اثرات جزئی بر کیفیت سطح دارند. طول تماس چرخ با قطعه کار در تمام آزمایش‌ها ۶ میلیمتر بود و به‌منظور یکسان‌سازی شرایط با استفاده از گیج فاصله کنترل گردید. از روش سطح پاسخ^۱ (RSM) به عنوان راهبرد طراحی آزمایش برای بررسی یکپارچگی سطحی فولاد زنگ‌نزن AISI 304 در فرآیند سنگ‌زنی الکتروشیمیایی استفاده شده است. بر اساس این طراحی، در مجموع ۲۰ آزمایش تجربی انجام شد تا تأثیر این متغیرها بر خروجی‌های فرآیند تحلیل و بررسی گردد.

جدول ۱: پارامترهای اصلی فرآیند سنگ‌زنی الکتروشیمیایی و سطوح تغییرات آن‌ها.

Table 1. Main electrochemical grinding process parameters and their corresponding levels.

پارامتر فرآیند	سطوح				
	-۲	-۱	۰	+۱	+۲
ولتاژ الکترولیت (V)	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
سرعت موتور (rpm)	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۲۵۰۰
غلظت الکترولیت (g/L)	۲۰	۶۰	۱۰۰	۱۴۰	۱۸۰

پروتکل آزمایش‌های تجربی به‌صورت تکرارشونده و دقیق طراحی شد. ابتدا نمونه‌ها در نگهدارنده PTFE تثبیت شدند، سپس الکترولیت با دبی ثابت به ناحیه تماس تزریق و جریان برقرار گردید. سرعت چرخ روی مقدار هدف تنظیم و ولتاژ تا سطح تعیین‌شده اعمال شد و پس از ۱۵ ثانیه پایدارسازی، فرآیند سنگ‌زنی اجرا و داده‌های جریان و ولتاژ به‌طور پیوسته ثبت شدند. در پایان هر آزمایش تجربی، نمونه‌ها با آب دی‌یونیزه شسته و خشک و سپس کدگذاری شدند. هر شرایط سه بار تکرار شد و ترتیب اجرا به‌صورت تصادفی انتخاب گردید. برای کنترل کیفیت، مسیر الکترولیت پیش از هر آزمایش پاک‌سازی و هدایت ویژه محلول در طول آزمایش پایش شد. این پروتکل امکان ارزیابی دقیق و قابل اعتماد اثر سه پارامتر اصلی بر زبری و تخلخل سطح را فراهم ساخت.

برای ارزیابی کیفی و کمی یکپارچگی سطح فولاد زنگ‌نزن AISI 304 پس از فرآیند سنگ‌زنی الکتروشیمیایی، دو شاخص کلیدی شامل زبری سطح (Sa) و درصد تخلخل سطحی مورد سنجش قرار گرفتند. انتخاب این دو شاخص بر مبنای اهمیت آن‌ها در تعیین رفتار عملکردی سطح انجام شد. زبری سطح به‌عنوان معیاری از یکنواختی و صافی، نقش مستقیم در ویژگی‌های تریبولوژیکی، آغاز و گسترش خوردگی و نیز میزان چسبندگی پوشش‌ها ایفا می‌کند. در مقابل، تخلخل‌های سطحی به‌عنوان ناپیوستگی‌های هندسی می‌توانند موجب تمرکز تنش، تسهیل نفوذ یون‌های مهاجم و در نهایت کاهش مقاومت به خوردگی و دوام پوشش‌های محافظ شوند. از این رو، بررسی هم‌زمان زبری و تخلخل قادر است تصویری جامع‌تر و دقیق‌تر از کیفیت سطح ارائه دهد و ابعاد مختلف یکپارچگی سطح را به‌طور کامل آشکار سازد.

^۱ Response surface methodology (RSM)

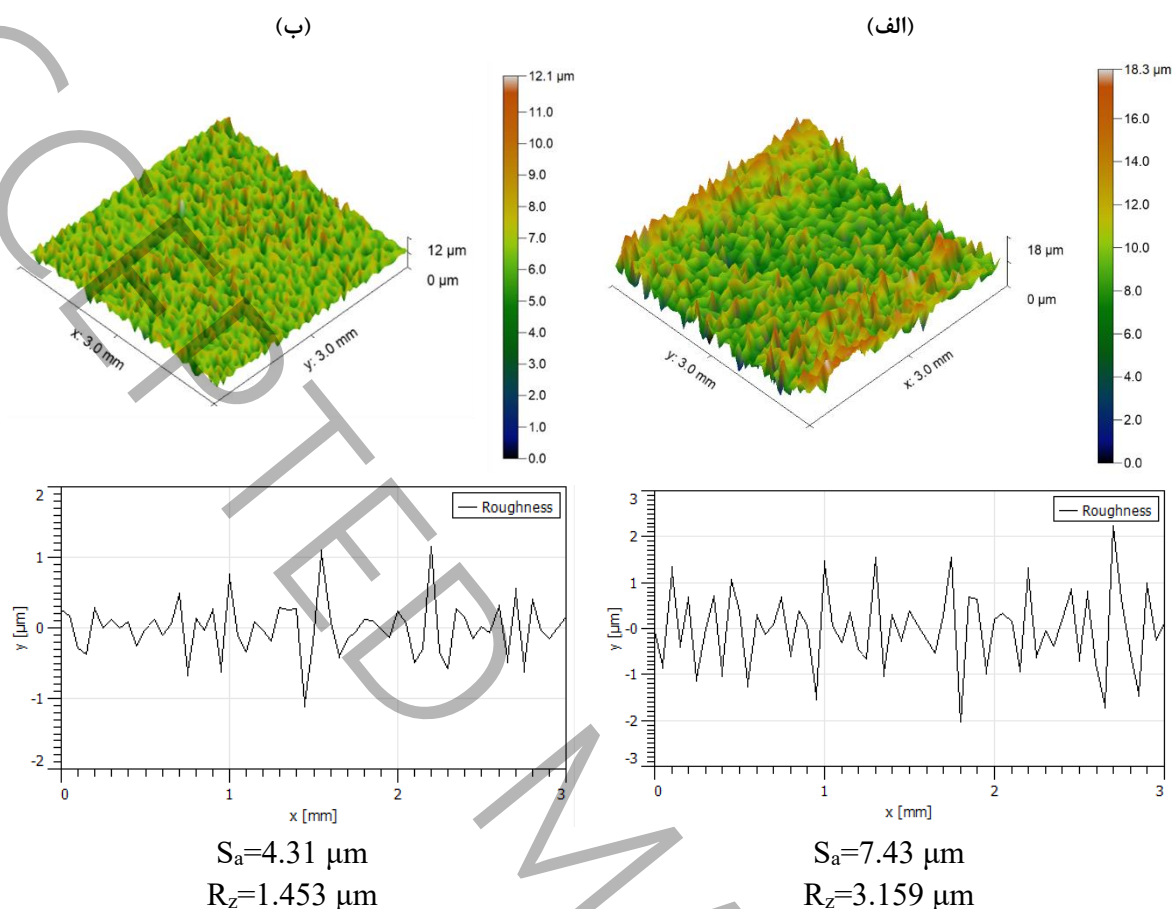


شکل ۳: دستگاه پروفایلومتر لیزری کهربا مدل LPM-L1

Figure 3. Kahroba LPM-L1 laser profilometer.

روش اندازه‌گیری S_a بر پایه استفاده از پروفایلومتر لیزری کهربا مدل LPM-L1 (شکل ۳) انجام شد. انتخاب این دستگاه به دلیل توانایی آن در برداشت غیرتماسی داده‌ها با دقت میکرونی و امکان بازسازی سه‌بعدی پروفیل سطح صورت گرفت. این ویژگی در مقایسه با زبری‌سنج‌های تماسی احتمال ایجاد خطای ناشی از تماس مکانیکی را کاهش می‌دهد. در هر نمونه، ناحیه‌ای به ابعاد 3×3 میلی‌متر انتخاب و با گام ۵۰ میکرومتر اسکن شد. انتخاب این ابعاد و گام برداشت با هدف پوشش کافی سطح برای نمایش ناهمواری‌های غالب و هم‌زمان حذف اثرات ناهمواری‌های بزرگ‌مقیاس صورت گرفت که می‌توانستند شاخص‌های زبری را تحت تأثیر قرار دهند. برای افزایش قابلیت اعتماد نتایج، هر اندازه‌گیری در سه موقعیت مختلف مطابق استاندارد ISO 25178-2 از سطح نمونه تکرار و میانگین آن‌ها به عنوان مقدار نهایی S_a گزارش شد. این رویکرد موجب شد ناهمگنی‌های احتمالی ناشی از شرایط محلی فرآیند تأثیر کمتری بر نتیجه کلی داشته باشند. پارامترهای زبری سطح، شامل S_a و R_z ، به عنوان میانگین سه اندازه‌گیری مستقل در موقعیت‌های مختلف گزارش شده‌اند تا از قابلیت اطمینان آماری اطمینان حاصل شود. شایان ذکر است که اختلاف عددی مشاهده شده میان S_a (پارامتر مساحتی) و R_z (پارامتر پروفیلی) ناشی از توپوگرافی ویژه سطوح ماشین‌کاری شده با فرآیند ECG است. در این فرآیند، توزیع تصادفی حفرات ناشی از انحلال الکتروشیمیایی در یک ناحیه 3×3 میلی‌متری، تأثیر متفاوتی بر مقدار S_a می‌گذارد؛ در حالی که پارامتر R_z ، تنها بیانگر ارتفاع قله تا دره در یک خط پروفیل منفرد است. بنابراین، این دو پارامتر اطلاعات مکمل (و نه معادل) در خصوص یکپارچگی سطح ارائه می‌دهند.

نمونه‌هایی از خروجی پروفایلومتر لیزری در شکل ارائه شده است که نقشه سه‌بعدی سطح فولاد زنگ‌نزن AISI 304 را در ناحیه‌ای به ابعاد 3×3 میلی‌متر نشان می‌دهد. پروفیل زبری سطوح در شکل قسمت‌های (الف) و (ب)، تفاوت آشکاری در ریزتوپوگرافی نشان می‌دهند. در نمونه (الف)، مقدار $S_a = 7.43 \mu\text{m}$ و $R_z = 3.159 \mu\text{m}$ بیانگر زبری بالاتر و ناهمواری‌های برجسته‌تر سطح است، در حالی که در نمونه (ب) با $S_a = 4.31 \mu\text{m}$ و $R_z = 1.453 \mu\text{m}$ ، سطح یکنواخت‌تر و نوسانات ارتفاع محدودتری مشاهده می‌شود. بدین ترتیب، شکل مقایسه‌ی روشنی از تفاوت مورفولوژی سطوح را ارائه می‌دهد و نشان‌دهنده قابلیت دستگاه در بازسازی سه‌بعدی و استخراج دقیق شاخص‌های کمی زبری است.

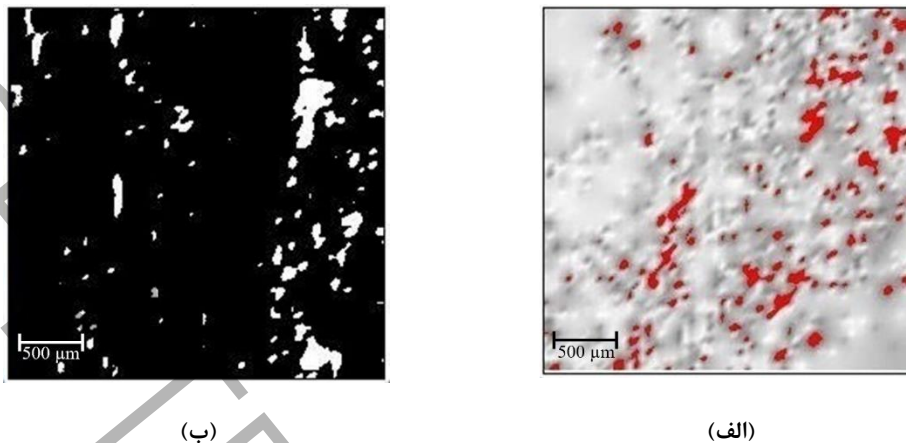


شکل ۴: نمونه‌هایی از نقشه سه‌بعدی سطح فولاد زنگ‌نزن AISI 304 برداشت‌شده توسط پروفایلومتر لیزری.

Figure 4. Representative three-dimensional surface maps of AISI 304 stainless steel acquired using a laser profilometer.

برای کمّی‌سازی درصد تخلخل سطحی، از تصاویر حاصل از پروفایلومتر لیزری و نرم‌افزار ImageJ استفاده شد. در این روش، نقشه‌های سه‌بعدی برداشت‌شده^۱ از سطح به‌صورت تصاویر دوبعدی با مقیاس مشخص خروجی گرفته و سپس کالیبره شدند تا هر پیکسل بیانگر طول مشخصی از سطح باشد. پس از کالیبراسیون، تصاویر با روش Otsu آستانه‌گذاری و به باینری تبدیل شدند، به‌گونه‌ای که نواحی متخلخل به رنگ سیاه و بخش‌های غیرمتخلخل به رنگ سفید نمایش داده شدند، به منظور کاهش نویز، فیلتر Median با شعاع ۲ پیکسل اعمال شد (شکل ۵). در ادامه، با استفاده از الگوریتم تحلیل ذرات در نرم‌افزار ImageJ، مساحت کل نواحی سیاه محاسبه و نسبت آن به مساحت کل تصویر به‌عنوان درصد تخلخل سطح تعیین گردید. بر اساس مشخصات دستگاه مورد استفاده، قطر لکه لیزر حدود ۳۰ μm است؛ بنابراین حفرات کوچک‌تر از حد تفکیک جانبی دستگاه یا فرورفتگی‌های بسیار کم‌عمق در محاسبه تخلخل لحاظ نشده‌اند. مقادیر اعلام شده نشان‌دهنده درصد تخلخل قابل آشکارسازی در محدوده تفکیک‌پذیری پروفایلومتر لیزری است.

^۱ height map



شکل ۵: نمونه‌ای از پردازش تصویر در نرم‌افزار ImageJ برای تعیین درصد تخلخل سطحی: (الف) شناسایی منافذ، (ب) تصویر باینری پس از آستانه‌گذاری و محاسبه مساحت منافذ.

Figure 5. Example of image processing in ImageJ for determining surface porosity: (a) pore identification and (b) binary image after thresholding and pore-area calculation.

کنترل کیفیت اندازه‌گیری‌ها بخش مهمی از این روش بود. پروفیلومتر لیزری پیش از هر سری آزمایش با بلوک مرجع کالیبره شد تا دقت اندازه‌گیری‌ها تضمین گردد. نرم‌افزار ImageJ نیز با استفاده از تصاویر استاندارد دارای درصد تخلخل معلوم، مورد آزمایش قرار گرفت تا صحت محاسبات نرم‌افزاری تأیید شود. این کنترل‌های مقدماتی تضمین کردند که داده‌های به‌دست‌آمده از هر دو روش قابل اعتماد و تکرارپذیر باشند. در نهایت، مقادیر S_a و درصد تخلخل برای تمامی ترکیب‌های آزمایش جمع‌آوری شد و این داده‌ها مبنای اصلی تحلیل‌ها و مقایسه‌ها در بخش نتایج قرار گرفتند تا نشان دهند که کیفیت سطح فولاد زنگ‌نزن تحت فرآیند سنگ‌زنی الکتروشیمیایی چگونه تحت تأثیر تغییرات ولتاژ، غلظت الکترولیت و سرعت چرخ قرار می‌گیرد. تمامی انتخاب‌های صورت‌گرفته در این پژوهش، از جنس ماده و ابعاد نمونه تا طراحی سامانه، نوع چرخ و الکترولیت و همچنین بازه‌های عملیاتی و روش‌های اندازه‌گیری، بر مبنای تضمین دقت و تکرارپذیری طراحی شدند. هدف آن بود که شرایطی فراهم شود تا نتایج حاصل نه‌تنها اعتبار علمی داشته باشند بلکه قابلیت استفاده در صنایع حساس نیز پیدا کنند. این ساختار روش‌شناسی به گونه‌ای تنظیم شد که اثرات سه متغیر کلیدی فرآیند به‌طور شفاف آشکار شود و داده‌های به‌دست‌آمده بتوانند مبنایی برای استخراج نتایج کاربردی و قابل اتکا در سطوح آزمایشگاهی و صنعتی باشند.

نتایج و بحث

مقادیر زبری سه‌بعدی سطح (S_a) و درصد تخلخل فولاد زنگ‌نزن AISI 304 در سطوح مختلف غلظت الکترولیت (Conc.)، ولتاژ (U) و سرعت چرخش (n) در

جدول ارائه شده است. لازم به ذکر است که در هر سطح از یک پارامتر، مقادیر S_a و درصد تخلخل، از میانگین نتایج آزمایش‌های تجربی به‌دست آمده که طی آن سایر پارامترها در سطوح مختلف تغییر داده شده‌اند. مقایسه این میانگین‌ها امکان شناسایی روندهای کلی و درک سهم هر عامل در تغییرات سطحی را فراهم می‌کند.

جدول ۲: ماتریس طراحی آزمایش‌ها به همراه پارامترهای خروجی.
Table 2. Experimental design matrix and corresponding response parameters

شماره	C	U	n	غلظت (g/L)	ولتاژ (V)	سرعت چرخش (rpm)	Sa (μm)	تخلخل (%)
۱	-۲	۰	۰	۲۰	۱۵	۱۵۰۰	۱۴/۸۴۰	۱/۳۰۴
۲	-۱	-۱	-۱	۶۰	۱۰	۱۰۰۰	۱۲/۵۹۰	۱/۹۴۲
۳	-۱	-۱	۱	۶۰	۱۰	۲۰۰۰	۱۲/۱۹۰	۰/۵۰۰
۴	-۱	۱	-۱	۶۰	۲۰	۱۰۰۰	۸/۷۸۰	۱/۴۴۳
۵	-۱	۱	۱	۶۰	۲۰	۲۰۰۰	۸/۶۹۰	۱/۹۴۳
۶	۰	-۲	۰	۱۰۰	۵	۱۵۰۰	۱۲/۰۰۰	۱/۷۲۰
۷	۰	۰	-۲	۱۰۰	۱۵	۵۰۰	۹/۰۰۰	۱/۴۴۳
۸	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۵	۱۵۰۰	۵/۰۰۰	۶/۱۰۰
۹	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۵	۱۵۰۰	۵/۱۰۰	۳/۴۰۸
۱۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۵	۱۵۰۰	۴/۹۶۰	۳/۴۶۶
۱۱	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۵	۱۵۰۰	۵/۲۶۰	۳/۱۳۴
۱۲	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۵	۱۵۰۰	۵/۴۲۰	۲/۹۴۸
۱۳	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۵	۱۵۰۰	۵/۳۱۰	۳/۰۷۵
۱۴	۰	۰	۲	۱۰۰	۱۵	۲۵۰۰	۶/۸۰۰	۲/۴۹۳
۱۵	۰	۲	۰	۱۰۰	۲۵	۱۵۰۰	۷/۴۳۰	۱/۴۵۹
۱۶	۱	-۱	-۱	۱۴۰	۱۰	۱۰۰۰	۶/۱۵۰	۱/۷۹۵
۱۷	۱	-۱	۱	۱۴۰	۱۰	۲۰۰۰	۴/۵۷۰	۴/۸۷۷
۱۸	۱	۱	-۱	۱۴۰	۲۰	۱۰۰۰	۵/۷۵۰	۴/۳۰۰
۱۹	۱	۱	۱	۱۴۰	۲۰	۲۰۰۰	۴/۳۴۰	۵/۶۰۹
۲۰	۲	۰	۰	۱۸۰	۱۵	۱۵۰۰	۴/۳۱۰	۴/۸۷۵

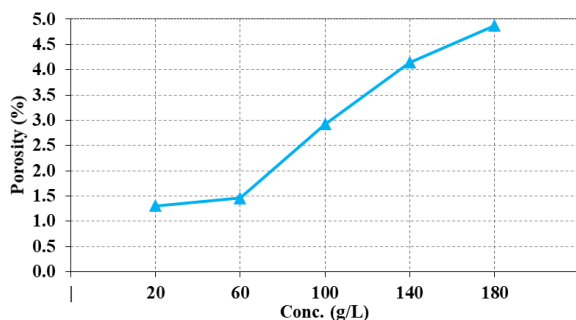
نتایج تحلیل واریانس ارائه شده در جدول ۳، سهم نسبی پارامترهای ورودی در تغییرات زبری سطح (Sa) را به صورت کمی مشخص می‌کند. بر این اساس، غلظت الکترولیت با سهم ۵۸/۲۱٪ بیشترین اثر را بر پاسخ زبری سطح داشته و به عنوان عامل غالب در میان متغیرهای ورودی شناخته می‌شود. پس از آن، ولتاژ اعمالی با سهم ۹/۴٪ در رتبه دوم قرار می‌گیرد و نشان می‌دهد که تغییر شدت میدان الکتریکی و چگالی جریان نیز در تغییرات Sa مؤثر است، هرچند اثر آن نسبت به غلظت الکترولیت محدودتر است. سرعت چرخش چرخ سنگ‌زنی نیز با سهم ۲٪ کمترین اثر مستقیم را در میان سه پارامتر ورودی نشان می‌دهد. بنابراین، بر اساس نتایج آماری، ترتیب اثرگذاری پارامترهای ورودی بر زبری سطح به صورت غلظت الکترولیت، ولتاژ اعمالی و سپس سرعت چرخش تعیین می‌شود.

جدول ۳: تحلیل ANOVA برای Sa در ECG

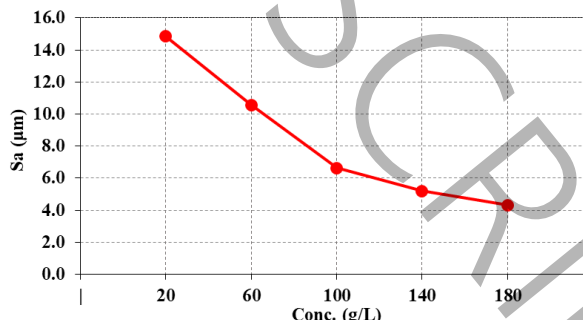
Table ۳. Analysis of variance (ANOVA) for Sa in electrochemical grinding (ECG).

منابع	درجه آزادی	مجموع مربعات تعدیل شده	آماره F	آماره P	سهم تاثیر (%)
غلظت (C)	۱	۱۱۲/۸۹۱	۲۲۹۴/۲	<۰/۰۰۱	۵۸/۲۱
ولتاژ (U)	۱	۱۸/۲۳۳	۳۷۰/۵۳	<۰/۰۰۱	۹/۴
سرعت چرخش (n)	۱	۳/۸۸۱	۷۸/۸۷	<۰/۰۰۱	۲
C×C	۱	۲۹/۳۸۲	۵۹۷/۱۱	<۰/۰۰۱	۱۵/۱۵
U×U	۱	۳۱/۳۱۶	۶۳۶/۴۱	<۰/۰۰۱	۱۶/۱۵
n×n	۱	۱۱/۰۲۸	۲۲۴/۱۱	<۰/۰۰۱	۵/۶۹
C×U	۱	۵/۵۷۸	۱۱۳/۳۵	<۰/۰۰۱	۲/۸۸
C×n	۱	۰/۷۸۱	۱۵/۸۸	۰/۰۰۲	۰/۴
خطا	۱۱	۰/۵۴۱			۰/۲۸
مجموع	۱۹	۱۹۳/۹۴۸			۱۰۰
خلاصه مدل		$R^2=۹۹,۷۲$, $S=۰/۲۲۱۸۲۷$			

همان‌طور که در شکل قسمت (الف)، مشاهده می‌شود، افزایش غلظت الکتروولیت تا ۱۸۰ g/L موجب کاهش تدریجی Sa از حدود ۱۵ μm به نزدیک ۴ μm گردید. این روند نزولی ناشی از افزایش هدایت ویژه محلول و یکنواخت‌تر شدن انحلال آندی است. در غلظت‌های پایین، مقاومت الکتروولیت بالا بوده و واکنش‌های آندی محدود می‌شوند؛ در نتیجه، سایش مکانیکی و میکروجرایان‌های موضعی نقش غالب در تغییرات توپوگرافی دارند. در مقابل، در غلظت‌های بالا، فرآیند انحلال کنترل‌شده‌تر بوده و ناهمواری‌های ریز حذف می‌شوند که نشان‌دهنده‌ی گذار از مکانیسم برداشت مکانیکی به انحلال الکتروشیمیایی پایدار است. شکل قسمت (ب)، نشان می‌دهد که درصد تخلخل با افزایش غلظت رفتاری معکوس دارد و از ۱/۳ درصد به بیش از ۴/۸ درصد افزایش یافت. این پدیده حاکی از آن است که گرچه غلظت بالاتر موجب بهبود صافی سطح می‌شود، اما افزایش شدت واکنش‌های آندی و افزایش موضعی چگالی جریان می‌تواند منجر به تشکیل منافذ ریز و حفرات الکتروشیمیایی شود.



(ب)

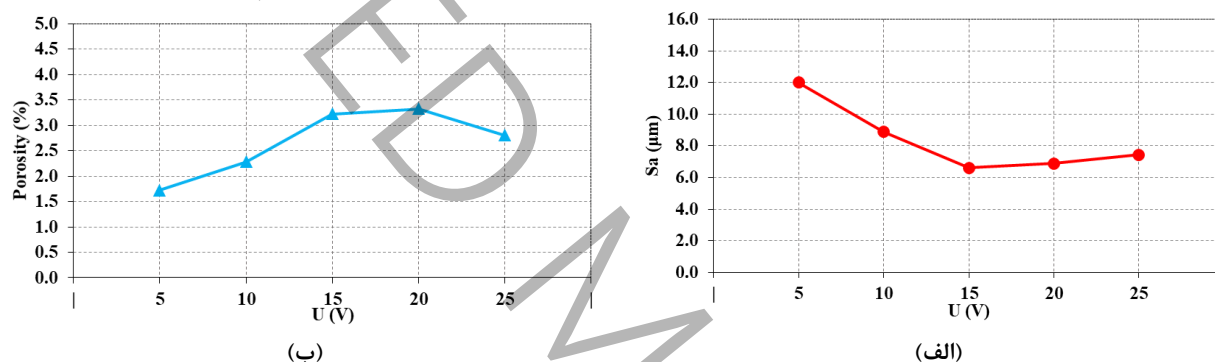


(الف)

شکل ۶ (الف) تغییرات زبری سطح (Sa) و (ب) درصد تخلخل فولاد AISI 304 بر حسب غلظت الکترولیت در فرآیند سنگ‌زنی الکتروشیمیایی.

Figure 6. Effect of electrolyte concentration on (a) areal surface roughness (Sa) and (b) surface porosity of AISI 304 stainless steel during electrochemical grinding.

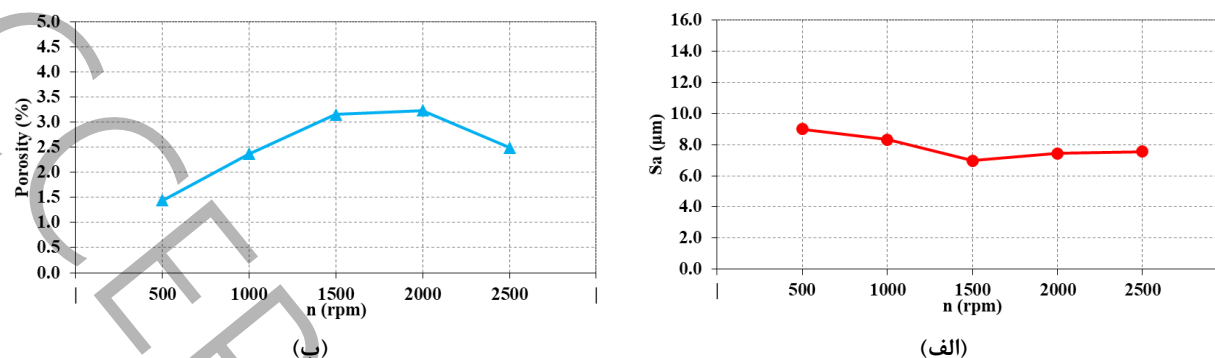
در ادامه، شکل قسمت (الف)، تغییرات Sa در برابر ولتاژ را نشان می‌دهد. کاهش شدید Sa از $12\text{ }\mu\text{m}$ به $6\text{ }\mu\text{m}$ در بازه 5 V تا 15 V بیانگر افزایش سرعت واکنش‌های آندی و یکنواخت‌تر شدن برداشت ماده است. با این حال، در ولتاژهای بالاتر از 15 V مقدار Sa دوباره افزایش یافته و به حدود $7\text{ }\mu\text{m}$ رسید که ناشی از بروز خوردگی بیش‌ازحد و ایجاد ناهمواری‌های موضعی است. مطابق شکل قسمت (ب)، درصد تخلخل در محدوده $10\text{--}15\text{ V}$ بیشینه شد و سپس با افزایش بیشتر ولتاژ کاهش یافت. این رفتار غیرخطی با نتایج یانگ و همکاران [۸] همخوانی دارد که نشان دادند تنظیم چرخه وظیفه در ECG می‌تواند از ایجاد چنین ناپایداری جلوگیری کند.



شکل ۷: (الف) تغییرات زبری سطح (Sa) و (ب) درصد تخلخل فولاد AISI 304 بر حسب ولتاژ در فرآیند سنگ‌زنی الکتروشیمیایی.

Figure 7. Effect of applied voltage on (a) areal surface roughness (Sa) and (b) surface porosity of AISI 304 stainless steel during electrochemical grinding.

بررسی اثر تغییرات سرعت در شکل، نشان می‌دهد که افزایش سرعت از 500 تا 2000 موجب کاهش Sa از $9\text{ }\mu\text{m}$ به $7\text{ }\mu\text{m}$ گردید، اما در 2500 rpm مقدار Sa تقریباً ثابت ماند. در این شرایط، افزایش نیروی گریز از مرکز سبب کاهش ضخامت لایه‌ی نفوذی الکترولیت و محدود شدن انتقال به سطح الکترود می‌شود، در نتیجه سهم واکنش‌های الکتروشیمیایی کاهش یافته و فرآیند به سمت برداشت مکانیکی متمایل می‌گردد. در مقابل، درصد تخلخل در سرعت‌های میانی (1500 الی 2000) بیشترین مقدار را داشت در حالی که در سرعت‌های پایین یا بسیار بالا مقدار آن کاهش یافته است. این رفتار بیانگر آن است که در محدوده‌ی میانی، تعادل بین سنگ‌زنی مکانیکی و نفوذ الکترولیت برقرار بوده و شرایط برای تشکیل یکنواخت‌تر حفرات فراهم می‌شود. بنابراین، تغییر سرعت اثر دوگانه‌ای بر مورفولوژی سطح دارد و نیازمند تنظیم هم‌زمان با پارامترهای ولتاژ و غلظت برای دستیابی به ساختار بهینه است.



شکل ۸: (الف) تغییرات زبری سطح (S_a) و (ب) درصد تخلخل فولاد AISI 304 بر حسب سرعت چرخش چرخ سنگ‌زنی در فرآیند سنگ‌زنی الکتروشیمیایی.

Figure 8. Effect of grinding-wheel rotational speed on (a) areal surface roughness (S_a) and (b) surface porosity of AISI 304 stainless steel during electrochemical grinding.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که در فرآیند سنگ‌زنی الکتروشیمیایی فولاد زنگ‌نزن AISI 304، بهترین شرایط سطحی در ترکیب غلظت بالای الکترولیت (180 g/L) و ولتاژ میانی (15 V) به دست آمد. در این شرایط، زبری سطح (S_a) به حداقل مقدار خود رسید، که نشان‌دهنده یکنواختی بالاتر انحلال آندی است. در عین حال، درصد تخلخل افزایش یافته که ناشی از تمرکز جریان موضعی و شکل‌گیری منافذ ریز در اثر واکنش‌های آندی شدید است. با این وجود، میزان تخلخل همچنان در محدوده قابل قبول برای فرآیند قرار دارد به گونه‌ای که یکپارچگی سطح حفظ شود. در مقابل، بدترین شرایط در غلظت‌های پایین همراه با ولتاژهای کم مشاهده شد که ضمن افزایش زبری، از یکنواختی سطح کاسته و کیفیت نهایی را به شدت تضعیف کرد. به‌طور کلی، رفتار سطحی فولاد زنگ‌نزن AISI 304 وابستگی قابل توجهی به برهم‌کنش سه عامل اصلی شامل غلظت الکترولیت، ولتاژ و سرعت چرخ در فرآیند سنگ‌زنی الکتروشیمیایی دارد. افزایش غلظت الکترولیت اگرچه به‌طور مؤثر موجب کاهش زبری سطح گردید، اما هم‌زمان احتمال تشکیل منافذ و افزایش میزان تخلخل را نیز بیشتر کرد. تغییرات ولتاژ رفتاری غیرخطی از خود نشان داد، به گونه‌ای که در محدوده‌های میانی شرایطی بهینه با صافی سطح بهتر و کنترل نسبی درصد تخلخل به دست آمد، در حالی که در ولتاژهای بالاتر یکنواختی سطح کاهش یافت. سرعت چرخش چرخ بر موازنه بین سایش مکانیکی و انحلال الکتروشیمیایی اثرگذار بود و در مقایسه با غلظت و ولتاژ نقش کمتری در تغییر مستقیم زبری و تخلخل ایفا کرد. در مجموع، بررسی نتایج آشکار می‌سازد که دستیابی به سطحی صاف و یکنواخت بدون افزایش نامطلوب درصد تخلخل، تنها در شرایط ویژه‌ای از ترکیب این سه پارامتر امکان‌پذیر است. همچنین اتکا به یک شاخص منفرد قادر به ارائه تصویر کامل از کیفیت سطح نیست و تنها ترکیب دو معیار زبری سه‌بعدی سطح (S_a) و درصد تخلخل می‌تواند ماهیت واقعی تغییرات سطحی و میزان یکپارچگی آن را به‌طور جامع آشکار سازد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که فرآیند سنگ‌زنی الکتروشیمیایی تأثیر چشمگیری بر یکپارچگی سطح فولاد زنگ‌نزن AISI 304 دارد و رفتار آن در برابر تغییرات پارامترهای عملیاتی، ماهیتی غیرخطی از خود نشان می‌دهد. افزایش غلظت الکترولیت موجب کاهش S_a از حدود $9 \mu m$ به $7.8 \mu m$ شد، اما درصد تخلخل سطحی از $1/2$ درصد به بیش از 5 درصد افزایش یافت که بیانگر وجود یک اثر دوگانه است.

بررسی ولتاژ نشان داد که محدوده ۱۰ V الی ۱۵ V بهترین تعادل میان صافی سطح و کنترل تخلخل را فراهم می‌کند، در حالی که ولتاژهای بالاتر به دلیل بروز خوردگی بیش‌ازحد، یکنواختی سطح را مختل کردند. تغییرات سرعت نیز نشان داد که افزایش آن تا حدود ۱۵۰۰ rpm موجب کاهش زبری و بهبود نسبی یکنواختی سطح می‌شود، اما در سرعت‌های بالاتر اثرات مکانیکی غالب گردیده و نفوذ الکترولیت در ناحیه تماس محدود شد. بنابراین، دستیابی به کیفیت سطح بهینه تنها با در نظر گرفتن هم‌زمان دو شاخص کلیدی یعنی Sa و درصد تخلخل امکان‌پذیر است. ترکیب غلظت ۱۸۰ g/L و ولتاژ ۱۵ V شرایط مطلوبی برای ایجاد سطحی صاف‌تر با تخلخل کنترل‌شده فراهم کرد، در حالی که انتخاب مقادیر بیش از حد برای هر یک از پارامترها اگرچه زبری را کاهش می‌دهد، اما می‌تواند موجب افت یکپارچگی سطح گردد. بر اساس یافته‌های این مطالعه، شرایط عملیاتی بهینه غلظت الکترولیت ۱۸۰ گرم بر لیتر، ولتاژ ۱۵ ولت و سرعت چرخ سنگ‌زنی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه تعیین می‌گردد. این ترکیب، ضمن ایجاد صافی سطح مطلوب (حداقل مقدار Sa)، میزان تخلخل ناشی از خوردگی جریان‌های سرگردان را نیز در سطح کنترل‌شده و قابل قبولی حفظ می‌کند. از منظر کاربردی، نتایج این تحقیق می‌تواند مبنای بهینه‌سازی فرآیندهای سنگ‌زنی الکتروشیمیایی در ساخت قطعات فولادی صنایع پزشکی، شیمیایی و انرژی قرار گیرد؛ صناعی که عملکرد آن‌ها به کیفیت سطح، مقاومت به خوردگی و دوام بلندمدت وابسته است. همچنین پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی بر استفاده از الکترولیت‌های نوین، طراحی هندسه ابزار و بررسی شرایط دینامیکی جریان متمرکز شوند تا مسیرهای تازه‌ای برای ارتقای کیفیت سطح و کاهش ریسک خوردگی در مقیاس صنعتی فراهم شود.

مراجع

- [۱] H.A. Ariza-Figueroa, J. Bosch, M.A. Baltazar-Zamora, R. Croche, G. Santiago-Hurtado, L. Landa-Ruiz, J.M. Mendoza-Rangel, J.M. Bastidas, F. Almeraya-Calderón, D.M. Bastidas, Corrosion behavior of AISI 304 stainless steel reinforcements in SCBA-SF ternary ecological concrete exposed to MgSO₄, *Materials*, 13(10) (2020) 2412.
- [۲] R. Kumar, A.K. Das, A comprehensive review of AISI 304 steel based on different thick coating process, *Materials Today: Proceedings*, 98 (2024) 180-186.
- [۳] E. Messinese, L. Casanova, L. Paterlini, F. Capelli, F. Bolzoni, M. Ormellese, A. Brenna, A Comprehensive Investigation on the Effects of Surface Finishing on the Resistance of Stainless Steel to Localized Corrosion, *Metals*, 12(10) (2022) 1751.
- [۴] L. Cao, W. Zhang, C. Jiang, H. Wang, H. An, C. Ye, J. Ren, X. Huang, L. Deng, Effect of Surface Roughness on Corrosion Behaviour of Stainless Steel in Supercritical CO₂, *Journal of Materials Research and Technology*, 36 (2025) 4946-4954.
- [۵] Y. Yin, M. Chen, Analysis of grindability and surface integrity in creep-feed grinding of high-strength steels, *Materials*, 17(8) (2024) 1784.
- [۶] D. Curtis, H. Krain, A. Winder, D. Novovic, Impact of grinding wheel specification on surface integrity and residual stress when grinding Inconel 718, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235(10) (2021) 1668-1681.

[٧]F. Wang, Y. He, X. Wu, M. Kang, Flow field characteristics and experimental research on inner-jet electrochemical face grinding of SUS420J2 stainless steel, *Scientific Reports*, 12(1) (2022) 11789.

[٨]G. Yang, P. Ming, S. Niu, G. Qin, H. Liu, D. Li, A. Zhang, An Investigation of the Efficient–Precise Continuous Electrochemical Grinding Process of Ti–6Al–4V, *Materials*, 17(8) (2024) 2729.

[٩]M. Yazdani, A. Rasti, Assessment on surface integrity in electrochemical grinding of AISI 304, *Heliyon*, 11(1) (2025) 1-14.

[١٠]Y. Yan, D. Bajaj, D. Chen, O. Kesler, Porous 430L Stainless Steel as a Support Layer for Planar Solid Oxide Cells: Effect of Porosity on Mechanical Properties, *High-Temperature Materials*, 1(2) (2024) 10011.

[١١]F.W. DelRio, R.M. Khan, M.J. Heiden, P.G. Kotula, P.A. Renner, E.K. Karasz, M.A. Melia, Porosity, roughness, and passive film morphology influence the corrosion behavior of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion, *Journal of Manufacturing Processes*, 102 (2023) 654-662.

[١٢]H. Saito, M. Nishimoto, I. Muto, Pitting corrosion characteristics of sintered Type 316 L stainless steel: relationship between pores and MnS, *npj Materials Degradation*, 8(1) (2024) 61.

[١٣]A.R. Chaudhari, K.B. Judal, Experimental investigation of electro-chemical magnetic abrasive finishing of SS 304 workpiece, *Materials Today: Proceedings*, 49 (2022) 390-396.

[١٤]X. Tan, R. Lan, Q. Yao, Q. Tu, L. Lei, J. Zhang, Y. Sun, J. Li, Y. Jiang, Influence of the machined surface roughness on the pitting behavior of 304 stainless steel, *Materials and Corrosion*, 74(5) (2023) 660-669.

[١٥]Z. Hou, S. Xiu, Y. Yao, C. Sun, The residual stress and martensitic transformation of 304 stainless steel in pre-stress grinding: influence and control on chloride induced SCC, *Journal of Materials Research and Technology*, 24 (2023) 4601-4617.

[١٦]H. Suárez-Miranda, G. Vargas-Gutiérrez, F. Martínez-Baltodano, W. Pech-Rodríguez, Eco-friendly electrochemical polishing of stainless steel using a NaCl-based electrolyte to reduce deterioration in seawater, *Electrochimica Acta*, 536 (2025) 1-10.

[١٧]A. Ghezri, K. Pratama, Y. Scholl, A. Küenzi, T. Nelis, J. Burger, C. Bessire, Energy Efficient Jet Polishing via Electrolytic Plasma Enhances Corrosion Resistance in Stainless Steel, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(6) (2024) 289.

[١٨]S. Prabakaran, N. Dhandapani, S. Elukaturi, G. Karuna, M.H. Fallah, Investigation of electrochemical micro-machining process parameters on stainless steel 316 by sodium chloride electrolyte, in: *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2024, pp. 11003.

[١٩]G. Liu, Z. Gong, Y. Yang, J. Shi, Y. Liu, X. Dou, C. Li, Electrochemical dissolution behavior of stainless steels with different metallographic phases and its effects on micro electrochemical machining performance, *Electrochemistry Communications*, 160 (2024) 107677.

[10] G. Ji, L. Ma, S. Zhang, J. Zhang, L. Wu, Study of Electrochemical Behavior and a Material Removal Mechanism During Electrolytic Plasma Polishing of 316L Stainless Steel, *Materials*, 18(6) (2025) 1307.

[11] M.K. Syahputra, K. Nur 'Anisa', R.A. Rahmania, F. Yusof, P. Dixit, M. Mahardika, G.S. Prihandana, Optimization of Process Parameters in Electropolishing of SS 316L Utilizing Taguchi Robust Design, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(4) (2025) 127.

Evaluation of Surface Integrity of AISI 304 in Electrochemical Grinding through Simultaneous Analysis of Surface Roughness and Porosity

Armin Rezaei^a, Amir Rasti^{a*}, Mohammad Yazdani^a

^a Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Electrochemical grinding, which combines mechanical abrasion with anodic dissolution, is an effective method for improving surface quality and reducing thermal damage in difficult-to-machine materials such as AISI 304 stainless steel. In this study, the effects of electrolyte concentration ranging from 20 to 180 g/L, applied voltage from 5 to 25 V, and grinding-wheel rotational speed from 500 to 2500 rpm on surface roughness and porosity were investigated. A dedicated experimental setup was developed, and surface roughness and porosity percentage were measured using a laser profilometer and ImageJ software, respectively. The results showed that increasing the electrolyte concentration reduced surface roughness from approximately 15 μm to nearly 4 μm , while increasing porosity from 1.2% to more than 5%. Voltage exhibited a nonlinear effect, with the most favorable balance between surface smoothness and porosity obtained within the range of 10–15 V. At higher voltages, however, excessive corrosion reduced surface uniformity. Increasing the rotational speed to approximately 1500 rpm improved surface smoothness, whereas at higher speeds, the predominance of mechanical effects and restricted electrolyte action within the contact zone reduced process efficiency. Overall, an electrolyte concentration of 180 g/L and a voltage of 15 V provided suitable conditions for achieving a smooth surface with controlled porosity. These findings demonstrate the necessity of simultaneously evaluating surface roughness and porosity to optimize surface integrity.

Keywords: Electrochemical grinding (ECG), AISI 304 stainless steel, Surface Integrity, surface roughness, surface porosity

*A.rasti@modares.ac.ir