ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(3):129-142

Study of the Effect of Burnishing Process on the Surface Roughness, Micro Hardness and Corrosion of 316L Stainless Steel Implant Machined by the Electrical Discharge Machining Process

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Barghamadi M.[1] *MSc*,
Saraeian P.[2]* *PhD*,
Rahmati S.[1] *PhD*,
Shakouri E.[3] *PhD*

How to cite this article
Barghamadi M, Saraeian P, Rahmati S, Shakouri E. *Study of the Effect of Burnishing Process on the Surface Roughness, Micro Hardness and Corrosion of 316 L Stainless Steel Implant Machined by the Electrical Discharge Machining Process. Modares Mechanical Engineering; 2021;21(3):129-142

ABSTRACT

Today, a variety of implants with different applications are used to replace or support a damaged biological structure, the most common of which are dental and orthopedic implants. Due to the widespread use of stainless steel 316L in the manufacturing of implants and the occurrence of cracks and residual stresses during the process of electrical discharge machining for the production of these products, the use of effective and economical polishing methods such as burnishing is effective in increasing the surface properties and compatibility of these products with living tissue. In this study, after performing the electrical discharge machining process on the surface of the sample and making the ball burnishing, the burnishing operations were performed by changing the input parameters and in accordance with the experiments designed using the mini tab software. Thus, the effect of variable burnishing force, feed speed and number of tool passes on surface roughness properties, micro-hardness and corrosion resistance of the final surface of the work piece were investigated. During the optimization of the response surface methodology, the optimal value for surface roughness, micro-hardness and surface corrosion rate of the samples were obtained, respectively, 0.108 µm, 435.34 Vickers and 2.18×10^5 respectively. Compared to the control sample, the surface roughness of the samples decreased by about 97% and the micro-hardness and corrosion resistance of the samples increased by about 2 and 11 times, respectively.

Keywords 316 L Stainless Steel, Electerical Discharge Machining, Ball Burnishing, Surface roughness, Micro hardness, Corrosion.

[1] Department of Mechanical Engineering, College of Mechanic, Electronic, Computer, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
[2] Department of Mechanical Engineering, College of Mechanic Najafabad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
[3] Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Tehran, North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

***Correspondence**
Address: Department of Mechanical Engineering, College of Mechanic Najafabad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
Phone: +98 (21) 88076139
Fax: -
p_saraeian@iau-tnb.ac.ir

Article History
Received: July 08, 2020
Accepted: November 20, 2020
ePublished: March 01, 2021

CITATION LINKS

[1] Dental implants materials and surface treatments. [2] Implant biomaterials: A comprehensive review. [3] Influence of EDM pulse energy on the surface… [4] Electro-discharge machining (EDM) versus hard turning and grinding… [5] Residual stress after EDM–FEM study and measurement results… [6] Surface integrity and corrosion performance of biomedical magnesium… [7] Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface… [8] Investigations on Effect of Different Ball Burnishing Conditions on Surface Roughness Using Response… [9] Laser-assisted burnishing of metals. [10] Effects of ball burnishing parameters on surface… [11] Impact wear behavior of ball burnished 316L stainless steel… [12] Effect of Ball Burnishing on Surface Roughness and Wear… [13] Parametric optimization of process parameter for roller burnishing … [14] How alumina nanoparticles impact surface … [15] Selection of optimal process parameters in sustainable diamond … [16] Optimization of interior roller burnishing process… [17] Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and… [18] Multi-response optimization of the roller burnishing process in terms of energy consumption and… [19] Optimization of the Burnishing Process for Energy Responses and... [20] Optimization of ball-burnishing process parameters on surface roughness, micro hardness of… [21] Determination of optimal small ball-burnishing parameters for both surface roughness and superficial hardness improvement of STAVAX. [22] Experimental investigation of the influence of burnishing tool passes on surface roughness and hardness of brass specimens. [23] Optimization of roller burnishing process on EN-9 grade alloy steel using response surface methodology. [24] Effect of working parameters on the surface integrity in cryogenic diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel with a novel diamond burnishing tool. [25] Effect of machining-induced surface integrity on the corrosion behavior of Al–Li alloy 2A97 in sodium chloride solution. [26] Impedance spectroscopic study of a steel electrode in condition of scaling and corrosion…

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مطالعه تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر زبری سطح، میکرو سختی و خوردگی فولاد ایمپلنت زنگ نزن 316L ماشین‌کاری شده توسط فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

مهدی برغمدی MSc
کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، برق، کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران ، ایران
پیام سرائیان *PhD
دکتری تخصصی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
صادق رحمتی PhD
دکتری تخصصی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، برق، کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران ، ایران
احسان شکوری PhD
دکتری تخصصی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران ، ایران

چکیده
امروزه انواع ایمپلنت‌ها با کاربردهای مختلف، جهت جایگزینی و یا حمایت از یک ساختار زیستی آسیب‌دیده مورد استفاده قرار می‌گیرند که از رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به ایمپلنت‌های دندانی و ارتوپدی اشاره نمود. با توجه به کاربرد گسترده فولاد زنگ نزن 316L در ساخت انواع ایمپلنت‌ها و بروز ترک و تنش‌های پسماند طی استفاده از فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی برای تولید این محصولات، بکارگیری روش‌های پرداخت مؤثر و باصرفه اقتصادی نظیر برنیشینگ، بر افزایش خواص سطحی و سازگاری این محصولات با بافت زنده تأثیرگذار است. در این پژوهش، پس از انجام فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی روی سطح نمونه و ساخت ابزار برنیشینگ ساچمه‌ای، عملیات برنیشینگ با تغییر پارامترهای ورودی و مطابق با آزمایش‌های طراحی‌شده با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب انجام شد و به این ترتیب، تأثیر متغیرهای نیروی برنیشینگ، سرعت پیشروی و تعداد عبور ابزار، بر خواص زبری سطح، میکرو سختی و مقاومت به خوردگی سطح پایانی قطعه کار مورد بررسی قرار گرفت. طی بهینه‌سازی انجام‌شده به روش سطح پاسخ، مقدار بهینه برای زبری سطح، میکرو سختی و نرخ خوردگی نمونه‌ها، به ترتیب، ۰/۱۰۸ میکرومتر، ۴۳۵/۳۴ ویکرز و $۲/۱۸\times۱۰^{۵}$ اهم، بدست آمد که در مقایسه با نمونه شاهد، زبری سطح نمونه‌ها در حدود ۹۷٪ کاهش‌یافته و میکرو سختی و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی به ترتیب، در حدود ۲ و ۱۱ برابر افزایش یافته است.

کلیدواژه‌ها: فولاد زنگ نزن 316L، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، برنیشینگ ساچمه‌ای، زبری سطح، میکرو سختی، خوردگی.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۳۰
*نویسنده مسئول: p_saraeian@iau-tnb.ac.ir

۱- مقدمه
همگام با رشد و پیشرفت علوم پزشکی، استفاده از انواع ایمپلنت‌ها (Implants) با کاربردهای مختلف رشد چشمگیری داشته است. به همین دلیل، طراحی و تولید ایمپلنت‌هایی با هندسه مناسب و عمر کاری بالا، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. از آنجائی‌که، ایمپلنت‌ها در بدن انسان به مرور زمان تحت تأثیر آسیب‌هایی نظیر خوردگی(Corrosion) و خستگی (Fatigue) قرار می‌گیرند. بنابراین دست‌یابی به روش‌هایی جهت کاهش آسیب‌ها و افزایش طول عمر این قطعات در بدن حائز اهمیت می‌باشد[1,2]. در همین راستا، استفاده از مواد سخت به علت خواص مطلوب این مواد در مصارف پزشکی و صنایع مختلفی از جمله هوافضا و خودروسازی در حال گسترش است. ماشین‌کاری این دسته از مواد به سبب سختی زیاد، مستلزم استفاده از روش‌های نوین ماشین‌کاری می‌باشد. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها، ماشین-کاری تخلیه الکتریکی (EDM) است که به طور گسترده‌ای در ماشین‌کاری مواد رسانا کاربرد دارد[3]. طی فرآیند تخلیه الکتریکی، دمای بسیار بالای ناشي از تخلیه الکترون‌ها، سبب ذوب موضعی و خروج بخشی از فلز در موضع ماشین‌کاری می‌شود. درحالی‌که قسمتی از ماده مذاب، دوباره منجمد شده و لایه سفید رنگی را روی سطح تشکیل می‌دهد. این لایه دوباره ریخته شده (Recast layer)، دارای تنش‌های پسماند (Residual stress) و شبکه‌ای از ترک‌های ریز است. این تنش‌ها، عمدتاً ناشی از انجماد غیر تعادلی و تغییرات متالورژیکی موضعی است که می‌توانند سبب گسترش ترک‌ها، افزایش میزان خوردگی و کاهش عمر مفید این محصولات شوند[4,5]. سطوح ماشین‌کاری شده طی فرآیند تخلیه الکتریکی، نیازمند انجام فرآیندهای نهایی جهت بهبود خواص هستند. در میان روش‌های مختلف پرداخت، استفاده از فرآیند برنیشینگ به دلیل سادگی فرآیند، قیمت پایین، قابلیت بکارگیری در ماشین‌های مختلف و انجام پرداخت بدون براده برداری بیش از سایر روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است[6,7]. عملیات برنیشینگ، جزء عملیات پایانی محسوب شده و به منظور افزایش کیفیت محصول انجام می‌شود. برنیشینگ یک فرآیند شکل‌دهی سرد می‌باشد که طی آن نیروی اعمال‌شده توسط ساچمه و یا غلتک‌ها در نقاط تماس با قطعه کار، سبب ایجاد تغییر شکل پلاستیک در آن می‌شود. تغییر شکل پلاستیک ایجادشده توسط ابزار برنیشینگ، سبب جریان سرد قله‌های زبری به سمت دره‌ها و از بین رفتن ناهمواری‌ها و آثار ابزار از روی سطح قطعات ماشین‌کاری شده و افزایش سختی، مقاومت سایشی، مقاومت در برابر خوردگی، عمر خستگی و کاهش زبری سطح قطعه کار را در پی دارد. علاوه بر آن، استفاده از فرآیند برنشینگ یکی از کارآمدترین روش‌ها برای ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح قطعات است که افزایش استحکام قطعات را در پی دارد[8-10]. طی پژوهشی تأثیر فرآیند برنیشینگ بر کاهش آسیب وارد بر سطح فولاد 316L تحت بار ضربه‌ای متناوب، مورد بررسی قرار گرفت. آزمون مقاومت سایشی (Impact Wear)، با فرکانس ۵ هرتز و نیروی ۴۵۰ نیوتن انجام شد و تأثیر سه سیکل مختلف بر مقاومت سایشی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان داد

که حجم از دست رفته طی این آزمون در نمونه برنیشینگ شده بین ۵۳٪ تا ۶۲٪، نسبت به نمونه برنیشینگ نشده کاهش یافته است[11]. طی بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند برنیشینگ ساچمه‌ای به روش سطح پاسخ، جهت بهبود کیفیت سطح و افزایش مقاومت به سایش در فولاد 316L، تأثیر پارامترهای نیرو، پیشروی و قطر ساچمه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که طی انجام عملیات برنیشینگ، زبری سطح قطعات به مقدار قابل‌توجهی کاهش یافته است. همچنین ترکیبی از مقدار متوسط برای قطر ساچمه، کمترین مقدار پیشروی و بیشترین مقدار برای نیرو به ازای سه بار عبور ابزار، کاهش زبری سطح، ضریب اصطکاک و نرخ سایش قطعات را به همراه داشته است[12]. طی بررسی تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند برنیشینگ بر زبری سطح فولاد ۴۳۴۰ AISI، نتایج نشان‌دهنده کاهش زبری سطح به دنبال افزایش تعداد عبور ابزار بود. درحالی‌که افزایش پیشروی، افزایش زبری سطح نمونه‌ها را به همراه داشت[13]. طی تحقیقی، خواص سطحی ۷۱۷۵ Al، طی فرآیند برنیشینگ غلتکی در دو حالت خشک و استفاده از نانو سیال آلومینا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از نانو ذرات آلومینا در این فرآیند، علاوه بر بهبود زبری سطح و میکرو سختی نمونه‌ها در مقایسه با حالت خشک، یک لایه نازک از سرامیک آلومینا نیز روی سطوح برنیشینگ شده ایجاد می‌نماید[14]. طی پژوهشی، تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ الماسی بر زبری سطح و سختی فولاد PH 17-4 با حداقل سیال روان‌کار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل و بهینه‌سازی انجام‌شده طی روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک چند هدفه نشان داد که سختی سطح نمونه‌ها با افزایش پیشروی و سرعت برنیشینگ کاهش‌یافته، درحالی‌که افزایش نیروی برنیشنگ، افزایش سختی نمونه‌ها را به دنبال داشته و کمترین مقدار برای زبری سطح، به ازای مقادیر متوسط برای سطوح ذکرشده حاصل شده است[15]. در پژوهشی دیگر، تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر کیفیت سطح فولاد AISI۱۰۴۵ با استفاده از روش سطح پاسخ، مورد بررسی قرار گرفت و برای تولید مجموعه‌ای از راه‌حل‌های مطلوب و تعیین بهترین شرایط ماشین‌کاری، یک الگوریتم تکاملی با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی شد. نتایج نشان داد که ادغام مدل سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک می‌تواند به عنوان رویکردی قدرتمند برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیندهای برنیشینگ در نظر گرفته شود و نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نیز حاکی از آن است که مقدار زبری سطح، با افزایش سرعت اسپیندل و عمق برنیشینگ ابتدا کاهش‌یافته و پس از عبور از نقطه بهینه با افزایش این پارامترها، افزایش یافته است[16]. طی تحقیقی، تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر زبری سطح، سختی و مقاومت به خوردگی فولاد ۱۰۴۵ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نیروی برنیشنگ، بیشترین تأثیر را بر زبری سطح و سختی سطح نمونه‌ها داشته است. علاوه بر آن، مقاومت نمونه‌های برنیشینگ شده در برابر خوردگی نیز طی روش پلاریزاسیون و امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت که نشان‌دهنده افزایش مقاومت به خوردگی در نمونه‌های برنیشینگ شده به ازای مقادیر بهینه بوده است. در نهایت نیز تغییرات فاز در نمونه‌ها با استفاده از روش پراش اشعه ایکس مورد مطالعه قرار گرفت[17]. نتایج حاصل از بهینه‌سازی فرآیند برنیشینگ، جهت بهبود زبری سطح و سختی برینل در فولاد H۱۳ نشان داد که زبری سطح و سختی برینل این نمونه‌ها، به ترتیب حدود ۸٪ و۳۰٪ نسبت به نمونه اولیه بهبود یافته است[18]. بهینه‌سازی فرآیند برنیشینگ طی روش سطح پاسخ و الگوریتم میکروژنتیک و بررسی تأثیر آن بر خواص سطحی فولاد SKD ۶۱ نشان داد، پیشروی و عمق برنیشینگ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر بهبود خواص سطحی نمونه‌ها داشته است[19]. بررسی تأثیر بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر رفتار خوردگی نمونه آلیاژی Mg-Zn-Ca نشان داد که طی فرآیند برنیشینگ، اعمال تنش فشاری و ایجاد نظم در آرایش دانه‌ها، بهبود رفتار خوردگی نمونه‌ها را در پی داشته است[20]. کاربرد گسترده ایمپلنت‌ها در جراحی‌های ارتوپدی و کاربردهای پزشکی سبب شده که ساخت‌وتولید ایمپلنت‌هایی با خواص مطلوب و سازگاری بالاتر با محیط بدن انسان، بیش از گذشته مورد توجه قرار گیرد. خوردگی یکی از مهم‌ترین آسیب‌هایی است که می‌تواند با ایجاد واکنش‌های شیمیایی ناخواسته، سبب بروز حساسیت، کاهش استحکام ایمپلنت، ایجاد التهاب و به دنبال آن، پس‌زدگی ایمپلنت شود. با توجه به کاربرد گسترده فولاد زنگ نزن 316L در ساخت انواع ایمپلنت‌ها، دست‌یابی به روش‌های مؤثر و باصرفه اقتصادی در جهت افزایش مقاومت به خوردگی و افزایش سختی این مواد حائز اهمیت است. ماشین‌کاری این دسته از مواد به سبب سختی بالا، مستلزم استفاده از روش‌های نوین ماشین‌کاری می‌باشد که در این میان ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را می‌توان به عنوان یکی از پرکاربردترین این روش‌ها برشمرد. طی پیشینه منابع مطالعه شده در این زمینه، تأثیر پارامترهای مختلف از جمله نیرو و سرعت برنیشینگ، تعداد عبور ابزار، پیشروی، جنس و هندسه ابزار، بر ویژگی‌ها و مشخصه‌های کیفی سطوح مواد ماشین‌کاری شده طی روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش، با توجه به عدم وجود تحقیقی پیرامون تأثیر فرآیند برنیشینگ بر سختی و خوردگی فولاد 316L طی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، به بررسی تأثیر پارامترهای نیروی برنیشینگ، سرعت پیشروی و تعداد عبور ابزار، بر زبری سطح، میکرو سختی و مقاومت به خوردگی فولاد ایمپلنت زنگ‌نزن 316L ماشین‌کاری شده طی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرداخته شده است.

۲- روش تجربی

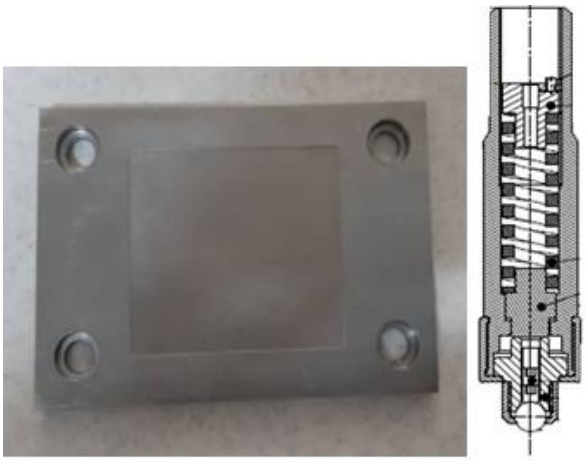
در این پژوهش، جهت انجام آزمایش‌ها از یک قطعه مکعبی به ابعاد ۱۲۰×۱۰۰×۱۰ میلی‌متر، از جنس فولاد زنگ نزن 316L استفاده‌شده که آنالیز عناصر تشکیل‌دهنده آن در جدول ۱، ارائه شده است.

این آنالیز، طی روش اسپکترسکوپی نشری و در محدوده دامنه گواهینامه استاندارد ISO/IEC۱۷۰۲۵ انجام شده است. سپس سطح نمونه ذکرشده با استفاده از ماشین تخلیه الکتریکی روبوفرم (۴۰۰ Roboform) ساخت سوئیس، ماشین‌کاری شد. به این ترتیب که پس از انجام پیش آزمایش و تعیین مقادیر مطلوب برای پارامترها، عملیات ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با ولتاژ ۴۵ ولت، جریان ۳۶ آمپر و زمان روشنی پالس ۳۰۰ میکروثانیه انجام گردید. در (شکل ۱)، نمایی از ابزار طراحی‌شده و نمونه ماشین‌کاری شده نشان داده شده است.

در ادامه، جهت بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر زبری سطح، میکرو سختی و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی، به معرفی پارامترها و سطوح آن‌ها پرداخته شده است. پارامترها و سطوح معرفی‌شده در جدول ۲، طی انجام پیش آزمایش و مراجعه به پیشینه تحقیقات انجام‌شده در این زمینه انتخاب گردیده است[6,20]. به طوری که در این پژوهش نیروی برنیشینگ، سرعت پیشروی و تعداد عبور ابزار از سطح قطعه کار، هر کدام در ۵ سطح مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی نمونه بر حسب درصد وزنی عناصر

نتایج کوانتومتری فولاد زنگ نزن ۳۱۶L							
Fe	c	Mo	Cr	N	Si	B	P
۵۵/۴۲۳	۰/۰۲۷	۱/۸۰۵	۱۷/۹۳۷	۹/۷۱۴	۰/۵۷۵	۹/۰۳۵ ppm	۱۵/۰۴۵ ppm
Cu	V	Nb	Al	Mn	Co	Sn	Ti
۰/۱۷۸	۰/۱۴۰	۰/۰۳۲	۰/۰۳۹	۰/۹۴۳	۰/۱۶۶	۷۲/۲۷ ppm	۹۸/۴۴۱ ppm



شکل ۱) نمایی از ابزار برنیشینگ ساچمه‌ای طراحی‌شده و نمونه ماشین‌کاری شده به روش تخلیه الکتریکی

جدول ۲) پارامترها و سطوح آزمایش

نمایش متغیرها	پارامترهای ورودی	سطح ۱ +۲	سطح ۲ +۱	سطح ۳ ۰	سطح ۴ -۱	سطح ۵ -۲
X_1	نیروی برنیشینگ(N)	۱۵۰	۳۰۰	۴۵۰	۶۰۰	۷۵۰
X_2	سرعت پیشروی(mm/min)	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰
X_3	تعداد عبور ابزار	۱	۲	۳	۴	۵

با توجه به تعداد پارامترها و سطوح آن‌ها، در صورت استفاده از روش فاکتوریل کامل، تعداد ۵۳ آزمایش قابل انجام می‌باشد که با توجه به زمان و هزینه بالای مورد نیاز جهت انجام کامل آزمایش‌ها، از نرم‌افزار آماری مینی‌تب ۱۷ استفاده گردیده است و به این ترتیب با استفاده از روش سطح پاسخ surface Response methodology (RSM) و طراحی مرکب مرکزی Central Composite Design (CCD)، تعداد کل آزمایش‌ها به ۲۰ عدد کاهش یافته است. سپس، با بستن قطعه کار و استقرار ابزار برنیشینگ کالیبره شده توسط دینامومتر Kistler مدل ۹۲۵۷ BA با آستانه ۰/۰۱> نیوتن، در ماشین فرز Deckel Maho مدل TNC 310، شرایط لازم برای انجام عملیات برنیشینگ مهیا گردید. به این ترتیب که ابتدا با استفاده از آزمون فشردگی (compressive test)، مقدار ثابت فنر تعیین گردید (K=185 N/mm) و سپس با بستن دینامومتر و در نظر گرفتن مقدار ۰/۷ میلی‌متر پیش فشردگی، مقدار نیروی اعمال‌شده به ازای هر میلی‌متر فشردگی فنر اندازه‌گیری شد. برای تنظیم میزان فشردگی فنر و اعمال نیروی مورد نیاز طی آزمایش از پیچ مستقر در انتهای ابزار استفاده‌شده و طوری تنظیم‌شده که به ازای هر میلی‌متر جابجایی، نیرویی معادل ۱۵۸ نیوتن اعمال می‌شود. سپس همان طور که در (شکل ۲) نشان داده شده است، عملیات برنیشینگ با گام ثابت ۰/۲ میلی‌متر بصورت رفت و برگشتی در راستای مشخص‌شده بر روی شکل، انجام گردید.

آزمایش‌ها، مطابق جدول ۳ روی نمونه‌ها انجام گردید و به منظور کاهش اصطکاک، از روغن بهران K۸۶ به عنوان روان‌کار استفاده شده است.

شکل ۲) نمایی از نحوه انجام آزمایش

جدول ۳) طراحی آزمایش انجام‌شده به روش سطح پاسخ

تعداد عبور ابزار	سرعت پیشروی (mm/min)	نیروی برنیشینگ(N)	شماره آزمایش
۴	۴۰۰	۶۰۰	۱
۴	۸۰۰	۶۰۰	۲
۲	۴۰۰	۳۰۰	۳
۲	۸۰۰	۳۰۰	۴
۴	۸۰۰	۳۰۰	۵
۳	۶۰۰	۷۵۰	۶
۳	۶۰۰	۱۵۰	۷
۲	۸۰۰	۶۰۰	۸
۳	۶۰۰	۴۵۰	۹
۴	۴۰۰	۳۰۰	۱۰
۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۱
۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۲
۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۳
۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۴
۳	۲۰۰	۴۵۰	۱۵
۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۶
۳	۱۰۰۰	۴۵۰	۱۷
۵	۶۰۰	۴۵۰	۱۸
۲	۴۰۰	۶۰۰	۱۹
۱	۶۰۰	۴۵۰	۲۰

مقدار زبری سطح نمونه‌ها با استفاده از دستگاه زبری سنج Mitutoyo مدل SV-C ۳۲۰۰ با رزولوشن ۰/۰۲ میکرومتر، مطابق با استاندارد ISO ۱۳۰۲ و در راستای عمود بر حرکت ابزار برنشینگ روی نمونه اندازه‌گیری شده است.

همچنین میکرو سختی نمونه‌ها نیز توسط سختی سنج Mitech مدل HVS-۱۰۰۰ با دقت ۰/۰۲۵ میکرومتر و بازه اندازه‌گیری ۳۰۰۰-۵ ویکرز، طی استاندارد ISO ٦٥٠٧-١ اندازه‌گیری شد.

در ادامه، مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی با استفاده از دستگاه آزمون خوردگی Ivium با حد تفکیک پتانسیل ۲ نانو ولت و طی روش اسپکتروسکوپی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) با استاندارد ISO ١٦٧٧٣-٢، مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و نتایج حاصل از آزمون خوردگی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل خوردگی Ivium soft مورد تحلیل قرار گرفته است. جهت آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمون و به منظور جلوگیری از ایجاد تنش، ابتدا هر یک از قسمت‌های برنیشینگ شده، با استفاده از اره دستی و آب صابون، به آرامی برش خورده و از صفحه اصلی جدا شدند. سپس به غیر از سطح برنیشینگ شده، سایر قسمت‌های هر نمونه به وسیله مانت (Munting) پوشانیده شده و سپس با اتصال هر یک از نمونه‌ها به سیم مسی روکش دار، نمونه‌ها جهت آزمون خوردگی آماده‌سازی گردیده است. جهت انجام آزمون خوردگی، با توجه به کاربرد این نوع فولاد در ساخت ایمپلنت‌ها از محلول الکترولیت رینگر (Ringer's)، ساخت شرکت داروپخش استفاده شد. جهت مطابقت شرایط آزمایش با محیط بدن انسان، مقدار PH محلول ۷/۲ و دمای آزمایش ۳۷/۱ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. مقدار عناصر و ترکیب شیمیایی محلول الکترولیت استفاده‌شده در این تحقیق، در جدول ٤ ارائه شده است.

به این ترتیب، سلول الکتروشیمیایی متشکل از الکترود کاری مانت شده، الکترود مرجع از جنس نقره، الکترود شمارنده از جنس پلاتین و محلول الکترولیت رینگر تهیه شد و آزمون خوردگی روی نمونه‌ها انجام گردید. در این پژوهش، به منظور محاسبه نرخ خوردگی نمونه‌ها با استفاده از روش اسپکتروسکوپی امپدانس الکتروشیمیایی، ابتدا پتانسیل صفر نمونه‌ها، با استفاده از روش پلاریزاسیون مدار باز (OCP) اندازه‌گیری شد. طی این روش الکترود کاری و الکترود مرجع بدون اعمال پتانسیل خارجی طی مدت ۱۰۰ ثانیه داخل الکترولیت قرار داده شد و پس از تعادل جریان آندی و کاتدی، مقدار پتانسیل آرامش به دست آمده به عنوان پتانسیل مدار باز ثبت گردید. سپس پتانسیلی در حدود ۱۰ میلی ولت در محدوده‌ی فرکانسی ۱۰۰۰۰۰-۰/۱ کیلوهرتز اعمال شد و مقادیر مربوط به امپدانس خوردگی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار تحلیل خوردگی Ivium soft و انطباق نتایج بر روی مدار معادل الکتروشیمیایی، طی نمودارهای نایکوئیست و باد (Bod) ارائه گردید. همچنین ساختار سطحی نمونه‌ها نیز با استفاده از میکروسکوپ IMM -٤٢٠ با بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر مورد بررسی قرار گرفته است.

در ادامه، به منظور ایجاد امکان مقایسه و بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر کمیت‌های مورد بررسی، مقدار زبری، میکرو سختی و خوردگی نمونه برنشینگ نشده نیز به عنوان نمونه شاهد اندازه‌گیری شد. پس از انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری کمیت‌های مورد بررسی، نتایج با استفاده از نرم‌افزار مینی تب ۱۷ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و در نهایت نیز بهترین مقادیر برای پارامترهای فرآیند برنشینگ به منظور بهبود کیفیت سطح، افزایش میکرو سختی و مقاومت به خوردگی نمونه‌ها تعیین گردید. در این پژوهش به منظور اطمینان از صحت مقادیر به‌دست آمده، هر آزمون، سه بار تکرار شده است.

۳- تفسیر و تحلیل نتایج

پس از انجام عملیات برنیشینگ و اندازه‌گیری مقادیر مربوط به زبری سطح، میکرو سختی و مقاومت نمونه‌ها به خوردگی در هر حالت فرآیندی مطابق جدول ۵، به تجزیه و تحلیل آماری نتایج با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب پرداخته شد.

جدول ۴) ترکیب شیمیایی الکترولیت

مشخصات محلول رینگر در هر ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول	
کلراید سدیم	۰/۸۶ گرم
کلراید پتاسیم	۰/۰۳ گرم
دی هیدرات کلراید کلسیم	۰/۰۳۳ گرم

جدول ۵) مقادیر اندازه‌گیری شده برای زبری سطح نمونه‌ها به ازای سطوح کد شده

مقاومت به خوردگی (Ω/cm2)	میکرو سختی (HV)	زبری سطح (µm)	تعداد عبور ابزار	سرعت پیشروی (mm/min)	نیروی برنیشینگ (N)	شماره آزمایش
۲/۲۴×۱۰^۵	۴۱۰	۰/۱۱۷	۴	۴۰۰	۶۰۰	۱
۲/۰۸×۱۰^۵	۴۱۷	۰/۱۱۸	۴	۸۰۰	۶۰۰	۲
۱/۰۴×۱۰^۵	۳۶۵	۰/۲۷۰	۲	۴۰۰	۳۰۰	۳
۱×۱۰^۵	۳۵۳	۰/۳۰۰	۲	۸۰۰	۳۰۰	۴
۱/۲۱×۱۰^۵	۳۴۲	۰/۱۷۷	۴	۸۰۰	۳۰۰	۵
۱/۶۳×۱۰^۵	۴۵۳	۰/۱۴۰	۳	۶۰۰	۷۵۰	۶
۰/۰۹×۱۰^۵	۳۴۲	۰/۵۴۲	۳	۶۰۰	۱۵۰	۷
۲/۰۳×۱۰^۵	۴۲۰	۰/۱۱۹	۲	۸۰۰	۶۰۰	۸
۱/۹۷×۱۰^۵	۴۲۴	۰/۱۳۰	۳	۶۰۰	۴۵۰	۹
۱/۴۸×۱۰^۵	۳۶۰	۰/۱۴۸	۴	۴۰۰	۳۰۰	۱۰
۱/۸۲×۱۰^۵	۴۱۴	۰/۱۳۴	۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۱
۱/۸۵×۱۰^۵	۴۲۰	۰/۱۳۳	۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۲
۲/۰۱×۱۰^۵	۴۱۹	۰/۱۲۳	۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۳
۱/۹۴×۱۰^۵	۴۱۵	۰/۱۳۳	۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۴
۲/۴۶×۱۰^۵	۴۸۳	۰/۱۱۳	۳	۲۰۰	۴۵۰	۱۵
۱/۶۸×۱۰^۵	۴۱۸	۰/۱۳۸	۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۶
۱/۳۱×۱۰^۵	۳۹۶	۰/۱۷۷	۳	۱۰۰۰	۴۵۰	۱۷
۱/۹۵×۱۰^۵	۴۰۴	۰/۱۳۲	۵	۶۰۰	۴۵۰	۱۸
۲/۱۵×۱۰^۵	۴۴۰	۰/۱۱۷	۲	۴۰۰	۶۰۰	۱۹
۱/۱۲×۱۰^۵	۳۹۹	۰/۲۳۸	۱	۶۰۰	۴۵۰	۲۰

۳-۱- تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر زبری سطح نمونه‌ها

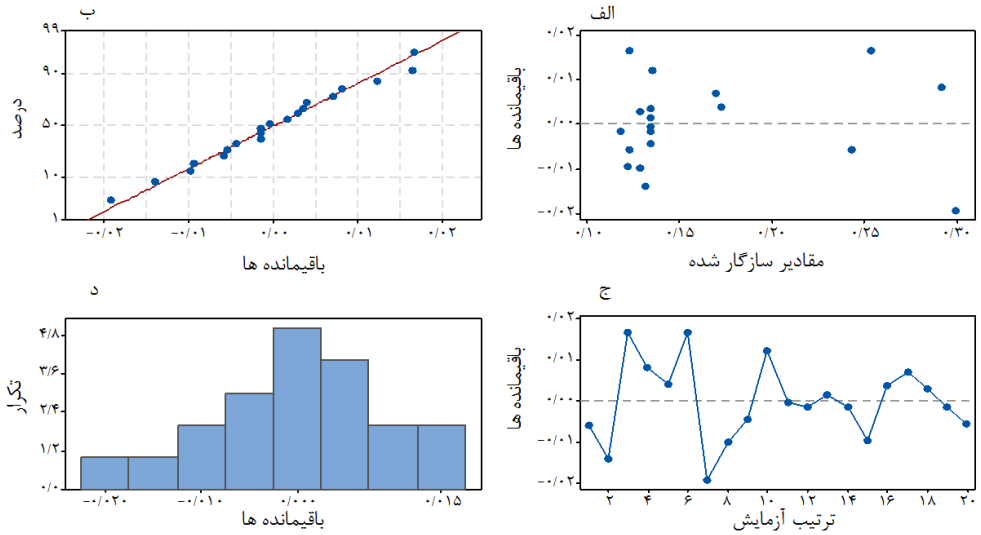
پس از انجام مدل‌سازی، ابتدا با توجه به شکل ۳، کفایت مدل ریاضی مورد بررسی قرار گرفته است. به این ترتیب، طی نمودار شکل ۳-الف که مربوط به باقی‌مانده‌ها است، مقادیر از روند خاصی تبعیت نمی‌کنند، بنابراین می‌توان گفت، مقدار واریانس بین داده ها ثابت است.

در نمودار شکل ۳-ب که مربوط به نرمال بودن مقادیر است، مشاهده می‌شود که نقاط با فاصله مناسبی نسبت به خط رسم شده قرار دارند که نشان دهنده نرمال بودن مقادیر می‌باشد. همچنین در نمودار شکل ۳-ج مشاهده می‌شود که عوامل مستقل از زمان بوده و تغییرات آنها از روند خاصی پیروی نمی‌کند و در نمودار شکل ۳-د، نمودار حالت گاوسی دارد که نشان می‌دهد، داده‌ها از یک جمعیت نرمال به دست آمده‌اند. پس از بررسی کفایت مدل، به منظور بررسی اهمیت نسبی پارامترها، از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد. طی (جدول ۶)، آنالیز واریانس برای زبری سطح نمونه‌ها ارائه شده است.

در این آنالیز، مقایسه انحراف کل نمونه‌ها با استفاده از آزمون F و تعیین سطوح معنادار نیز با استفاده از مقدار P-Value انجام شده است. از آنجایی که پارامترها با سطح اطمینان ۹۵٪ مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از ۰/۰۵ برای P-Value، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته می‌شوند. همان طور که در (جدول ٦) مشاهده می‌شود، مقدار P-Value برای مدل رگرسیون، جملات خطی و برخی از جملات مربعی و تعاملی، کوچک‌تر از سطح

جدول ۶) آنالیز واریانس مربوط به زبری سطح نمونه‌ها

منبع	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار-F	مقدار-P
مدل	۹	۰/۰۶۵۷	۰/۰۰۷۳	۴۲/۹۳	۰/۰۰۰
خطی	۳	۰/۰۴۶۳	۰/۰۱۵۰	۹۰/۸۴	۰/۰۰۰
X_1	۱	۰/۰۳۰۹	۰/۰۳۰۹	۱۸۲/۱۵	۰/۰۰۰
X_2	۱	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۲۲	۱۳/۲۷	۰/۰۰۵
X_3	۱	۰/۰۱۳۱	۰/۰۱۳۱	۷۷/۰۹	۰/۰۰۰
مربعی	۳	۰/۰۱۱۵	۰/۰۰۳۸	۲۲/۶۱	۰/۰۰۰
X_1^2	۱	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۹۲	۵۴/۵۳	۰/۰۰۰
X_2^2	۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۱/۲۹	۰/۲۸۲
X_3^2	۱	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۴۲	۲۴/۸۱	۰/۰۰۱
تعاملی	۳	۰/۰۰۷۸	۰۰/۰۰۲۶	۱۵/۳۶	۰/۰۰۰
$X_1 \cdot X_2$	۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳	۲/۳۱	۰/۱۶۰
$X_1 \cdot X_3$	۱	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۷۴	۴۳/۷۶	۰/۰۰۰
$X_2 \cdot X_3$	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰	۰/۹۵۸
کل	۱۹	۰/۰۶۷۴	-	-	-



شکل ۳) بررسی کفایت مدل برای زبری سطح نمونه‌ها

معنادار ۰/۰۵ است که نشان می‌دهد که این پیش‌بینی کننده‌ها، تأثیر قابل‌توجهی بر جواب داشته‌اند. همچنین ضریب انطباق یا سازگاری مدل R^2_{adj} یا R^2 منطبق شده نیز، ۹۵/۲۱٪ بدست آمد که به این معنا است که حدود ۹۵٪ از داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده است. به این ترتیب، معادله رگرسیون برای زبری سطح نمونه‌ها طی (معادله ۱) ارائه شد.

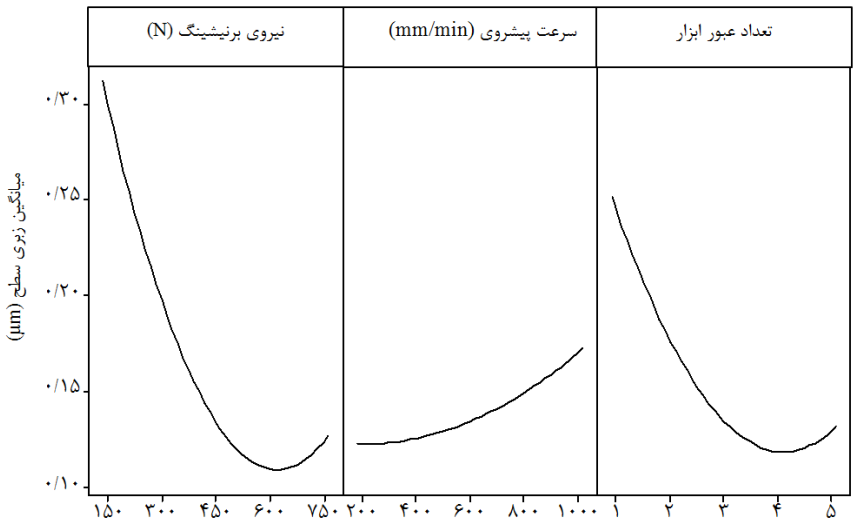
$$\begin{aligned}\text{Surface Roughness}(\mu\text{m}) &= 0.8419 - 0.001532X_1 \\ &+ 0.000079X_2 - 0.1971\,X_3 \\ &+ 0.000001\,X_1^2 + 0.01295\,X_3^2 \\ &+ 0.000203\,X1 \times X3 \\ &- 0.000001\,X2 \times X3\end{aligned} \quad (۱)$$

سپس، جهت تعیین مؤثرترین پارامتر بر فرآیند، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب زبری سطح نمونه‌ها ترسیم شد. همان طور که در شکل ٤ مشاهده می‌شود، بعد از نیروی برنیشینگ، تعداد عبور ابزار، بیشترین تأثیر را بر کنترل زبری سطح نمونه‌ها داشته است.

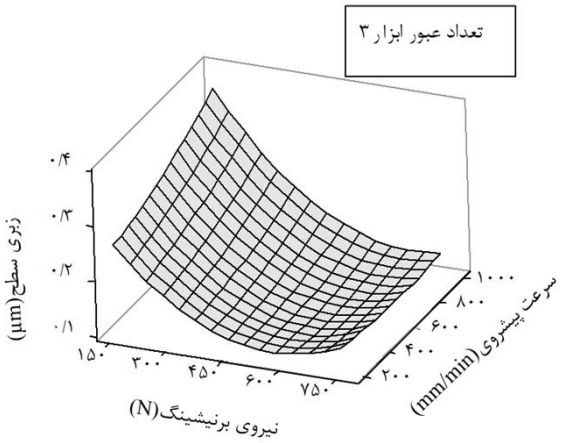
مطابق شکل ۴، افزایش نیروی برنیشینگ تا ٦۰۰ نیوتن، کاهش زبری سطح نمونه‌ها را در پی داشته است. درحالی‌که با افزایش نیروی برنیشینگ به مقادیر بالاتر از ٦۰۰ نیوتن، زبری سطح نمونه‌ها افزایش یافته است. زیرا همان طور که در برخی منابع به آن اشاره‌شده، با افزایش نیروی برنیشینگ تا حد معینی، میزان تغییر شکل پلاستیک ایجادشده در سطح نمونه‌ها افزایش‌یافته و به دنبال آن میزان پرشدگی دره‌ها توسط قله‌های زبری افزایش می‌یابد و به این ترتیب از زبری سطح نمونه‌ها کاسته می‌شود. این در حالی است که افزایش بیش از اندازه نیروی برنیشینگ، می‌تواند با ایجاد لرزش در ابزار، سبب ایجاد ترک، پوسته‌پوسته شدن (Flaking) سطح و کاهش کیفیت سطح برنیشینگ شده گردد[8,21]. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی، زبری سطح افزایش یافته است. همان طور که در منابع به آن اشاره‌شده، با افزایش سرعت پیشروی، تماس ابزار با قطعه کار در واحد زمان، کاهش‌یافته و زمان کافی برای مسطح نمودن لبه‌های برآمده (Bulged Edges)، فراهم نشده و به این ترتیب زبری سطح افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت پیشروی، فاصله میان مسیر ایجادشده توسط ابزار روی قطعه کار افزایش‌یافته و کیفیت سطح کاهش می‌یابد[8]. در ادامه، مشاهده می‌شود که افزایش تعداد عبور ابزار در ابتدا کاهش زبری سطح نمونه‌ها را به همراه داشته و با ادامه روند افزایش آن، زبری سطح نمونه‌ها افزایش یافته است، به طوری که، کمترین مقدار برای زبری سطح به ازای ٤ بار عبور ابزار از سطح نمونه حاصل شده است. زیرا، با افزایش تعداد عبور ابزار و به دنبال آن افزایش تغییر شکل پلاستیک در سطح نمونه، زبری سطح در هر مرحله نسبت به مرحله قبل بهبود می‌یابد، ولی ادامه روند افزایش تعداد عبور ابزار و در پی آن ایجاد کارسختی بالا در نمونه، پوسته‌پوسته شدن سطح و افزایش زبری سطح را به همراه دارد که در برخی از منابع به آن اشاره شده است[21,22]. تأثیر تعاملی پارامترهای فرآیند بر زبری سطوح برنیشینگ شده نیز در شکل‌های ٥، ٦ و٧ مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ٥، روند کاهش زبری سطح، با افزایش نیروی برنیشینگ و کاهش سرعت پیشروی، مشهود می‌باشد، به‌طوری‌که کمترین زبری سطح به ازای نیروی برنیشینگ ٦۰۰ نیوتن و سرعت پیشروی ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه حاصل شده است.

بر اساس منابع بررسی‌شده در این زمینه، افزایش نیروی برنیشینگ تا مقدار مشخصی، سبب افزایش جریان مواد از قله‌های زبری به سمت دره‌ها شده و کاهش سرعت پیشروی نیز، با افزایش زمان تماس ابزار با قطعه کار و کاهش فواصل میان آثار ابزار روی سطح قطعه، کاهش زبری سطح را در پی دارد[16].

همان طور که در شکل ٦ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد عبور ابزار، ابتدا زبری سطح نمونه‌ها کاهش‌یافته و ادامه روند افزایش تعداد عبور ابزار، افزایش زبری سطح نمونه‌ها را در بر داشته است. به طوری که کمترین زبری سطح به ازای نیروی ٦۰۰ نیوتن و ٤

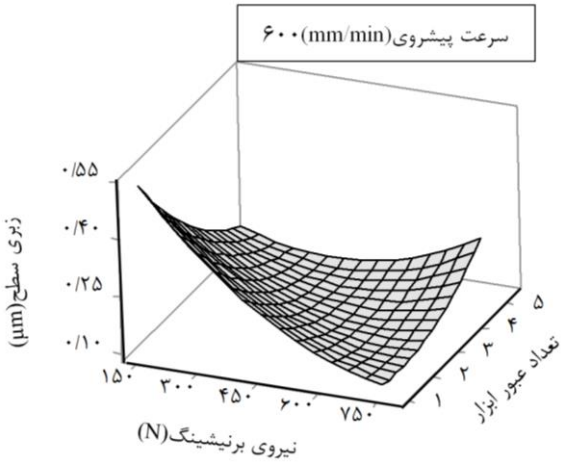


شکل ۴) مقایسه میزان تأثیر پارامترهای فرآیند بر زبری سطح نمونه‌ها



شکل ۵) تغییرات زبری سطح بر حسب نیروی برنیشینگ و سرعت پیشروی (تعداد عبور ابزار ۳)

بار عبور ابزار حاصل شده است. زیرا مطابق با مقالات بررسی‌شده، در ابتدا با افزایش تعداد عبور ابزار، میزان تغییر شکل پلاستیک ایجادشده بر روی سطح نمونه افزایش‌یافته و به این ترتیب زبری سطح کاهش می‌یابد. در صورتی که با افزایش تعداد عبور ابزار به مقادیر بالاتر از ٤ عبور، به دلیل افزایش حرارت و تخریب و پوسته‌پوسته شدن سطح در موضع ماشین‌کاری، زبری سطح افزایش می‌یابد[8,21]. به همین ترتیب نیز می‌توان کاهش زبری سطح با افزایش تعداد عبور ابزار را به ازای نیروهای پایین‌تر و افزایش زبری سطح با افزایش تعداد عبور ابزار به ازای نیروهای بالاتر را توجیه نمود. به ازای اعمال نیروهای پایین‌تر، افزایش تعداد عبور ابزار سبب افزایش تغییر شکل پلاستیک شده و کاهش زبری سطح را سبب می‌شود، این در حالی است که طی اعمال نیروهای بالاتر، روند جریان مواد به راحتی رخ می‌دهد و افزایش تعداد عبور ابزار، منجر به افزایش حرارت، تخریب و فلسی شدن سطح می‌شود که افزایش زبری سطح را به همراه دارد.



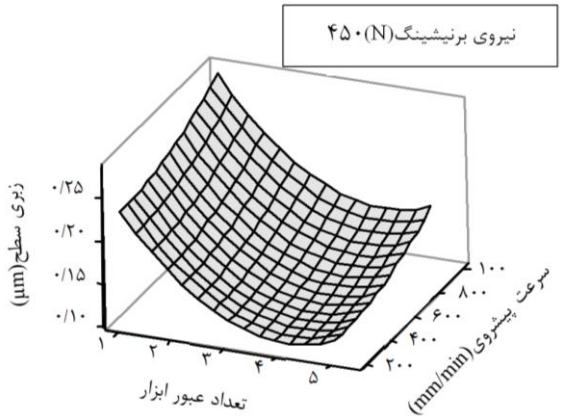
شکل ۶) تغییرات زبری سطح بر حسب نیروی برنیشینگ و تعداد عبور ابزار (سرعت پیشروی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه)

مطابق شکل ۷، کاهش سرعت پیشروی، توأم با افزایش تعداد عبور ابزار تا ٤ بار، کاهش زبری سطح نمونه‌ها را دربر داشته است. زیرا مطابق با پیشینه تحقیقات انجام‌شده، با کاهش سرعت پیشروی، تماس ابزار با سطح نمونه در واحد زمان افزایش می‌یابد که کاهش زبری سطح نمونه‌ها را سبب می‌شود[23].

۳-۲- تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر خواص میکرو سختی نمونه‌ها

پس از انجام عملیات برنیشینگ و اندازه‌گیری مقادیر مربوط به میکرو سختی نمونه‌ها در هر حالت فرآیندی، آنالیز واریانس برای میکرو سختی نمونه‌ها، در جدول ۷ ارائه شده است.

در این آنالیز نیز پارامترها با سطح اطمینان ۹۵٪ مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از ۰/۰۵ برای P-Value، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته می‌شوند و صحت مدل نیز با استفاده از R^2 ها در جدول آنالیز واریانس تعیین می‌گردد. به طوری که ضریب انطباق یا سازگاری مدل حدود ۹۸٪ بدست آمده است.



شکل ۷) تغییرات زبری سطح بر حسب سرعت پیشروی و تعداد عبور ابزار (نیروی برنیشینگ ۴۵۰ نیوتن)

جدول ۷) آنالیز واریانس مربوط به میکرو سختی نمونه‌ها

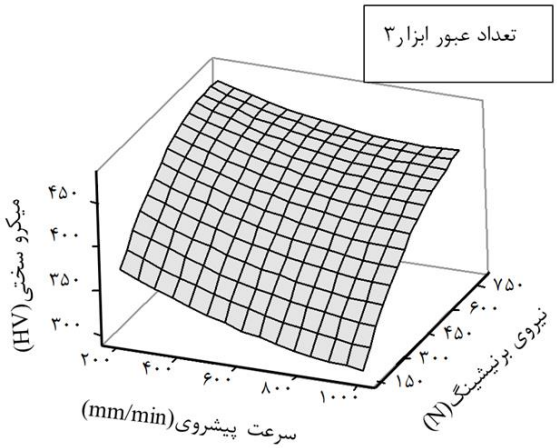
منبع	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار-F	مقدار-P
مدل	۹	۲۳۱۱۳/۲	۲۵۶۸/۱	۸۸/۹۲	۰/۰۰۰
خطی	۳	۱۸۲۳۳	۶۰۷۷/۷	۲۱۰/۴۳	۰/۰۰۰
X_1	۱	۱۷۹۵۶	۱۷۹۵۶	۶۲۱/۷۱	۰/۰۰۰
X_2	۱	۱۹۶	۱۹۶	۶/۷۶	۰/۰۲۶
X_3	۱	۸۱	۸۱	۲/۸۰	۰/۱۲۵
مربعی	۳	۱۸۷۱/۲	۶۲۳/۷	۲۱/۶۰	۰/۰۰۰
X_1^2	۱	۱۶۶۴/۵	۱۶۶۴/۵	۵۷/۶۳	۰/۰۰۰
X_2^2	۱	۳۵۵/۷	۳۵۵/۷	۱۲/۳۲	۰/۰۰۶
X_3^2	۱	۴۰۴/۶	۴۰۴/۶	۱۴/۰۱	۰/۰۰۴
تعاملی	۳	۳۰۰۹	۱۰۰۳	۳۴/۷۳	۰/۰۰۰
$X_1 \cdot X_2$	۱	۱۱۰۴/۵	۱۱۰۴/۵	۳۸/۲۴	۰/۰۰۰
$X_1 \cdot X_3$	۱	۱۵۱۲/۵	۱۵۱۲/۵	۵۲/۳۷	۰/۰۰۰
$X_2 \cdot X_3$	۱	۳۹۲	۳۹۲	۱۳/۵۷	۰/۰۰۴
کل	۱۹	۲۳۴۰۲	-	-	-

به این ترتیب، معادله رگرسیون برای میکرو سختی نمونه‌ها، طی معادله ۲ ارائه شده است.

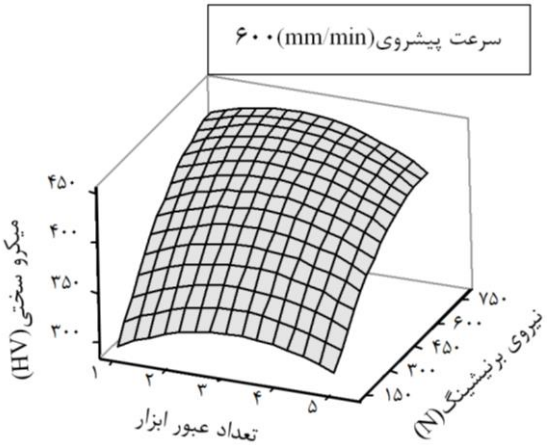
$$\begin{aligned}\text{Micro Hardness (HV)} &= 109.3 + 0.5888\,X_1 \\ &+ 0.0241\,X_2 + 84.1\,X_3 \\ &- 0.000362\,X_1^2 \\ &- 0.000094\,X_2^2 - 4.01\,X_3^2 \\ &+ 0.000392\,X_1 \times X_2 \\ &- 0.0917\,X_1 \times X_3 \\ &- 0.03500\,X_2 \times X_3\end{aligned} \qquad (۲)$$

جهت تعیین مؤثرترین پارامتر بر فرآیند، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب میکرو سختی نمونه‌ها ترسیم شد. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، بعد از نیروی برنیشینگ، سرعت پیشروی بیشترین تأثیر را بر میکرو سختی نمونه‌ها داشته است. در ادامه نیز تأثیر تعاملی پارامترهای فرآیند بر میکرو سختی سطوح برنیشینگ شده، در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ مورد بررسی قرار گرفته است.

همان‌طورکه در شکل ۹ مشاهده می‌شود، کاهش سرعت پیشروی توأم با افزایش نیروی برنیشینگ تا ۶۰۰ نیوتن، افزایش میکرو سختی نمونه‌ها را در پی داشته است. در شکل ۱۰ مشاهده

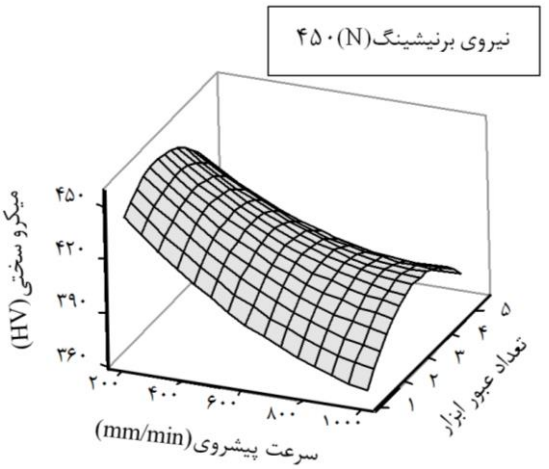


شکل ۹) تغییرات میکرو سختی بر حسب نیروی برنیشینگ و سرعت پیشروی (تعداد عبور ابزار ۳)

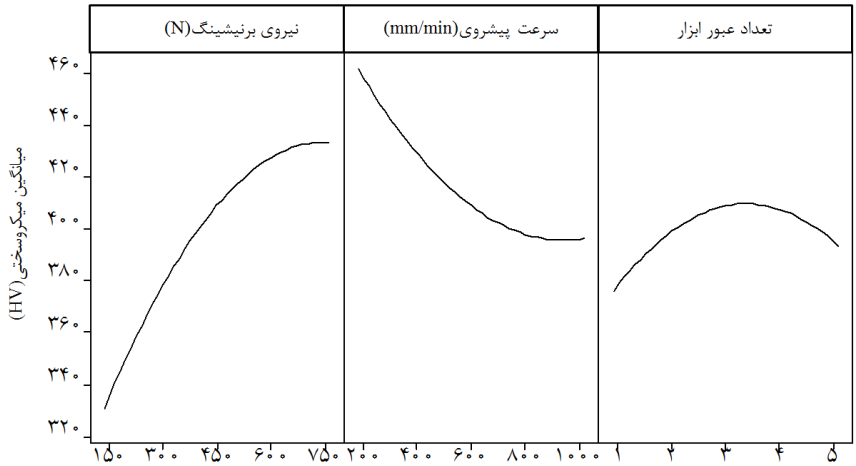


شکل ۱۰) تغییرات میکرو سختی بر حسب نیروی برنیشینگ و تعداد عبور ابزار (سرعت پیشروی ۶۰۰ دور بر دقیقه)

می‌شود که افزایش تعداد عبور ابزار تا ۳ بار عبور، توأم با افزایش نیروی برنیشینگ تا ۶۰۰ نیوتن، افزایش میکرو سختی نمونه‌ها را سبب شده است و در شکل ۱۱ نیز مشاهده می‌شود که کاهش



شکل ۱۱) تغییرات میکرو سختی بر حسب تعداد عبور ابزار و سرعت پیشروی (نیروی برنیشینگ ۴۵۰ نیوتن)



شکل ۸) مقایسه میزان تأثیر پارامترهای فرآیند بر میکرو سختی نمونه‌ها

سرعت پیشروی توأم با افزایش تعداد عبور ابزار تا ۳ بار عبور، افزایش میکرو سختی نمونه‌ها را به دنبال داشته است.

همان‌طورکه در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، افزایش نیروی برنیشینگ تا ۶۰۰ نیوتن، افزایش میکرو سختی نمونه‌ها و ادامه روند افزایش نیروی برنیشینگ، کاهش میکرو سختی نمونه‌ها را در پی داشته است. زیرا همان طور که در برخی منابع به آن اشاره شده، با اعمال نیروی برنیشینگ به مقداری فراتر از استحکام تسلیم، میزان تغییر شکل پلاستیک ایجادشده در سطح نمونه‌ها افزایش می‌یابد که افزایش کارسختی نمونه‌ها را سبب می‌شود. این در حالی است که افزایش بیش از اندازه نیروی برنیشینگ می‌تواند سبب پوسته‌پوسته شدن سطح و ایجاد ترک در لایه زیرسطحی شده و کاهش میکرو سختی نمونه‌ها را سبب شود[21,23].

همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی، مقدار میکرو سختی نمونه‌ها کاهش یافته است. زیرا با افزایش سرعت پیشروی، زمان تماس ابزار با قطعه کار در واحد زمان کاهش‌یافته و مقدار سطحی از قطعه‌کار که در واحد زمان تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد، کاهش می‌یابد که کاهش سختی نمونه‌ها را به دنبال دارد. همچنین بی‌نظمی ایجادشده در ایجاد تغییر شکل پلاستیک روی نمونه به ازای سرعت پیشروی بالا نیز، از دیگر عوامل کاهش سختی نمونه‌ها در این حالت می‌باشد که در برخی از مقالات به آن اشاره شده است[16,21,24].

همچنین در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد عبور ابزار تا ۳ بار عبور، مقدار میکرو سختی نمونه‌ها افزایش‌یافته و ادامه روند افزایش تعداد عبور، کاهش میکرو سختی نمونه‌ها را در پی داشته است. زیرا همان طور که در برخی از مراجع بیان شده است، با افزایش تعداد عبور ابزار از روی سطح و به دنبال آن افزایش تغییر شکل پلاستیک در سطح نمونه، جریان مواد از سمت قله‌های زبری به سمت دره‌ها افزایش می‌یابد و ساختار یکنواخت‌تر و سطح صیقلی‌تری ایجاد می‌شود که نتیجه آن افزایش سختی نمونه‌ها می‌باشد، درحالی‌که افزایش حرارت و تخریب سطح ناشی از افزایش بیش از حد تعداد عبور، کاهش سختی نمونه‌ها را نتیجه می‌دهد[21,23].

۳-۳- تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر رفتار خوردگی نمونه‌ها

پس از اندازه‌گیری مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی مطابق با روش و استاندارد ذکرشده، به بررسی اهمیت نسبی پارامترها روی خروجی آزمایش با استفاده از آنالیز واریانس پرداخته شده است. در جدول ۸، آنالیز واریانس برای مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی ارائه شده است. طی آنالیز انجام‌شده، پارامترها با سطح اطمینان ۹۵٪ مدل شده‌اند و ضریب انطباق یا سازگاری مدل، ۹۳٪ بدست آمد.

به این ترتیب، معادله رگرسیون برای مقاومت به خوردگی نمونه‌ها در معادله ۳ ارائه گردید.

جدول ۸) آنالیز واریانس مربوط به مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی

منبع	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار-F	مقدار-P
مدل	۹	۳۳۵۶۱۲۳۸۶۴	۳۷۲۹۰۶۹۳۱۸	۵/۸۱	۰/۰۰۶
خطی	۳	۲۶۰۶۷۱۸۷۵۰۰	۸۶۸۹۰۶۲۵۰۰	۱۳/۵۴	۰/۰۰۱
X_1	۱	۱۷۰۹۵۵۶۲۵۰۰	۱۷۰۹۵۵۶۲۵۰۰	۲۶/۶۳	۰/۰۰۰
X_2	۱	۵۲۲۰۰۶۲۵۰۰	۵۲۲۰۰۶۲۵۰۰	۸/۱۳	۰/۰۱۷
X_3	۱	۳۷۵۱۶۶۲۵۰۰	۳۷۵۱۶۶۲۵۰۰	۵/۸۴	۰/۰۳۶
مربعی	۳	۷۰۷۷۰۶۱۳۶۴	۲۳۵۹۰۲۰۴۵۵	۳/۶۸	۰/۰۵۱
X_1^2	۱	۵۸۱۱۷۲۰۷۸	۵۸۱۱۷۲۰۷۸	۹/۰۷	۰/۰۱۳
X_2^2	۱	۲۰۲۹۲۲۱	۲۰۲۹۲۲۱	۰/۰۰	۰/۹۵۶
X_3^2	۱	۱۸۲۰۲۹۲۱	۱۸۲۰۲۹۲۱	۲/۸۱	۰/۱۲۵
تعاملی	۳	۴۱۷۳۵۰۰۰	۱۳۹۱۲۵۰۰۰	۰/۲۲	۰/۸۸۳
$X_1 \times X_2$	۱	۱۱۲۵۰۰۰	۱۱۲۵۰۰۰	۰/۰۰	۰/۹۶۷
$X_1 \times X_3$	۱	۳۲۵۱۲۵۰۰۰	۳۲۵۱۲۵۰۰۰	۰/۵۱	۰/۴۹۳
$X_2 \times X_3$	۱	۹۱۱۲۵۰۰۰	۹۱۱۲۵۰۰۰	۰/۱۴	۰/۷۱۴
کل	۱۹	۳۹۹۸۰۵۵۰۰۰۰	-	-	-

$$\begin{aligned}\text{Resistance}\left(\frac{\Omega}{\text{cm}^2}\right) = & -196699 + 947\,X_1 - 54\,X_2 \\ & + 95358\,X_3 - 0.676\,X_1^2 \\ & + 0.007X_2^2 - 8466\,X_3^2 \\ & + 0.012\,X_1 \times X_2 \\ & - 42.5\,X_1 \times X_3 - 16.9X_2 \times X_3\end{aligned} \quad (۳)$$

به منظور امکان مقایسه روند تغییرات مقاومت به خوردگی نمونه‌ها با زبری سطوح در حالت‌های فرآیندی مختلف، مقادیر مربوط به عناصر مداری در سلول الکتروشیمیایی و زبری سطح نمونه‌ها طی جدول ۹ ارائه شده است. مقایسه مقادیر ارائه‌شده در جدول ۹، نشان‌دهنده کاهش مقاومت به خوردگی نمونه‌ها با افزایش زبری سطح است. همان طور که در برخی مراجع اشاره شده است، زبری سطح بر میزان فعالیت سطح مؤثر بوده و سطوح زبر، از نظر وقوع خودبخودی واکنش خوردگی نسبت به سطوح صاف فعال‌تر هستند که این تفاوت به وجود حفره‌ها و ترک‌های باز موجود در سطوح زبر مربوط می‌شود. با افزایش زبری سطح، حفره‌ها و ترک‌های موجود بر سطح نمونه، به سمت عمیق و نازک شدن میل می‌کند که سبب افزایش سطح تماس نمونه با محیط خورنده شده و مقاومت نمونه در برابر خوردگی را کاهش می‌دهد[25].

همچنین، جهت تعیین مؤثرترین پارامتر بر مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی، در شکل ۱۲، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب مقاومت به خوردگی نمونه‌ها ترسیم گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیروی برنیشینگ، بیشترین تأثیر را بر کنترل مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی داشته است. در ادامه، جهت مطالعه بهتر رفتار خوردگی نمونه‌ها، از تحلیل نمودارهای نایکوئیست و باد استفاده شده است.

با توجه به اینکه مطابق شکل ۱۲، نیرو بیشترین تأثیر را بر مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی داشته و همچنین به منظور بررسی ساده‌تر روند تغییرات، به مقایسه مقادیر خوردگی در

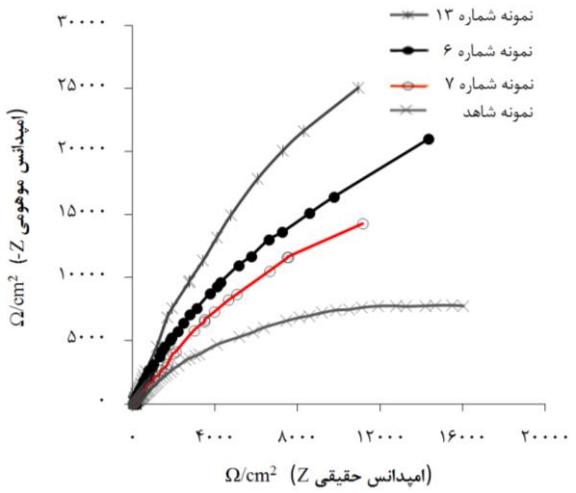
جدول ۹) مقادیر مربوط به عناصر مداری سلول الکتروشیمیایی و زبری سطوح برنیشینگ شده

زبری سطح (μm)	مقاومت به خوردگی (Ω/cm²)	مقدار توان n	مقاومت عنصر فاز ثابت s-sec^n	مقاومت محلول (Ω/cm²)	تعداد عبور ابزار	سرعت پیشروی (mm/min)	نیروی برنیشینگ (N)	شماره آزمایش
۰/۱۱۷	۲/۲۴×۱۰^۵	۰/۷۹	۲/۳۹×۱۰^۵	۵۴	۴	۴۰۰	۶۰۰	۱
۰/۱۱۸	۲/۰۸×۱۰^۵	۰/۷۸	۲/۴۷×۱۰^۵	۴۵	۴	۸۰۰	۶۰۰	۲
۰/۲۷۰	۱/۰۴×۱۰^۵	۰/۸۰	۴/۴۱×۱۰^۵	۴۰	۲	۴۰۰	۳۰۰	۳
۰/۳۰۰	۱×۱۰^۵	۰/۸۱	۴/۵۳×۱۰^۵	۶۹	۲	۸۰۰	۳۰۰	۴
۰/۱۷۷	۱/۲۱×۱۰^۵	۰/۸۱	۴/۳۹×۱۰^۵	۸۵	۴	۸۰۰	۳۰۰	۵
۰/۱۴۰	۱/۶۳×۱۰^۵	۰/۷۸	۴/۳۴×۱۰^۵	۵۲	۳	۶۰۰	۷۵۰	۶
۰/۵۴۲	۰/۰۹×۱۰^۵	۰/۷۲	۵/۷×۱۰^۵	۲۵	۳	۶۰۰	۱۵۰	۷
۰/۱۱۹	۲/۰۳×۱۰^۵	۰/۷۷	۲/۵۴×۱۰^۵	۲۶	۲	۸۰۰	۶۰۰	۸
۰/۱۳۰	۱/۹۷×۱۰^۵	۰/۸۴	۳/۱۳×۱۰^۵	۵۲	۳	۶۰۰	۴۵۰	۹
۰/۱۴۸	۱/۴۸×۱۰^۵	۰/۸۳	۳/۹۸×۱۰^۵	۱۰۷	۴	۴۰۰	۳۰۰	۱۰
۰/۱۳۴	۱/۸۲×۱۰^۵	۰/۷۰	۴×۱۰^۵	۶۰	۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۱
۰/۱۳۳	۱/۸۵×۱۰^۵	۰/۷۹	۳/۵۴×۱۰^۵	۵۲	۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۲
۰/۱۲۳	۲/۰۱×۱۰^۵	۰/۷۵	۲/۷۳×۱۰^۵	۸۸	۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۳
۰/۱۳۳	۱/۹۴×۱۰^۵	۰/۷۸	۳/۴۶×۱۰^۵	۱۷	۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۴
۰/۱۱۳	۲/۴۶×۱۰^۵	۰/۸۱	۲/۷×۱۰^۵	۴۶	۳	۲۰۰	۴۵۰	۱۵
۰/۱۳۸	۱/۶۸×۱۰^۵	۰/۷۰	۴/۳×۱۰^۵	۸۰	۳	۶۰۰	۴۵۰	۱۶
۰/۱۷۷	۱/۳۱×۱۰^۵	۰/۸۱	۴/۳×۱۰^۵	۷۴	۳	۱۰۰۰	۴۵۰	۱۷
۰/۱۳۲	۱/۹۵×۱۰^۵	۰/۸۶	۳/۲۲×۱۰^۵	۲۱	۵	۶۰۰	۴۵۰	۱۸
۰/۱۱۷	۲/۱۵×۱۰^۵	۰/۷۷	۲/۵×۱۰^۵	۲۹	۲	۴۰۰	۶۰۰	۱۹
۰/۲۳۸	۱/۱۲×۱۰^۵	۰/۷۸	۴/۷×۱۰^۵	۵۲	۱	۶۰۰	۴۵۰	۲۰

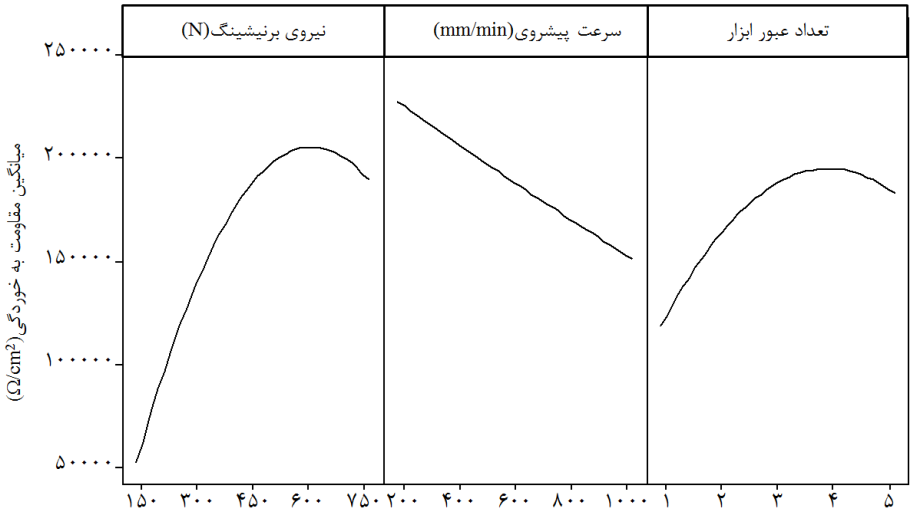
نمونه‌های شماره ۶، ۷ و ۱۳ پرداخته شده است. مطابق شکل۱۳، هر منحنی نایکوئیست به صورت قسمتی از یک نیم‌دایره است که قطر این نیم‌دایره، بیانگر مقاومت سیستم در برابر انتقال بار می‌باشد.

در نمودار نایکوئیست رسم شده به علت روند بسیار کند فرآیند خوردگی، حتی به ازای فرکانس‌های بسیار پایین نیز طیف امپدانس مجدداً محور افقی (امپدانس حقیقی) را قطع نمی‌کند. به همین دلیل محاسبه امپدانس در این حالت با برون‌یابی بهترین نیم‌دایره برای داده‌های تجربی حاصل می‌شود[26]. مقایسه منحنی‌ها نشان می‌دهد که با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای سرعت پیشروی (۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) و تعداد عبور ابزار ۳، نمونه شماره ۱۳ (به ازای نیروی برنیشینگ ۴۵۰ نیوتن)، قطر بیشتر و در نتیجه مقاومت انتقال بار بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها و نمونه شاهد ۰/۲×۱۰^۵ اهم بر سانتی‌متر مربع داشته است.

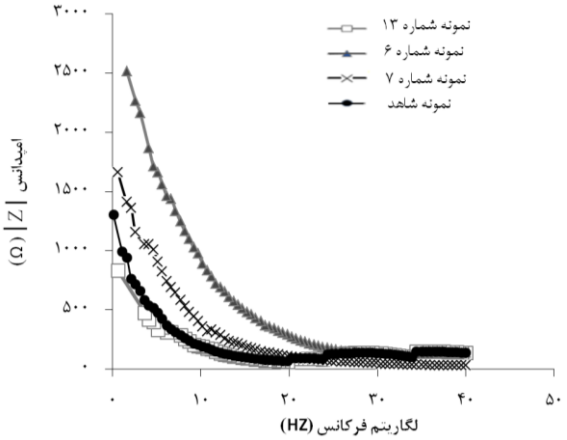
روش دیگر ارائه نتایج آزمون امپدانس، بررسی نمودار باد می‌باشد. مطابق شکل ۱۴، به ازای کمترین فرکانس در منحنی‌های باد، بزرگی امپدانس در نمونه شماره ۱۳ نسبت به سایر نمونه‌ها و نمونه شاهد، به صورت مشهودی بیشتر است که بیانگر بیشتر بودن مقاومت آن در برابر خوردگی می‌باشد. در ادامه به منظور بررسی ساختار سطحی نمونه‌های برنیشینگ شده و مقایسه آن‌ها در شرایط فرآیندی مختلف، مطابق شکل ۱۵، به بررسی تصاویر حاصل از میکروسکوپ IMM -۴۲۰ پرداخته شده است.



شکل ۱۳) مقایسه مقاومت به خوردگی نمونه‌ها طی نمودار نایکوئیست



شکل ۱۲) مقایسه میزان تأثیر پارامترهای فرآیند بر رفتار خوردگی نمونه‌ها



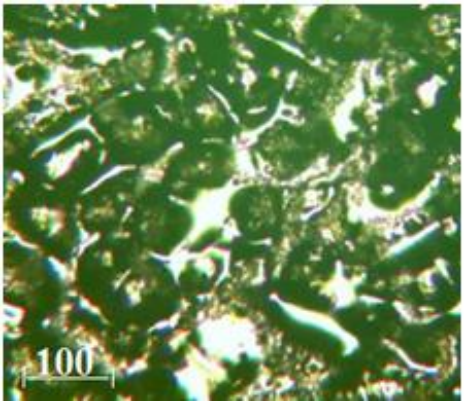
شکل ۱۴) مقایسه مقاومت به خوردگی نمونه‌ها طی نمودار باد

همان طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، افزایش نیروی برنیشینگ تا ۴۵۰ نیوتن، کاهش اندازه حفره‌ها و ترک‌های سطحی را به دنبال داشته و ادامه روند افزایش نیرو، سبب افزایش اندازه حفره‌ها و ترک‌های سطحی نمونه شده که کاهش مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی را در پی دارد. به طوری که با افزایش نیروی برنیشینگ از ۱۵۰ به ۴۵۰ نیوتن، میانگین قطر حفره‌ها از ۰/۱۳ میلی‌متر به ۰/۰۲ میلی‌متر کاهش‌یافته و با ادامه روند افزایش نیروی برنیشینگ از ۴۵۰ نیوتن به ۷۵۰ نیوتن، میانگین قطر حفره‌ها از ۰/۰۲ میلی‌متر به ۰/۰۶۳ افزایش یافته است.

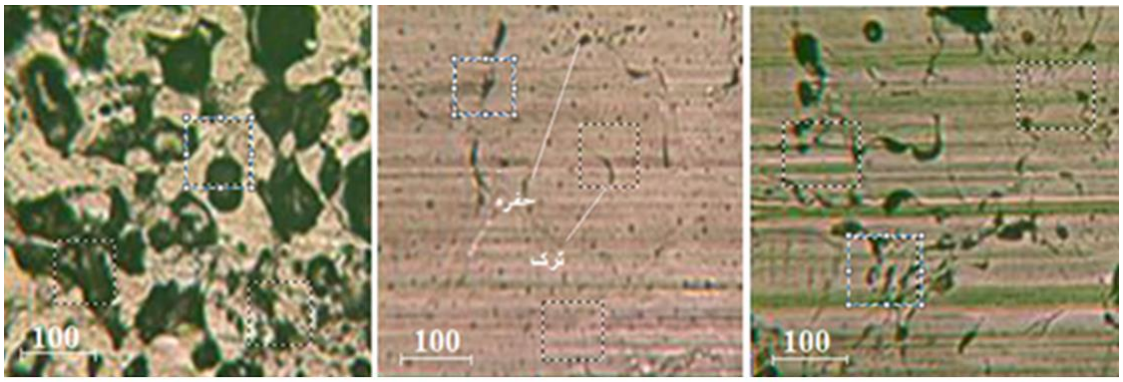
همچنین مقایسه تصاویر ارائه‌شده با تصویر مربوط به سطح نمونه شاهد در شکل ۱۶ نیز نشان‌دهنده بهبود کیفیت سطح نمونه طی فرآیند برنیشینگ می‌باشد. مطابق مقالات بررسی‌شده در این زمینه، فرآیند برنیشینگ سبب کاهش انرژی سطح شده و مقاومت بیشتری در برابر خوردگی ایجاد می‌کند. از طرفی بهبود مقاومت به خوردگی در نمونه‌ها نتیجه عملکرد تنش پسماند فشاری و اصلاح آرایش دانه‌ها در سطح نمونه است که سبب وقوع واکنش کمتر در مرز دانه‌ها و انحلال کمتر ناخالصی‌ها می‌شود. بعلاوه ایجاد نظم و آرایش دانه‌ها در سطح نمونه که ناشی از ایجاد تنش فشاری طی فرآیند برنیشینگ است، سبب کاهش ترشوندگی دانه‌های سطحی نمونه توسط محیط خورنده شده و مقاومت در برابر خوردگی را افزایش می‌دهد[20].

در ادامه مطابق با شکل ۱۷، به منظور بهینه‌سازی فرآیند از روش سطح پاسخ استفاده شده است.

روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که جهت مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مسائلی که پاسخ آن‌ها تحت تأثیر چندین متغیر قرار دارد استفاده می‌شود و هدف آن، بهینه‌سازی پاسخ بوده و قادر است چندین متغیر پاسخ را به ازای قیود داده‌شده بهینه‌سازی نماید. پارامترهای واردشده به نرم‌افزار برای توابع هدف به ازای کمترین مقدار برای زبری سطح و بیشترین مقادیر برای میکرو سختی و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی تنظیم شده است. طی بهینه‌سازی انجام‌شده به روش سطح پاسخ، مقدار بهینه برای زبری سطح، میکرو سختی و نرخ خوردگی سطح نمونه‌ها، به ترتیب، ۰/۱۰۸ میکرومتر، ۴۳۵/۳۴ ویکرز و $۲/۱۸\times۱۰^{۵}$ اهم، بدست آمد که در مقایسه با نمونه شاهد، زبری سطح نمونه‌ها حدود ۹۷٪ کاهش‌یافته و میکرو سختی و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی به ترتیب، در حدود ۲ و ۱۱ برابر افزایش یافته است.

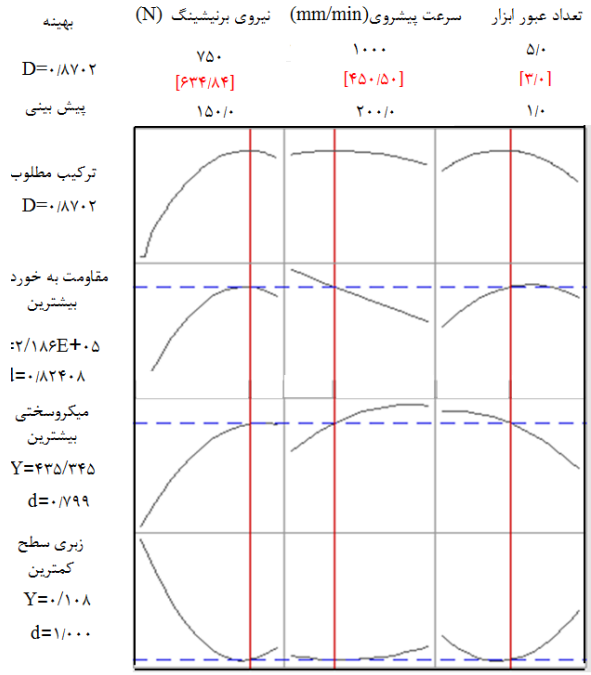


شکل ۱۶) سطح نمونه ماشین‌کاری شده طی فرآیند تخلیه الکتریکی (نمونه شاهد)



۱۵۰(N) ۴۵۰(N) ۷۵۰(N)

شکل ۱۵) تصاویر میکروسکوپی مربوط به تغییرات سطوح برنیشینگ شده با نیرو (سرعت پیشروی ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و تعداد عبور ۳)



شکل ۱۷) مقادیر بهینه برای کمیت‌های زبری سطح، میکرو سختی و مقاومت به خوردگی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پس از تهیه نمونه‌ها و ساخت ابزار برنیشینگ، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر زبری سطح، میکروسختی و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی، عملیات برنیشینگ با تغییر پارامترهای نیروی برنیشینگ، سرعت پیشروی و تعداد عبور ابزار، روی نمونه‌ها انجام شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب و روش سطح پاسخ، به تحلیل آماری نتایج پرداخته شد و میزان تأثیر هر پارامتر، بر کمیت‌های خروجی، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت که مهم‌ترین نتایج بدست آمده به شرح ذیل می‌باشد.

۱- جهت بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر زبری سطح، میکرو سختی و مقاومت به خوردگی نمونه‌ها، تحلیل آماری با سطح اطمینان ۹۵٪، انجام شد و میزان پوشش داده‌ها توسط مدل ریاضی ایجادشده، به ترتیب حدود ۹۵٪، ۹۸٪ و ۹۳٪ محاسبه شد.

۲- طی تحلیل آماری انجام‌شده، مشخص شد که نیروی برنیشینگ بیشترین تأثیر را بر زبری سطح، میکرو سختی و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی داشته است. به طوری که، پس از نیروی برنیشینگ، تعداد عبور ابزار و سرعت پیشروی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زبری سطح و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی داشته و همچنین تعامل نیروی برنیشینگ و تعداد عبور ابزار نیز بیشترین تأثیر را بر کنترل زبری سطح و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی داشته است.

۳- نتایج حاصل از بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر تغییرات میکرو سختی نمونه‌ها نشان داد که بعد از نیروی برنیشینگ، سرعت پیشروی و تعداد عبور ابزار به ترتیب، بیشترین تأثیر را بر مقدار میکرو سختی نمونه‌ها داشته است. همچنین، تعامل نیروی برنیشینگ و تعداد عبور ابزار نیز بیشترین تأثیر را بر کنترل میکرو سختی نمونه‌ها داشته است.

۴- طی بهینه‌سازی انجام‌شده به روش سطح پاسخ، مقدار بهینه برای زبری سطح، میکرو سختی و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی به ترتیب، ۰/۱۰۸ میکرومتر، ۴۳۵/۳۴ ویکرز و $۲/۱۸\times۱۰^{۵}$ اهم بدست آمد که در مقایسه با نمونه شاهد، زبری سطح نمونه‌ها حدود ۹۷٪ کاهش‌یافته و میکرو سختی و مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی نیز، به ترتیب در حدود ۲ و ۱۱ برابر افزایش یافته است.

تشکر و قدردانی: سپاس از خداوند یکتا و تشکر از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات که بنده را در این مسیر یاری نمودند.

تأییدیه اخلاقی: ما نویسندگان مقاله مهدی برغمدی، پیام سرائیان، صادق رحمتی و احسان شکوری با اعلام موافقت خود مبنی بر ارسال این مقاله به نشریه دانشگاه تربیت مدرس، تعهد می‌نماییم که این مقاله در زمان ارسال برای این مجله در هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف قطعی در این نشریه برای هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی دیگری ارسال نخواهد شد و پیام سرائیان را به عنوان نویسنده رابط معرفی نموده و وکالت تام ایشان در کلیه امور مرتبط با این مقاله نزد مجله را می‌پذیریم.

تعارض منافع: ما نویسندگان با اختیار و آگاهی کامل، کلیه حقوق مادی مربوط به انتشار این مقاله (صرفاً انتشار مقاله و نه محتوای مقاله) را به نشریه دانشگاه تربیت مدرس، واگذار می‌نماییم و نشریه در انتشار این مقاله به هر صورت اختیار تام دارد و منافع مادی احتمالی متعلق به نشریه است. این حق با رد انتشار این مقاله در نشریه و یا انصراف نویسندگان از ادامه همکاری تا قبل از تعیین تکلیف قطعی مقاله سلب خواهد شد.

سهم نویسندگان: ۱- مهدی برغمدی ۲۵٪، ۲- پیام سرائیان ۲۵٪، ۳- صادق رحمتی ۲۵٪، ٤- احسان شکوری ۲۵٪

منابع مالی: شخصی.

منابع

1- Najeeb S, Mali M, Syed AU, Zafar MS, Khurshid Z, Alwadaani A, Matinlinna JP. Dental implants materials and surface treatments. InAdvanced Dental Biomaterials. 2019;581-598.
2- Saini M, Singh Y, Arora P, Arora V, Jain K. Implant biomaterials: A comprehensive review. World Journal of Clinical Cases: WJCC. 2015;3(1):52.
3- Rebelo JC, Dias AM, Kremer D, Lebrun JL. Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels. Journal of Materials Processing Technology. 1998;84(1-3):90-96.
4- Navas VG, Ferreres I, Marañón JA, Garcia-Rosales C, Sevillano JG. Electro-discharge machining (EDM) versus hard turning and grinding—Comparison of residual stresses and surface integrity generated in AISI O1 tool steel. Journal of Materials Processing Technology. 2008;195(1-3):186-194.
5- Rebelo JC, Kornmeier M, Batista AC, Dias AM. Residual stress after EDM–FEM study and measurement results. InMaterials science forum. 2002;404:159-164.

6- Salahshoor M, Li C, Liu ZY, Fang XY, Guo YB. Surface integrity and corrosion performance of biomedical magnesium-calcium alloy processed by hybrid dry cutting-finish burnishing. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. 2018;78:246-253.
7- El-Tayeb NS, Low KO, Brevern PV. Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061. Journal of materials processing technology. 2007;186(1-3):272-278.
8- Kumara P, Purohit GK. Investigations on effect of different ball burnishing conditions on surface roughness using response surface methodology. Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology. 2019;2:51-60.
9- Tian Y, Shin YC. Laser-assisted burnishing of metals. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007;47(1):14-22.
10- Loh NH, Tam SC. Effects of ball burnishing parameters on surface finish—a literature survey and discussion. Precision Engineering. 1988;10(4):215-220.
11- Yilmaz H, Sadeler R. Impact wear behavior of ball burnished 316L stainless steel. Surface and Coatings Technology. 2019;363:369-378.
12- SAttabi S, Himour A, Laouar L, Motallebzadeh A. Effect of Ball Burnishing on Surface Roughness and Wear of AISI 316L SS. Journal of Bio-and Tribo-Corrosion. 2021;7(1):1-1.
13- k Patel N, Patel KA. Parametric optimization of process parameter for roller burnishing process: a review. International Journal of Advanced Engineering Research and Studies. 2013;2(2):53-56.
14- Khalilpourazary S, Salehi J. How alumina nanoparticles impact surface characteristics of Al7175 in roller burnishing process. Journal of Manufacturing Processes. 2019;39:1-1.
15- Sachin B, Narendranath S, Chakradhar D. Selection of optimal process parameters in sustainable diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2019;41(5):1-2.
16- Nguyen TT, Le XB. Optimization of interior roller burnishing process for improving surface quality. Materials and Manufacturing Processes. 2018;33(11):1233-1241.
17- Saldaña-Robles A, Plascencia-Mora H, Aguilera-Gómez E, Saldaña-Robles A, Marquez-Herrera A, Diosdado-De la Peña JA. Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion resistance of AISI 1045 steel. Surface and Coatings Technology. 2018;339:191-198.
18- Nguyen TT, Cao LH, Nguyen TA, Dang XP. Multi-response optimization of the roller burnishing process in terms of energy consumption and product quality. Journal of Cleaner Production. 2020; 245:119328.
19- Nguyen TT, Cao LH. Optimization of the burnishing process for energy responses and surface properties. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2020:1-10.
20- Ramesh S, Kudva SA, Anne G, Manne B, Arya S. Optimization of ball-burnishing process parameters on surface roughness, micro hardness of Mg–Zn–Ca alloy and investigation of corrosion behavior. Materials Research Express. 2019;6(10):1065e8.
21- Banh QN, Shiou FJ. Determination of optimal small ball-burnishing parameters for both surface roughness and superficial hardness improvement of STAVAX. Arabian Journal for Science and Engineering. 2016;41(2):639-652.
22- Rao JM, Reddy AC, Rao PR. Experimental investigation of the influence of burnishing tool passes on surface roughness and hardness of brass specimens. Indian Journal of Science and Technology. 2011;4(9):1113-1118.
23- John MS, Banerjee N, Shrivastava K, Vinayagam BK. Optimization of roller burnishing process on EN-9 grade alloy steel using response surface methodology. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2017;39(8):3089-3101.
24- Sachin B, Narendranath S, Chakradhar D. Effect of working parameters on the surface integrity in cryogenic diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel with a novel diamond burnishing tool. Journal of Manufacturing Processes. 2019;38:564-571.
25- Niu J, Liu Z, Wang B, Hua Y, Wang G. Effect of machining-induced surface integrity on the corrosion behavior of Al–Li alloy 2A97 in sodium chloride solution. Materials and Corrosion. 2019;70(2):259-267.
26- Bousselmi L, Fiaud C, Tribollet B, Triki E. Impedance spectroscopic study of a steel electrode in condition of scaling and corrosion: interphase model. Electrochimica Acta. 1999;44(24):4357-4363.