

An Experimental Study on Abrasive Flow Machining of Artificial Hip Joint

Yahya Choopani¹ *, Mohsen Khajehzadeh², Mohammad Reza Razfar²

¹ Department of Mechanical Engineering, Meybod University, Meybod, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Review History:

Received: Apr. 08, 2025

Revised: May, 23, 2025

Accepted: May, 26, 2025

Available Online: Jun. 09, 2025

Keywords:

Abrasive Flow Machining

Artificial Hip Joint

Inverse Replica Fixture

Machining Tool

Surface Roughness

ABSTRACT: Due to its unique geometry, the uniform machining of the femoral head in artificial hip joints has consistently posed a significant technical challenge. This study presents an effective solution for improving the abrasive flow machining (AFM) process through the design and development of an innovative inverse replica fixture. To this end, first an industrial prototype of the AFM system was fabricated, followed by the production of a fixture tailored to the geometry of the femoral head. The performance evaluation of the proposed device and method was conducted by examining the effects of key AFM process parameters, including hydraulic extrusion pressure, silicon carbide abrasive mesh size, and the number of machining cycles, on the average percentage change in surface roughness ($\% \Delta Ra$) of a femoral head made from 316L stainless steel. The results demonstrate that the proposed device and methodology provide an efficient and effective approach for achieving uniform machining of the femoral head. Experimental findings not only corroborate the efficacy of the method but also reveal that the average $\% \Delta Ra$ of the samples improved by 40.40%, 86.12%, and 90.61% when using abrasives with mesh sizes of 240, 600, and 1000, respectively. Moreover, surface morphology analysis indicated that the proposed method produces a smooth and uniform surface without inducing surface damage, thereby enhancing the surface integrity of the artificial hip joint.

1- Introduction

Total hip arthroplasty (THA) is an effective orthopedic surgical procedure in which the natural joint is replaced with an artificial prosthesis (Fig. 1). In this prosthesis, the wear of the ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) acetabular cup, due to contact with the metallic femoral head, has a critical impact on the longevity of the joint [1]. Studies have shown that the surface roughness of the metallic femoral head plays a key role in the wear rate of the UHMWPE component; specifically, lower surface roughness leads to reduced wear [2] and [3]. According to ISO 7206-2, the maximum allowable surface roughness is specified as less than $0.05 \mu\text{m}$ for the UHMWPE cup and less than $0.2 \mu\text{m}$ for the metallic femoral head [4]. To meet these standards, abrasive flow machining (AFM) has been proposed as an efficient and effective technology [4].

The present was an attempt to develop an automated finishing system to enhance the quality and efficiency of existing methods. The key innovations of this research include:

1. The design and fabrication of an AFM device,
2. The development of an inverse replica fixture tailored to the anatomy of the femoral head,

3. The investigation of the effects of AFM process parameters including hydraulic extrusion pressure, number of machining cycles, and abrasive mesh size — on the average percentage change in surface roughness ($\% \Delta Ra$) of a femoral head made from 316L stainless steel, and

4. Surface morphology analysis using scanning electron microscopy (SEM).

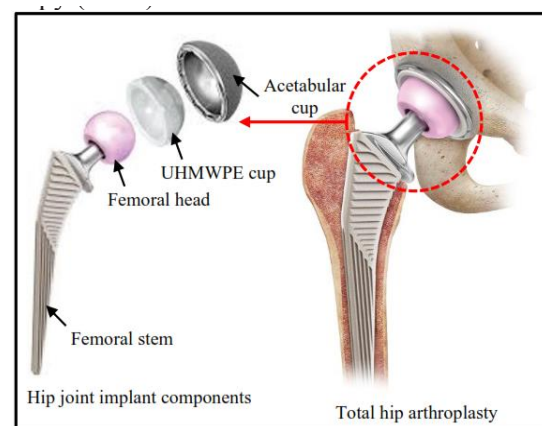


Fig. 1. Total hip arthroplasty (Courtesy of <https://www.orionortho.sg>).

*Corresponding author's email: Choopani@meybod.ac.ir

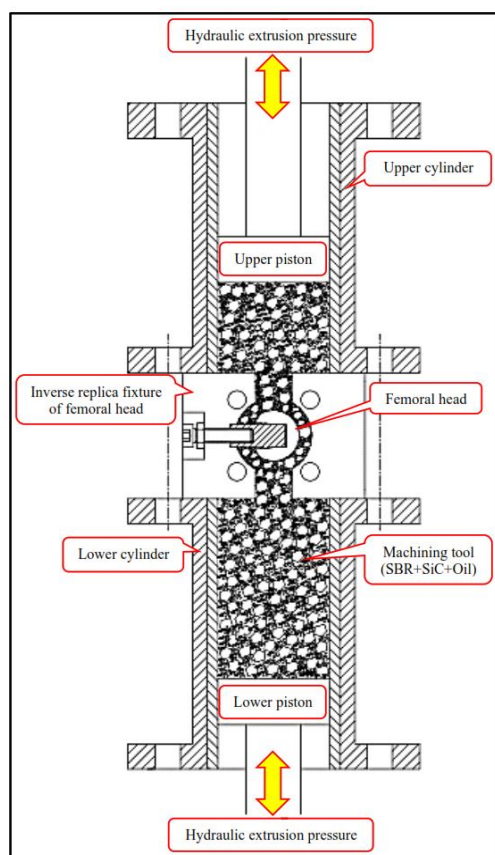


Fig. 2. A schematic of the AFM apparatus and method for finishing the femoral head.

2- Materials and methods

2- 1- AFM apparatus and method

In the present study, an industrial prototype of the AFM method and process was designed and fabricated specifically for machining the femoral head of an artificial hip joint. A schematic representation of the system's principles is shown in Fig. 2. The system consists of three main components: the AFM apparatus, the inverse replica fixture of the femoral head, and a viscoelastic machining tool.

2- 2- Machining tool manufacturing

In the present study, three types of viscoelastic machining tools, each consisting of 14 wt% styrene-butadiene rubber (SBR), 78 wt% silicon carbide (with mesh sizes of 240, 600, and 1000), and 8 wt% naphthenic oil, were fabricated.

2- 3- Experimental approach

In this study, femoral heads made of 316L stainless steel with a diameter of 28 mm and a Brinell hardness of 321 were employed (Fig. 3). Prior to AFM experiments, all samples were cleaned using an ultrasonic cleaning process. Surface roughness was measured at five different spots using a SURFCOM 130A instrument. The experiments were carried out using a full factorial design, totaling 27 designed and executed tests.



Fig. 3. Actual view of some samples of metal femoral heads with an artificial hip joint.

3- Results and discussion

3- 1- The effect of AFM process input parameters on the average % ΔRa

Figs. 4(a–c) illustrate the effects of key AFM parameters on the average % ΔRa of the femoral head of an artificial hip joint. As shown in Fig. 4a, % ΔRa reaches its maximum level with pressure rising from 7 MPa to 9 MPa, after which it declines. This trend indicates that 9 MPa is the optimal pressure. The increase in initial pressure enhances abrasive particle penetration and improves surface finishing, while higher pressure (e.g., 11 MPa) leads to abrasive grain fracture and surface quality degradation. As depicted in Fig. 4b, the highest improvement in % ΔRa was achieved at 100 machining cycles, emphasizing the importance of optimizing process duration to avoid adverse effects caused by excessive machining cycles, such as excessive wear.

Fig. 4c shows that increasing the silicon carbide mesh size (from 240 to 1000) significantly improves surface roughness. Specifically, mesh 240 produced a moderately polished surface (% ΔRa improvement of 40.40%) due to deeper particle penetration. Mesh 600 yielded a more notable surface roughness reduction (% ΔRa improvement of 86.12%), while mesh 1000 yielded a highly polished, mirror-like surface (% ΔRa improvement of 91.61%). These results corroborate the strong dependency of final surface finish on abrasive mesh size.

3- 2- Comparison of surface morphology of samples before and after AFM

The surface morphology analysis of the femoral head in the artificial hip joint before and after the AFM process revealed that following CNC machining (Prior to AFM), the surface exhibited notable roughness (0.245 μm) and did not reflect the surrounding environment clearly due to surface irregularities such as peaks, valleys, scratches, and grooves (Figs. 5a–c). In contrast, after AFM processing, the surface roughness was markedly reduced to 0.0203 μm , resulting in a smooth, mirror-like surface that provided a clear reflection of

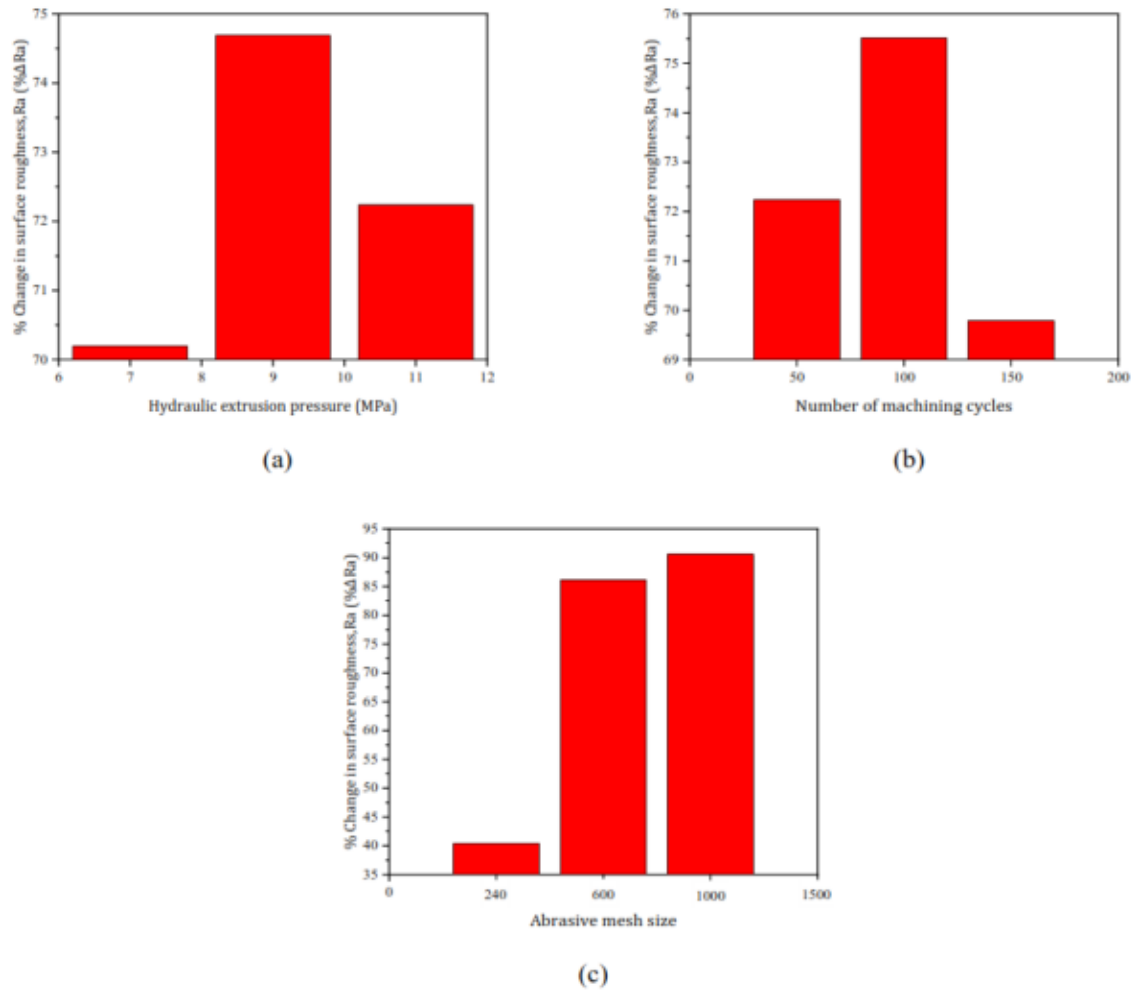


Fig. 4. Effect of AFM process input parameters on the average $\% \Delta Ra$: (a) hydraulic extrusion pressure (MPa), (b) number of machining cycles, and (c) abrasive mesh size.

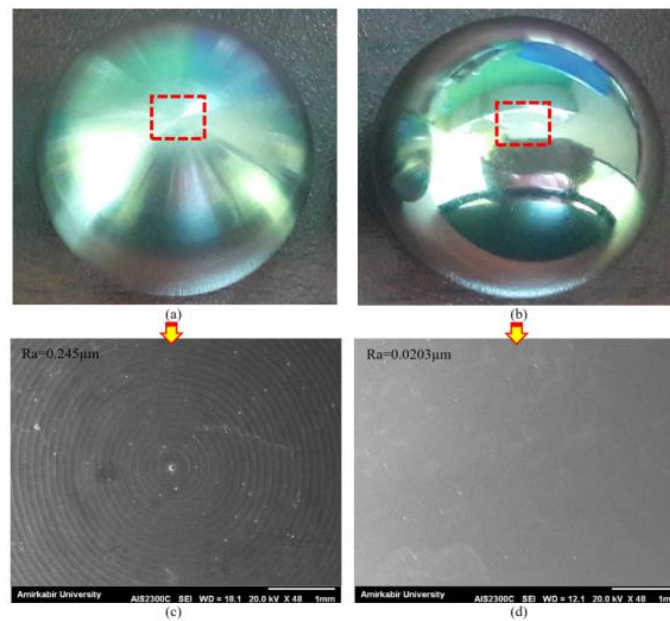


Fig. 5. Actual view and microscopy images of the surface morphology of the femoral head: (a and c) after CNC turning and (b and d) after AFM processing.

the environment (Figs. 5b–d).

4- Conclusion

A summary of the findings is presented here:

Surface roughness improvement significantly increased with larger abrasive mesh sizes, achieving average $\%\Delta Ra$ improvements of 40.40%, 86.12%, and 90.61% for mesh sizes 240, 600, and 1000, respectively.

References

- [1] M. Hasegawa, S. Tone, Y. Naito, A. Sudo, Ultra-high-molecular-weight polyethylene in hip and knee arthroplasties, *Materials*, 16(6) (2023) 2140.
- [2] J. Cooper, D. Dowson, J. Fisher, Macroscopic and microscopic wear mechanisms in ultra-high molecular weight polyethylene, *Wear*, 162 (1993) 378-384.
- [3] A. Jedenmalm, S. Affatato, P. Taddei, W. Leardini, U. Gedde, C. Fagnano, M. Viceconti, Effect of head surface roughness and sterilization on wear of UHMWPE acetabular cups, *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 90(4) (2009) 1032-1042.
- [4] P.O. Cubillos, V.O. dos Santos, A.L. Pizzolatti, A.D. O. Moré, C.R. M. Roesler, Surface finish of total hip arthroplasty implants: are we evaluating and manufacturing them appropriately?, *Journal of Testing and Evaluation*, 49(6) (2021) 4550-4559.



مطالعه تجربی بر روی ماشین کاری جریان ساینده مفصل ران مصنوعی

یحیی چوپانی^{۱*}، محسن خواجه زاده^۲، محمدرضا رازفر^۳

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه میبد، میبد، ایران.

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

کلمات کلیدی:

ماشین کاری جریان ساینده

مفصل ران مصنوعی

فیکسچر ماکت معکوس

ابزار ماشین کاری

زبری سطح

خلاصه: ماشین کاری یکنواخت سر فمورال مفصل ران مصنوعی به دلیل هندسه خاص آن، همواره به عنوان یک چالش فنی مطرح بوده است. این پژوهش با طراحی و توسعه یک فیکسچر ماکت معکوس نوآورانه، راهکار مؤثری برای بهبود فرآیند ماشین کاری جریان ساینده ارائه می کند. در این راستا، ابتدا نمونه صنعتی فرآیند ماشین کاری جریان ساینده ساخته شد و سپس فیکسچر متناسب با هندسه سر فمورال تولید گردید. ارزیابی عملکرد دستگاه و روش پیشنهادی با بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی فرآیند ماشین کاری جریان ساینده شامل فشار اکستروژن هیدرولیک، تعداد سیکل های ماشین کاری و اندازه مش ساینده کاربرد سیلیسیوم بر میانگین درصد تغییر در زبری سطح سر فمورال مفصل ران مصنوعی ساخته شده از فولاد زنگ نزن ۳۱۶L انجام شد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که دستگاه و روش پیشنهادی، روشی کارآمد و مؤثر برای ماشین کاری یکنواخت سر فلزی فمورال است. آزمایش های انجام شده نه تنها کارایی این روش را تأیید می کنند، بلکه نشان می دهند که میانگین درصد تغییر در زبری سطح نمونه ها با استفاده از ساینده های با مش ۲۴۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ به ترتیب ۴۰/۴۰٪، ۸۶/۱۲٪ و ۹۰/۶۱٪ بهبود یافته است. همچنین، بررسی مورفولوژی سطح نمونه ها نشان داد که روش پیشنهادی سطحی صاف و یکنواخت بدون آسیب های سطحی ایجاد کرده است که منجر به بهبود یکپارچگی سطح مفصل ران مصنوعی می شود.

۱- مقدمه

آرتروپلاستی کامل مفصل ران^۱ یکی از جراحی های مؤثر ارتوپدی است که در شکل ۱ به صورت شماتیک نمایش داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، مفصل ران مصنوعی جایگزین مفصل طبیعی شده است. در این پروتز، یک کاسه پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا^۲ بین سر فلزی فمورال^۳ و کاسه فلزی قرار می گیرد. به دلیل تماس مداوم سر فلزی با کاسه پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا، پدیده سایش رخ می دهد. مطالعات نه تنها این پدیده را تأیید کرده اند، بلکه نشان داده اند که سایش کاسه پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا تأثیر قابل توجهی بر طول عمر مفصل ران مصنوعی دارد [۱]. کوپر و همکاران [۲] مکانیسم سایش در کاسه پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا را از دیدگاه میکروسکوپی و

ماکروسکوپی بررسی کردند و دریافتند که میزان سایش این کاسه به زبری سطح سر فلزی فمورال بستگی دارد؛ به طوری که با کاهش زبری سطح، سایش نیز کمتر می شود. در مطالعه ای دیگر، جندنالم و همکاران [۳] تأثیر زبری سطح سر فلزی فمورال بر سایش کاسه پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا را بررسی کردند و گزارش دادند که افزایش زبری سطح سر فلزی، نرخ سایش کاسه پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا را به طور چشمگیری بالا می برد. با توجه به اهمیت زبری سطح سر فلزی فمورال در نرخ سایش و طول عمر پروتزهای مفصل ران، استاندارد بین المللی ISO 7206-2 پس از بررسی های جامع اعلام کرده است که میانگین زبری سطح سر فلزی فمورال و کاسه پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا باید به ترتیب کمتر از ۲ μm و ۰/۰۵ μm باشد [۴]. برای دستیابی به این استاندارد، تکنولوژی ماشین کاری جریان ساینده^۴ به عنوان یک راه حل مؤثر و کارآمد برای پرداخت سطوح پیچیده مطرح شده است. در ادامه، روند تکاملی این تکنولوژی مورد

1. Total hip arthroplasty (THA)
2. Ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE)
3. Metallic femoral head

4. Abrasive flow machining (AFM)

* نویسنده عهده دار مکاتبات: Choopani@meybod.ac.ir



بررسی قرار می‌گیرد.

تکنولوژی ماشین‌کاری جریان ساینده یکی از روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی است که در سال ۱۹۶۰ توسط شرکت اکسترودهون^۱ در آمریکا توسعه یافت. این تکنولوژی برای عملیات مختلفی مانند پرداخت‌کاری، دبورینگ^۲، ریدایزینگ^۳، پولیشینگ^۴ و سایر فرآیندهای اصلاح سطح در صنایع پیشرفته از جمله پزشکی، هوافضا، خودروسازی و دیگر حوزه‌ها به کار می‌رود [۵]. در این روش، ابزار ماشین‌کاری ترکیبی از یک ماده حامل ویسکوالاستیک، ذرات ساینده و افزودنی‌های دیگر است که در آن ذرات ساینده به صورت تصادفی و بدون جهت مشخص توزیع شده‌اند. با اعمال فشار هیدرولیک، این ابزار مانند یک چرخ سنگ نرم و انعطاف‌پذیر رفتار می‌کند و با تغییر شکل، خود را با سطح قطعه کار تطبیق می‌دهد. در این حالت، ابزار انعطاف‌پذیر از طریق فیکسچر مخصوص روی ناهمواری‌های سطح قطعه کار به حرکت درمی‌آید و با حرکت رفت و برگشتی، عملیات پرداخت را انجام می‌دهد. این فرآیند تا رسیدن به صافی مطلوب سطح ادامه می‌یابد [۶]. با توجه به ماهیت تکنولوژی ماشین‌کاری جریان ساینده، عمق نفوذ ذرات ساینده به سطح قطعه کار بسیار کم است. بنابراین، این روش نه تنها قادر است ناهمواری‌ها را تا مقیاس میکرو و نانومتر کاهش دهد، بلکه از نظر تکنولوژی‌های ساخت، یک فرآیند سرد محسوب می‌شود. این ویژگی باعث ایجاد تنش‌های پسماند فشاری روی سطح قطعه کار می‌شود که از نظر یکپارچگی سطح^۵ و بهبود عملکرد بسیار مطلوب است [۷]. با این حال، تلاش‌های گسترده‌ای برای به‌کارگیری تکنولوژی ماشین‌کاری جریان ساینده در صنایع مختلف، به‌ویژه روی سطوح پیچیده مهندسی، صورت گرفته است [۸]. در ادامه، برخی از این کاربردها مرور می‌شود.

پری و استک‌هاوس [۹] در یک مطالعه جامع، کاربرد تکنولوژی ماشین‌کاری جریان ساینده را در ماشین‌کاری قطعات توربین‌های گازی از جمله روتورهای محوری و گریز از مرکز، استاتورها، پره‌های توربین، دیسک‌های کمپرسور و توربین، شفت‌ها، آبندها و سایر اجزای دوار مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که تکنولوژی ماشین‌کاری جریان ساینده با بهره‌گیری از ابزار ماشین‌کاری انعطاف‌پذیر و طراحی فیکسچرهای ویژه، آینده‌ای امیدوارکننده برای ماشین‌کاری سطوح پیچیده و دسترسی ناپذیر، به‌ویژه در مورد مواد سخت، ترسیم می‌کند. در مطالعه

دیگری، جانگ و همکاران [۱۰] تأثیر به‌کارگیری تکنولوژی ماشین‌کاری جریان ساینده در ماشین‌کاری نازل انژکتور موتورهای دیزل و اثرات آن بر عملکرد موتور و سطح آلایندگی را بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها حاکی از آن بود که بهبود کیفیت سطح نازل انژکتور به واسطه این تکنولوژی نه تنها موجب ارتقای عملکرد موتور گردیده، بلکه به کاهش قابل توجه آلاینده‌ها نیز منجر شده است.

سارکار و جین [۱۱] ماشین‌کاری سطوح آزاد سر فمورال مفصل زانو مصنوعی ساخته‌شده از فولاد زنگ نزن را با استفاده از تکنولوژی ماشین‌کاری جریان ساینده بررسی کردند. نتایج نشان داد که این تکنولوژی سطحی با پرداخت یکنواخت در محدوده ۴۲/۹ تا ۶۲/۵ نانومتر در نقاط مختلف ایجاد کرده است که با استاندارد ۱۰۰ نانومتری انجمن آمریکایی تست و مواد^۶ برای پروتزهای مفصل زانو سازگاری دارد. همچنین، آن‌ها اشاره کردند که این روش علاوه بر کاهش زمان ماشین‌کاری، منجر به دوام بیشتر، خواص تریبولوژیکی بهتر و عملکرد بالاتر مفصل زانو مصنوعی می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، ژانگ و همکاران [۱۲] سطوح هندسی پیچیده سر فمورال مفصل زانو مصنوعی ساخته‌شده از آلایژ تیتانیوم را با استفاده از تکنولوژی ماشین‌کاری جریان ساینده، ماشین‌کاری کردند و بهبود دقت ابعادی و کیفیت سطح را گزارش دادند. در تلاشی دیگر، جی و همکاران [۱۳] با طراحی یک کانال جریان محدود در تکنولوژی ماشین‌کاری جریان ساینده، ماشین‌کاری سطوح مفصل زانو مصنوعی تیتانیومی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که این تکنولوژی برای ماشین‌کاری مفصل زانو مصنوعی مناسب است، زیرا زبری سطحی یکنواخت در محدوده ۱۷۱ تا ۳۹۴ نانومتر برای نمونه‌ها به دست آمد.

واريساوا و همکاران [۱۴] از جت آب ساینده^۷ برای پرداخت سطح سر فمورال مفصل ران مصنوعی ساخته‌شده از آلایژ کبالت-کروم-مولیبدن^۸ استفاده کردند. نتایج نشان داد که این روش زبری سطح را تا محدوده ۷/۲ نانومتر کاهش می‌دهد. با این حال، این روش باعث کاهش دقت گردی سر فمورال می‌شود. در مطالعه دیگری، سانگ و همکاران [۱۵] پرداخت‌کاری سر فمورال مفصل ران مصنوعی ساخته‌شده از آلایژ کروم-کبالت را با استفاده از تکنولوژی بوننت پولیشینگ^۹ بررسی کردند. نتایج نشان داد که این روش زبری سطح سر فمورال را تا ۱۶/۱ نانومتر کاهش می‌دهد.

6. American Society for Testing and Materials (ASTM)
7. Abrasive water jet (AWJ)
8. Cobalt-chromium-molybdenum (CO-Cr-Mo)
9. Bonnet polishing

1. Extrude Hone Corporation
2. Deburring
3. RADIUSING
4. Polishing
5. Surface integrity

درصد بهبود بخشید. پژوهشگران این روش را به عنوان راهکاری امیدبخش برای ارتقای کیفیت سطوح قطعات تولیدی به روش مدل سازی رسوب ذوب شده معرفی کرده اند. در پژوهشی جدید، مینا و همکاران [۲۱] ابتدا سر فمورال مفصل ران مصنوعی را با استفاده از تکنولوژی تفت جوشی لیزری انتخابی^۶ طراحی و ساختند، سپس فرآیند ماشین کاری نمونه ها را با روش ماشین کاری جریان ساینده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که زبری سطح نمونه ها ۲۵/۱۹ درصد بهبود یافته و میزان برداشت ماده ۶۹ میلی گرم ثبت شده است.

مطالعات پیشین نشان می دهد روش های فعلی پرداخت کاری سر فمورال مفصل ران مصنوعی با چالش های متعددی از جمله دقت هندسی پایین، سایش سریع ابزار، پرداخت غیر یکنواخت، بازدهی کم و زمان فرآیند طولانی مواجه هستند. در صنعت داخلی نیز روش های سنتی مانند پولیش کاری دستی نه تنها قادر به ایجاد سطحی یکنواخت نیستند، بلکه از نظر اقتصادی و زمانی مقرون به صرفه نمی باشند. ضرورت این مطالعه، توسعه یک سیستم پرداخت خودکار و کارآمد برای رفع مشکلات کیفی و افزایش بهره وری روش های موجود است. نوآوری های کلیدی این پژوهش شامل (۱) طراحی و ساخت یک نمونه صنعتی از دستگاه ماشین کاری جریان ساینده^۷، (۲) توسعه فیکسچر ماکت معکوس متناسب با آناتومی سر فمورال، (۳) بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند (فشار اکستروژن هیدرولیک، تعداد سیکل های ماشین کاری و اندازه مش ساینده) بر روی میانگین درصد تغییر در زبری سطح^۸ سر فلزی فمورال ساخته شده از فولاد زنگ نزن ۳۱۶L و (۴) تحلیل مورفولوژی سطح با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۹ می باشد. یافته های این مطالعه می تواند تحولی در فرآیند تولید ایمپلنت های ارتوپدی ایجاد کرده و جایگزین مناسبی برای روش های متعارف فعلی باشد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- طراحی و ساخت دستگاه و روش ماشین کاری جریان ساینده

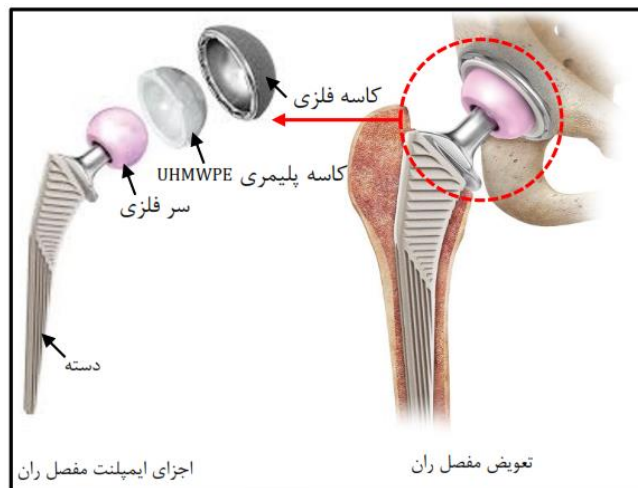
در شکل ۲ (الف و ب)، دستگاه و روش ماشین کاری جریان ساینده برای ماشین کاری سر فمورال مفصل ران مصنوعی نمایش داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، این سیستم از سه بخش اصلی شامل دستگاه ماشین کاری جریان ساینده، فیکسچر ماکت معکوس سر فمورال مفصل ران مصنوعی و ابزار ماشین کاری ویسکوالاستیک تشکیل

اگرچه مزایای متعددی برای این تکنولوژی گزارش شده است، اما از نظر بهره وری دارای محدودیت هایی است. علاوه بر این، چالش اصلی این روش، فرسایش ابزار ماشین کاری است که نیازمند نظارت و اصلاح مداوم می باشد. در تلاشی دیگر، سابرمانیان و همکاران [۱۶] پرداخت کاری نانومتری سر فمورال مفصل ران مصنوعی از جنس کروم-کبالت را با استفاده از فرآیند ماشین کاری جریان ساینده مورد مطالعه قرار دادند. آن ها حداقل زبری سطح به دست آمده را ۳۹ نانومتر گزارش کردند. با این حال، تصاویر میکروسکوپی نشان دهنده عدم یکنواختی در پرداخت سطح است که علت آن طراحی نامناسب فیکسچر نگه دارنده سر فمورال می باشد. این موضوع منجر به توزیع غیر یکنواخت سرعت جریان ابزار پرداخت کاری در سطح قطعه شده است. در مطالعه دیگری، دوبرتین و همکاران [۱۷] با استفاده از روش پولیش کاری الکتروشیمیایی^۱، سطح سر فمورال مفصل ران مصنوعی از جنس آلیاژ کروم-کبالت را تا زبری ۰/۰۲ μm پرداخت کردند. این فرآیند شامل مراحل متوالی تراشکاری (به عنوان ماشین کاری اولیه)، ۱۸۰ دقیقه سنگ زنی بشکه ای^۲، ۵۰ دقیقه سنگ زنی درگ^۳ و در نهایت ۳ دقیقه پرداخت نهایی با پولیش کاری الکتروشیمیایی بود. نتایج نشان داد که دستیابی به این سطح از پرداخت نیازمند حدود ۲۳۳ دقیقه زمان است. با وجود اثربخشی این روش در کاهش زبری سطح، کارایی فرآیند به دلیل نیاز به مراحل متعدد و ناتوانی در انجام پرداخت کامل در یک مرحله واحد، محدود شده است. این ویژگی، چالشی اساسی در کاربرد صنعتی این تکنیک محسوب می شود.

چوپانی و همکاران [۱۸] و [۱۹] روشی نوآورانه برای پرداخت کاری خودکار سر فمورال مفصل ران مصنوعی از جنس فولاد زنگ نزن L۳۱۶ ارائه کردند. در این روش، از الیاف سیسال^۴ به عنوان جایگزینی کارآمد برای ساینده های متعارف استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان می دهد که این روش نه تنها توانسته سطحی صاف با کیفیت آینه ای (زبری سطح ۳۶/۹۶ نانومتر) ایجاد کند، بلکه بدون ایجاد آسیب های سطحی، پرداختی یکنواخت در تمامی نواحی سر فمورال به دست آورده است. در پژوهش دیگری، هاشمی و همکاران [۲۰] با طراحی و ساخت ماکتی از سر فمورال مفصل زانو مصنوعی به روش مدل سازی رسوب ذوب شده^۵، به بررسی پرداخت کاری سطوح این قطعات با تکنولوژی ماشین کاری جریان ساینده پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که این روش می تواند زبری سطح سر فمورال را تا ۸۳

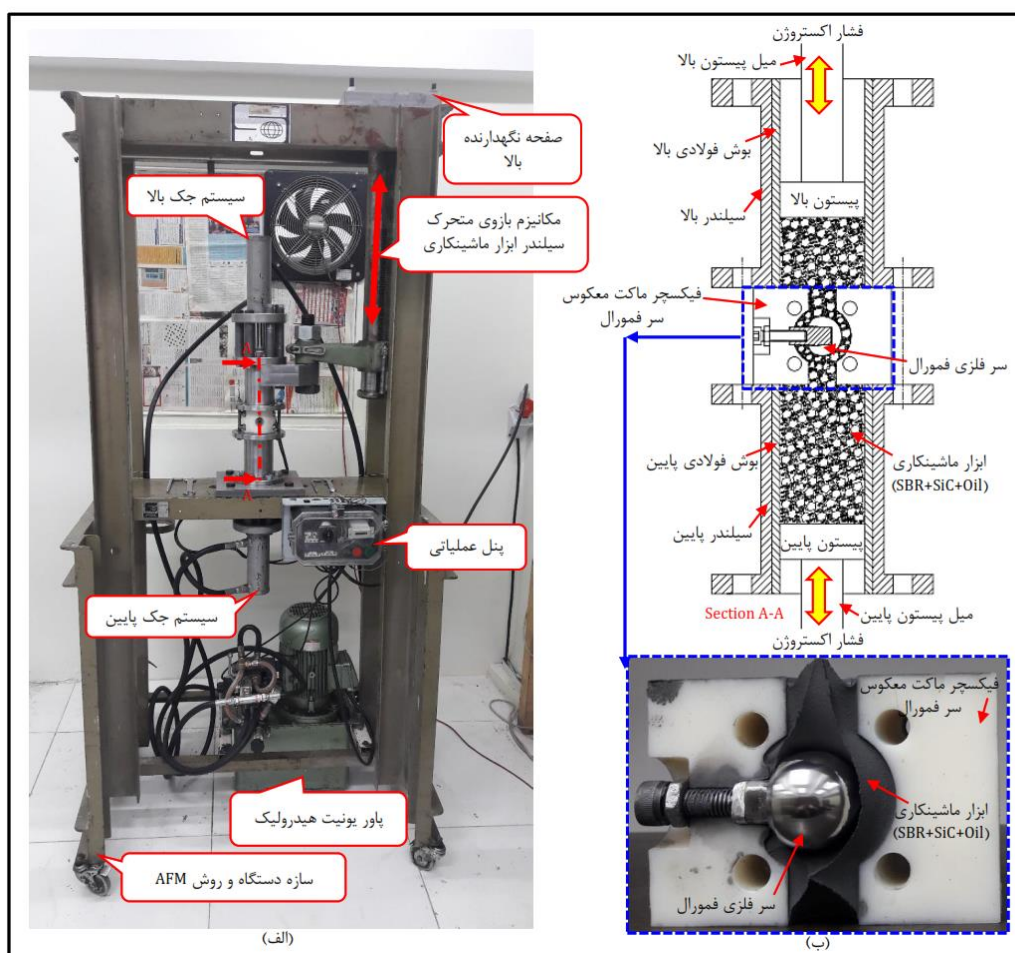
1. Electrochemical (EC)
2. Barrel grinding
3. Drag grinding
4. Sisal fiber
5. Fused deposition modeling (FDM)

6. Selective laser sintering (SLS)
7. Percentage change in surface roughness (% ΔRa)
8. Scanning electron microscope (SEM)



شکل ۱. آرتروپلاستی کامل مفصل ران (Courtesy of <https://www.orionortho.sg>).

Fig. 1. Total hip arthroplasty (Courtesy of <https://www.orionortho.sg>).



شکل ۲. دستگاه و روش ماشین کاری جریان ساپنده: الف) یک نمای واقعی و یک نمای در برش و ب) یک تصویر واقعی از ناحیه ماشین کاری در فیکسچر ماکت معکوس سر فمورال.

Fig. 2. Abrasive flow machining apparatus and method: a) an actual view and a sectional view and b) an actual image of the machining area in inverse replica fixture of femoral head.

استایرن بوتادین، ساینده کاربید سیلیسیوم و روغن نفتیک، از آسیاب دو غلتکی مدل پلی میکس ال^۴ ۲۰۰ ساخت آلمان استفاده شد که جزئیات آن در شکل ۴ ارائه شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، در مرحله نخست، لاستیک استایرن بوتادین در دمای ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی گراد به صورت تجربی غلتک کاری شد. در مرحله دوم، ساینده کاربید سیلیسیوم به لاستیک استایرن بوتادین افزوده گردید و مجدداً عملیات غلتک کاری انجام شد. در مرحله سوم، روغن نفتیک به تدریج و در حین غلتک کاری اضافه شد. در آزمایش های اولیه روی دستگاه ماشین کاری جریان ساینده، مشخص شد که ابزار ماشین کاری ساخته شده، به دلیل ویسکوزیته بالا، نمی تواند با توجه به هندسه فیکسچر ماکت معکوس سر فمورال، بر روی ناهمواری های سطح سر فلزی فمورال جریان یابد. برای کاهش ویسکوزیته و افزایش انعطاف پذیری و خود شکل دهی ابزار ماشین کاری، با توجه به اندازه مش ساینده کاربید سیلیسیوم (یعنی ۲۴۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰)، به ترتیب ۱٪، ۲٪ و ۳٪ روغن نفتیک اضافه شد. پس از این اصلاح، مشاهده شد که ابزار ماشین کاری تحت فشار اکستروژن هیدرولیک، مانند یک چرخ سنگ انعطاف پذیر روی سطح سر فلزی فمورال جریان می یابد. نتیجه این بهبود، دستیابی به ابزاری متناسب با هندسه سر فمورال مفصل ران مصنوعی بود که از نظر کاربرد در فرآیندهای ساخت و تولید، بی نظیر است (شکل ۲-ب را ببینید).

Weight percentage of an ingredient

$$(\%wt) = \left(\frac{\text{Weight of an ingredient}}{\text{Total weight of medium}} \right) \times 100 \quad (1)$$

۲-۳- رویکرد تجربی

در این پژوهش، از سر فلزی فمورال مفصل ران مصنوعی ساخته شده از فولاد زنگ نزن L ۳۱۶ با قطر ۲۸ میلی متر و سختی برینل ۳۲۱ استفاده شده است. ترکیب شیمیایی این ماده در جدول ۱ ارائه شده است. تمامی نمونه ها توسط شرکت خدمات پزشکی دوستان نیک تأمین شده اند و در شکل ۵، تعدادی از آن ها به همراه یک پروتز مفصل ران نمایش داده شده است. پیش و پس از انجام آزمایش ها، نمونه ها به مدت ۴ دقیقه در حمام آلتراسونیک تمیز شدند. سپس زبری سطح نمونه ها (قبل و بعد از فرآیند) در جهت عمود بر جریان ماشین کاری، در ۵ نقطه مختلف روی بخش بالایی سر فمورال اندازه گیری شد. این اندازه گیری ها با دستگاه زبری سنج سرفکام مدل A^۵ ۱۳۰

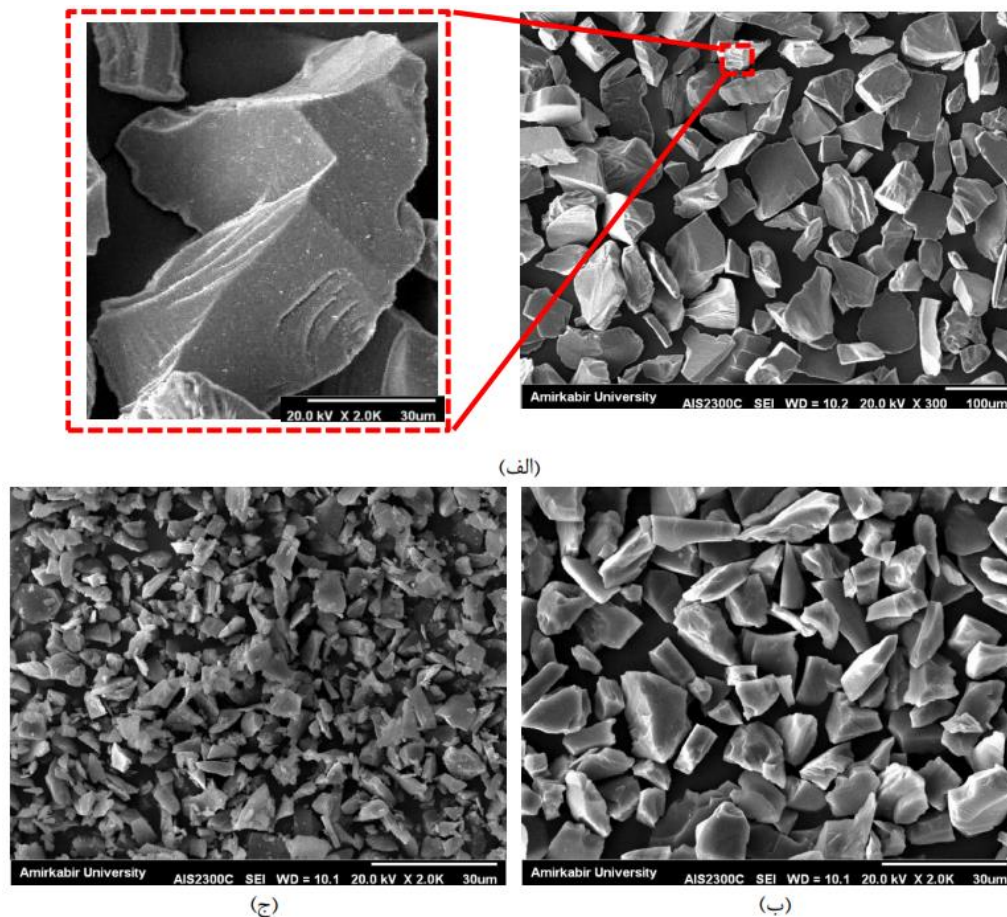
شده است. دستگاه ماشین کاری جریان ساینده شامل سازه اصلی، پاور یونیت هیدرولیک (متشکل از موتور سه فاز، پمپ، گیج فشار و غیره)، سیستم های هیدرولیک جک های بالا و پایین، سیلندرهای ابزار ماشین کاری بالا و پایین، مکانیسم بازوی متحرک سیلندر بالایی، میکروسویچ های بالا و پایین، پنل عملیاتی و سایر اجزاء است. این سیستم امکان کنترل و تنظیم فشار اکستروژن هیدرولیک، طول کورس پیستون ها، حجم ابزار ماشین کاری و تعداد سیکل های ماشین کاری را فراهم می کند. ابزار ماشین کاری ویسکوالاستیک ترکیبی از لاستیک استایرن بوتادین^۱، ساینده کاربید سیلیسیوم^۲ و روغن نفتیک است که بین فیکسچر ماکت معکوس و سر فلزی فمورال قرار می گیرد. با استفاده از سیستم هیدرولیک جک های بالا و پایین، ابزار ماشین کاری به صورت رفت و برگشتی از سیلندر بالا به سیلندر پایین حرکت می کند. فیکسچر ماکت معکوس سر فمورال بین دو سیلندر محکم قرار گرفته و جریان ابزار ماشین کاری را به خوبی هدایت می کند. این فیکسچر متناسب با هندسه سر فمورال طراحی شده و علاوه بر نگهداری محکم قطعه، هدایت جریان ابزار ماشین کاری روی ناهمواری های سطح را بهبود می بخشد. جنس فیکسچر از پلی آمید ضد سایش انتخاب شده که استحکام بالا، مقاومت به سایش و آب بندی عالی دارد و با استفاده از فرز سی ان سی^۳ ساخته شده است. پس از روشن کردن دستگاه و پر کردن سیلندر پایین با ابزار ماشین کاری، فیکسچر در موقعیت مناسب تنظیم می شود. سپس ابزار ماشین کاری تحت فشار هیدرولیک مانند یک چرخ سنگ تغییر شکل پذیر رفتار کرده و با حرکت رفت و برگشتی، از میان فیکسچر و روی سطح سر فلزی فمورال عبور می کند. این حرکت باعث می شود دانه های ساینده مسیر خطی را طی کنند و عملیات میکرو-نانو ماشین کاری مطابق با هندسه قطعه انجام شود. این روش امکان پرداخت دقیق و یکنواخت سطح سر فلزی فمورال را با دقت بالا فراهم می کند.

۲-۲- ساخت ابزار ماشین کاری

در پژوهش حاضر، با استفاده از منابع [۲۲] و [۲۳] و همچنین آزمایش های اولیه، سه نوع ابزار ماشین کاری ویسکوالاستیک با ترکیبی از ۱۴ درصد وزنی لاستیک استایرن بوتادین، ۷۸ درصد وزنی ساینده کاربید سیلیسیوم در اندازه های مش ۲۴۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ (شکل ۳) و ۸ درصد وزنی روغن نفتیک، مطابق رابطه (۱) ساخته شد. برای اختلاط یکنواخت لاستیک

1. Styrene butadiene rubber (SBR)
2. Silicon carbide (SiC)
3. Computer numerical control (CNC)

4. Polymix L200
5. SURFCOM 130A



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی از ذرات ساینده کاربید سیلیسیم: الف) مش ۲۴۰، ب) مش ۶۰۰ و ج) مش ۱۰۰۰.

Fig. 3. Microscopy images of Silicon carbide abrasive particles: a) 240 mesh, b) 600 mesh, and c) 1000 mesh.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۳۱۶L.

Table 1. Chemical composition of 316L stainless steel.

عنصر شیمیایی	درصد وزنی (%)
آهن	فلز پایه
کربن	۰/۰۳
منگنز	۲/۰۰
فسفر	۰/۰۲۵
گوگرد	۰/۰۰۳
سیلیسیم	۰/۷۵
کروم	۱۷/۰۰-۱۹/۰۰
نیکل	۱۳/۰۰-۱۵/۰۰
مولیبدن	۲/۷۰-۳/۰۰

ساخت شرکت کارل زیس^۱ آلمان انجام گرفت. پارامترهای اندازه‌گیری شامل طول ارزیابی ۴ میلی‌متر، فیلتر زبری ۰/۰۸ میلی‌متر و سرعت ردیابی ۰/۰۸ میلی‌متر بر ثانیه بود. میانگین زبری سطح اولیه نمونه‌ها در نقاط مختلف، $0.245 \mu\text{m}$ ثبت شد. نحوه اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌های سر فلزی در شکل ۶ نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند ماشین‌کاری جریان ساینده شامل فشار اکستروژن هیدرولیک، تعداد سیکل‌های ماشین‌کاری و اندازه مش ساینده کاربید سیلیسیم بر میانگین درصد تغییر در زبری سطح از روش طراحی آزمایش کامل^۲ استفاده شد. مقدار درصد تغییر در زبری سطح با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید. برای هر پارامتر ورودی، سه سطح در نظر گرفته شد و در مجموع ۲۷ آزمایش طراحی گردید. این آزمایش‌ها در سه مرحله ماشین‌کاری شامل خشن‌کاری (

1. Carl Zeiss

2. Full factorial method



شکل ۴. مراحل ساخت یک ابزار ماشین کاری.

Fig. 4. The steps of manufacturing a machining tool.

تغییر در زبری سطح سر فمورال مفصل ران مصنوعی نمایش داده شده است. فشار اکستروژن هیدرولیک به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیند ماشین کاری جریان ساینده، بسته به جنس قطعه کار و شرایط سطح اولیه، معمولاً بین ۰/۷ تا ۲۰ MPa متغیر است [۲۴] و [۲۵]. با افزایش فشار اکستروژن هیدرولیک، نیروی وارد بر ذرات ساینده بیشتر شده و در نتیجه، میزان برداشت ماده و درصد تغییر در زبری سطح افزایش می یابد [۲۶] و [۲۷]. اما اگر این فشار از حد بهینه فراتر رود، عملکرد فرآیند ماشین کاری جریان ساینده کاهش پیدا می کند [۲۸]. همان طور که در شکل ۷-الف مشاهده می شود، درصد تغییر در زبری سطح ابتدا با افزایش فشار روند صعودی دارد، اما پس از رسیدن به نقطه اوج، کاهش می یابد. این نشان می دهد که برای ماشین کاری سر فلزی فمورال، یک فشار بهینه وجود دارد. به طور دقیق تر،

با ساینده ۲۴۰ مش (پرداخت کاری (با ساینده ۶۰۰ مش) و نانو پرداخت کاری (با ساینده ۱۰۰۰ مش) انجام شد. پارامترهای ورودی و سطوح آن ها در جدول ۲ و داده های تجربی در جدول ۳ ارائه شده اند.

Percent change in surface roughness,

$$Ra \text{ (or } \% \Delta Ra) = \left(\frac{Initial Ra - Final Ra}{Initial Ra} \right) \times 100 \quad (2)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱ اثرات پارامترهای ورودی فرآیند ماشین کاری جریان ساینده بر روی

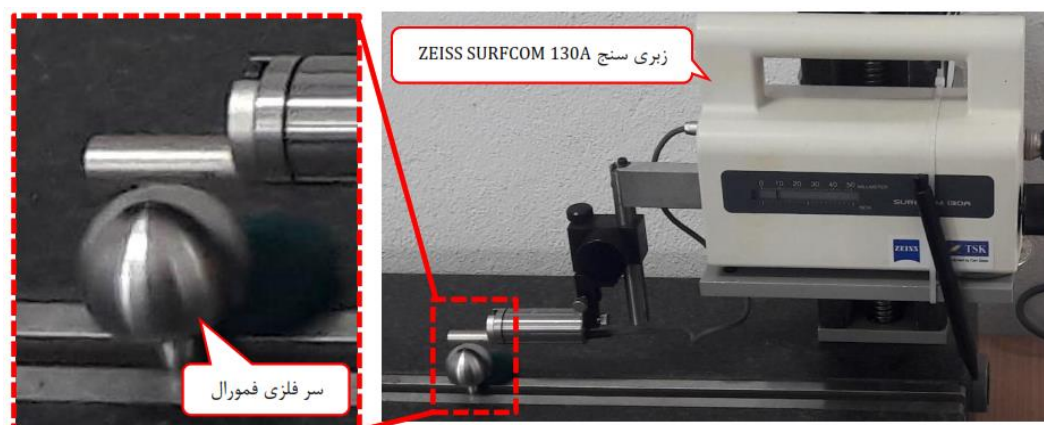
میانگین درصد تغییر در زبری سطح

در شکل ۷-الف، تأثیر فشار اکستروژن هیدرولیک بر میانگین درصد



شکل ۵. نمای واقعی برخی از نمونه‌های سر فلزی فمورال به همراه یک مفصل ران مصنوعی.

Fig. 5. Actual view of some samples of metal femoral heads with an artificial hip joint.



شکل ۶. یک نمای واقعی از اندازه‌گیری زبری سطح سر فمورال با استفاده از زبری سنج ZEISS SURFCOM 130A.

Fig. 6. An actual view of the surface roughness measurement of the femoral head using the ZEISS SURFCOM 130A roughness meter.

جدول ۲. پارامترها و سطوح مورد استفاده در روش طراحی آزمایش کامل.

Table 2. Parameters and levels used in the full experimental design method.

مقادیر سطوح پارامترها			واحد	پارامترها ورودی فرآیند
۱۱	۹	۷	(MPa)	فشار اکستروژن هیدرولیک
۱۵	۱۰۰	۵۰	---	تعداد سیکل‌های ماشین‌کاری
۱۰۰۰	۶۰۰	۲۴۰	---	اندازه مش ساینده

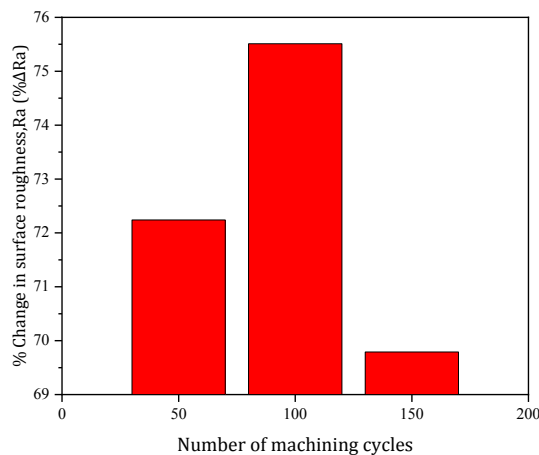
جدول ۳. داده‌های تجربی به‌دست‌آمده بر اساس روش طراحی آزمایش کامل.

Table 3. Experimental data obtained based on the full experimental design method.

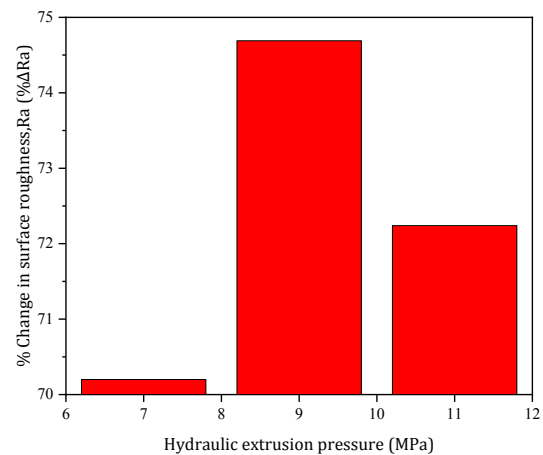
شماره آزمایش	پارامترهای ورودی			زبری سطح (μm)
	فشار اکستروژن هیدرولیک (MPa)	تعداد سیکل‌های ماشین‌کاری	اندازه مش ساینده	
۱	۷	۵۰	۲۴۰	۰/۱۶۴
۲	۷	۵۰	۶۰۰	۰/۰۳۷
۳	۷	۵۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۲
۴	۷	۱۰۰	۲۴۰	۰/۱۴۳
۵	۷	۱۰۰	۶۰۰	۰/۰۳۱
۶	۷	۱۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۵
۷	۷	۱۵۰	۲۴۰	۰/۱۷۰
۸	۷	۱۵۰	۶۰۰	۰/۰۴۳
۹	۷	۱۵۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۷
۱۰	۹	۵۰	۲۴۰	۰/۱۳۲
۱۱	۹	۵۰	۶۰۰	۰/۰۳۱
۱۲	۹	۵۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۳
۱۳	۹	۱۰۰	۲۴۰	۰/۱۱۶
۱۴	۹	۱۰۰	۶۰۰	۰/۰۲۸
۱۵	۹	۱۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۰۳
۱۶	۹	۱۵۰	۲۴۰	۰/۱۵۲
۱۷	۹	۱۵۰	۶۰۰	۰/۰۳۵
۱۸	۹	۱۵۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۴
۱۹	۱۱	۵۰	۲۴۰	۰/۱۴۹
۲۰	۱۱	۵۰	۶۰۰	۰/۰۳۷
۲۱	۱۱	۵۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۱
۲۲	۱۱	۱۰۰	۲۴۰	۰/۱۲۶
۲۳	۱۱	۱۰۰	۶۰۰	۰/۰۳۴
۲۴	۱۱	۱۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۴
۲۵	۱۱	۱۵۰	۲۴۰	۰/۱۶۲
۲۶	۱۱	۱۵۰	۶۰۰	۰/۰۳۳
۲۷	۱۱	۱۵۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۶

وقتی فشار اکستروژن هیدرولیک از ۷ به ۹ MPa افزایش می‌یابد، درصد تغییر در زبری سطح به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این نشان‌دهنده بیشترین میزان ماشین‌کاری در فشار ۹ MPa است. اما با افزایش فشار به ۱۱ MPa، درصد تغییر در زبری سطح کاهش می‌یابد. بنابراین، بیشترین درصد تغییر در زبری سطح در فشار بهینه ۹ MPa رخ می‌دهد. برای توضیح این رفتار می‌توان گفت که با افزایش فشار، عمق نفوذ دانه‌های ساینده به ناهمواری‌های سطح بیشتر می‌شود. در نتیجه، برداشت ماده افزایش‌یافته و ناهمواری‌های سطح کاهش می‌یابد که به افزایش درصد تغییر در زبری سطح منجر می‌شود.

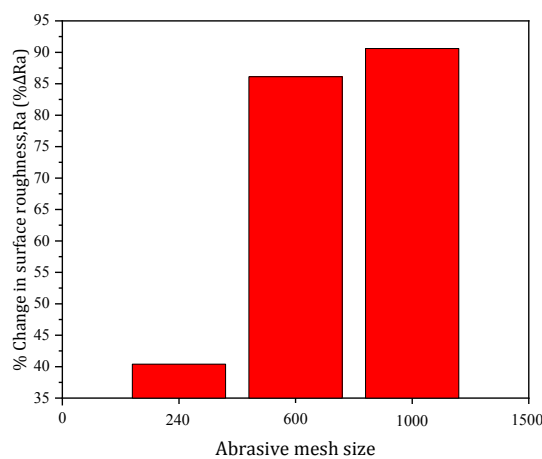
همچنین، با افزایش فشار، ویسکوزیته ابزار ماشین‌کاری بیشتر شده و تعداد دانه‌های ساینده فعال در تماس با سطح افزایش می‌یابد. علاوه بر این، لاستیک استایرن بوتادین که نگه‌دارنده ذرات ساینده است، دانه‌های کاربید سیلیسیوم را محکم‌تر در خود جای‌داده و آزادی حرکت آن‌ها را محدود می‌کند. اما اگر فشار از حد بهینه (۹ MPa) فراتر رود، دانه‌های ساینده با عمق نفوذ بیشتری با سطح درگیر شده و احتمال شکست آن‌ها افزایش می‌یابد. شکست دانه‌ها منجر به تشکیل ذرات ریزتر با لبه‌های تیزتر می‌شود که باعث ایجاد میکرو خراش‌های بیشتر روی سطح پرداخت‌شده شده و تأثیر



(ب)



(الف)



(ج)

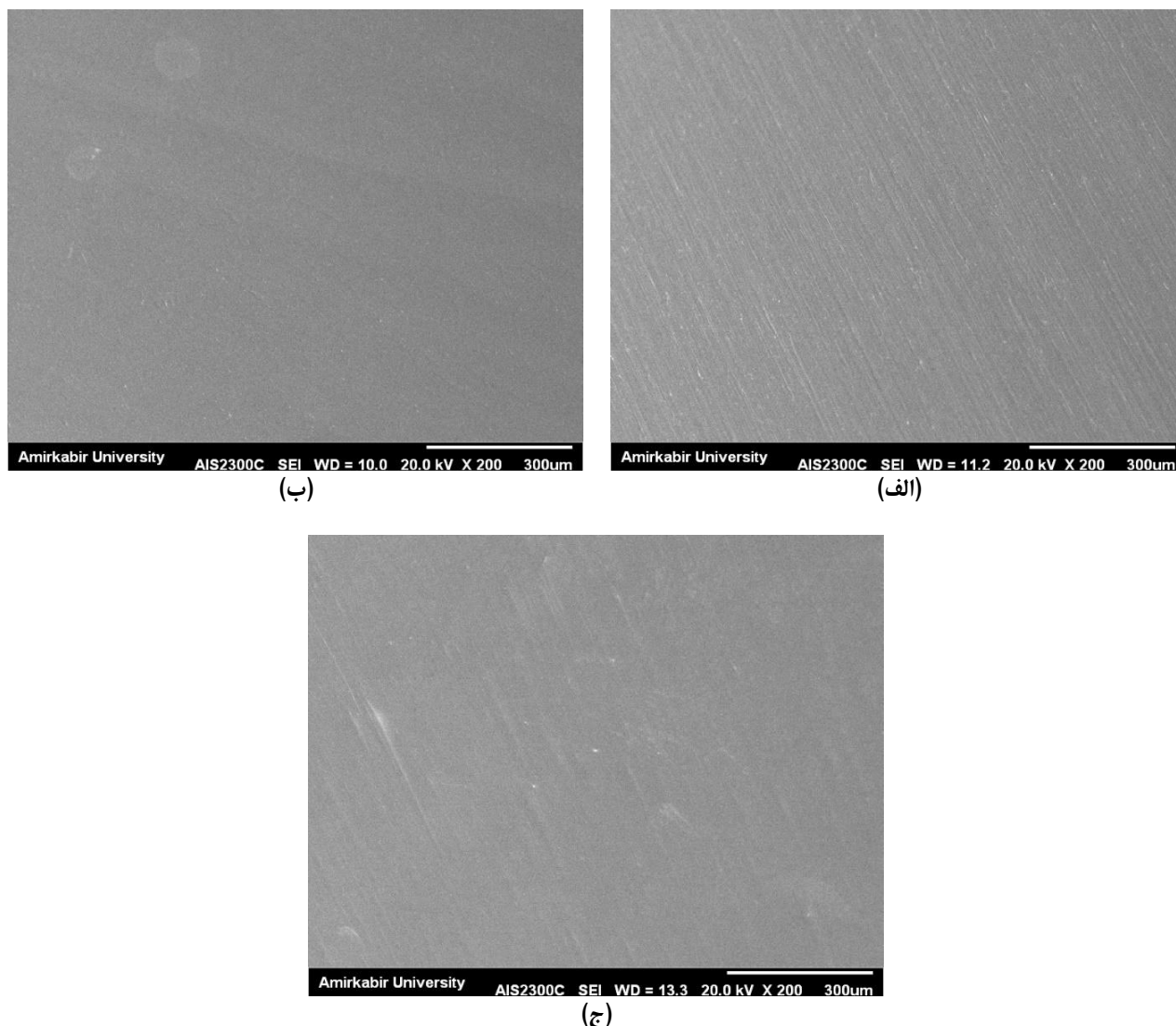
شکل ۷. تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند ماشین کاری جریان ساینده بر روی میانگین درصد تغییر در زبری سطح: (الف) فشار اکستروژن هیدرولیک (MPa)، (ب) تعداد سیکل‌های ماشین کاری و (ج) اندازه مش ساینده

Fig. 7. Effect of abrasive flow machining process input parameters on the average percentage change in surface roughness (%ΔRa): (a) hydraulic extrusion pressure (MPa), (b) number of machining cycles, and (c) abrasive mesh size.

پارامترهای کلیدی برای دستیابی به کیفیت سطح مطلوب است که مقدار آن به نیازهای پرداخت نهایی بستگی دارد. در مراحل اولیه فرآیند، به دلیل تیزی ذرات ساینده و وجود ناهمواری‌های بیشتر روی سطح قطعه، میزان برداشت ماده و درصد تغییر در زبری سطح به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد [۲۹]. اما با ادامه فرآیند و پس از چند سیکل، کارایی ماشین کاری کاهش می‌یابد، زیرا ذرات ساینده کند شده و ناهمواری‌های سطح نیز کمتر می‌شوند [۳۰]. همان‌طور که در شکل ۷-ب مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سیکل‌های ماشین کاری، مقدار درصد تغییر در زبری سطح ابتدا افزایش و سپس کاهش

منفی بر درصد تغییر در زبری سطح می‌گذارد. از سوی دیگر، شکست دانه‌ها باعث ایجاد ذرات کوچک‌تری می‌شود که نیروی ماشین کاری بین آن‌ها توزیع می‌شود. در نتیجه، در فشار بالا (مثلاً ۱۱ MPa)، میزان برداشت ماده نسبت به فشار بهینه (۹ MPa) کمتر شده و درصد تغییر در زبری سطح کاهش می‌یابد.

در شکل ۷-ب، تأثیر تعداد سیکل‌های ماشین کاری بر میانگین درصد تغییر در زبری سطح سر فمورال مفصل ران مصنوعی نشان داده شده است. تعداد سیکل‌های ماشین کاری در فرآیند ماشین کاری جریان ساینده یکی از



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی از سر فمورال پس از فرآیند ماشین کاری جریان ساینده با اندازه‌های مختلف مش ساینده: (الف) ۲۴۰، (ب) ۶۰۰ و (ج) ۱۰۰۰.

Fig. 8. Microscopy images of the femoral head after abrasive flow machining process with different abrasive mesh sizes: (a) 240, (b) 600, and (c) 1000.

فمورال به دلیل تراشکاری سی‌ان‌سی در حداکثر مقدار خود قرار دارند. در این شرایط، با افزایش تعداد سیکل‌های ماشین کاری تا ۱۰۰، برخورد ذرات ساینده فعال با ناهمواری‌های سطح افزایش می‌یابد که منجر به افزایش درصد تغییر در زبری سطح می‌شود. اما با افزایش سیکل‌ها به ۱۵۰، ناهمواری‌های سطح به شدت کاهش می‌یابند. در این حالت، ذرات ساینده نقش کم‌رنگ‌تری در برش سطح دارند و بیشتر نیروی آن‌ها صرف اصطکاک و مالش سطح می‌شود. این امر باعث افزایش دمای ابزار ماشین کاری ویسکوالاستیک شده و ویسکوزیته آن را کاهش می‌دهد. در نتیجه، توانایی لاستیک استایرن بوتادین در نگهداری ذرات ساینده کم می‌شود و ذرات به جای برش سطح،

می‌یابد. این روند نشان‌دهنده وجود یک مقدار بهینه برای تعداد سیکل‌های ماشین کاری در پرداخت سطح سر فمورال مفصل ران مصنوعی است. بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سیکل‌ها از ۵۰ تا ۱۰۰، مقدار درصد تغییر در زبری سطح افزایش می‌یابد که بیانگر بیشترین کارایی ماشین کاری در ۱۰۰ سیکل است. اما با افزایش تعداد سیکل‌ها به ۱۵۰، مقدار درصد تغییر در زبری سطح به حداقل خود می‌رسد. بنابراین، شکل ۸ به وضوح نشان می‌دهد که بیشترین مقدار درصد تغییر در زبری سطح در ۱۰۰ سیکل ماشین کاری اتفاق می‌افتد. برای توجیه این رفتار می‌توان چنین استدلال کرد: قبل از فرآیند ماشین کاری جریان ساینده، ناهمواری‌های سطح سر فلزی

شروع به غلتیدن روی آن می‌کنند. این پدیده باعث ایجاد خراش‌های ریز روی سطح شده و علاوه بر تخریب بافت سطح پرداخت‌شده، روند کاهشی درصد تغییر در زبری سطح را در پی دارد.

در شکل ۷-ج، تأثیر اندازه مش ساینده کاربرد سیلیسیوم بر میانگین درصد تغییر در زبری سطح سر فمورال مفصل ران مصنوعی نشان داده شده است. انتخاب اندازه و نوع ذرات ساینده در فرآیند ماشین‌کاری جریان ساینده به جنس قطعه‌کار و کیفیت پرداخت مورد نیاز بستگی دارد. در این فرآیند، ذرات درشت‌تر (با مش پایین) معمولاً برای پرداخت اولیه استفاده می‌شوند، زیرا با نفوذ بیشتر در سطح، نرخ برداشت ماده را افزایش می‌دهند، اما زبری سطح بیشتری باقی می‌گذارند. در مقابل، ذرات ریزتر (با مش بالا) که برای پرداخت نهایی مناسب‌اند، با نفوذ سطحی کمتر، زبری را کاهش می‌دهند، اما نرخ برداشت ماده در آن‌ها پایین‌تر است است [۲۴]. این رابطه معکوس بین اندازه ذرات و نتایج پرداخت، امکان انتخاب دقیق‌تر پارامترها را بر اساس نیازهای هر پروژه فراهم می‌کند. شکل ۷-ج به‌وضوح نشان می‌دهد که با افزایش اندازه مش ساینده کاربرد سیلیسیوم، مقدار درصد تغییر در زبری سطح روند افزایشی دارد. بیشترین مقدار درصد تغییر در زبری سطح در اندازه مش ۱۰۰۰ مشاهده می‌شود. بر اساس ارزیابی‌های دقیق، مقداری درصد تغییر در زبری سطح برای مش‌های ۲۴۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ به ترتیب ۴۰/۴۰ درصد، ۸۶/۱۲ درصد و ۹۰/۶۱ درصد افزایش یافته است. برای تحلیل این نتایج می‌توان گفت که در ابزار ماشین‌کاری با مش ۲۴۰، به دلیل توزیع نیروهای ماشین‌کاری بین تعداد کمتری از ذرات ساینده (ناشی از حجم ثابت لاستیک استایرن بوتادین) عمق نفوذ دانه‌ها افزایش یافته و برداشت ماده بیشتر می‌شود. این شرایط منجر به خشن‌کاری سطح، حذف آثار تراشکاری سی‌ان‌سی و ایجاد میکرو خراش‌های متناسب با مش ۲۴۰ می‌گردد. در مقابل، ابزار ماشین‌کاری با مش ۶۰۰ با کاهش اثر دانه‌های ساینده، پرداخت نهایی با زبری کمتر را ایجاد می‌کند. در نهایت، ابزار ماشین‌کاری با مش ۱۰۰۰ با حداقل اثرگذاری روی سطح، پرداخت نانویی حاصل می‌کند که نتیجه آن سطحی صیقلی (حدود $0.0203 \mu\text{m}$) و آینه‌ای است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که انتخاب اندازه مش ساینده نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به کیفیت پرداخت مطلوب دارد. شکل ۸ که مورفولوژی سطح نمونه‌ها را نشان می‌دهد، به‌وضوح یافته‌های مذکور را تأیید می‌کند.

۳-۲- مقایسه مورفولوژی سطح نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند ماشین‌کاری جریان ساینده

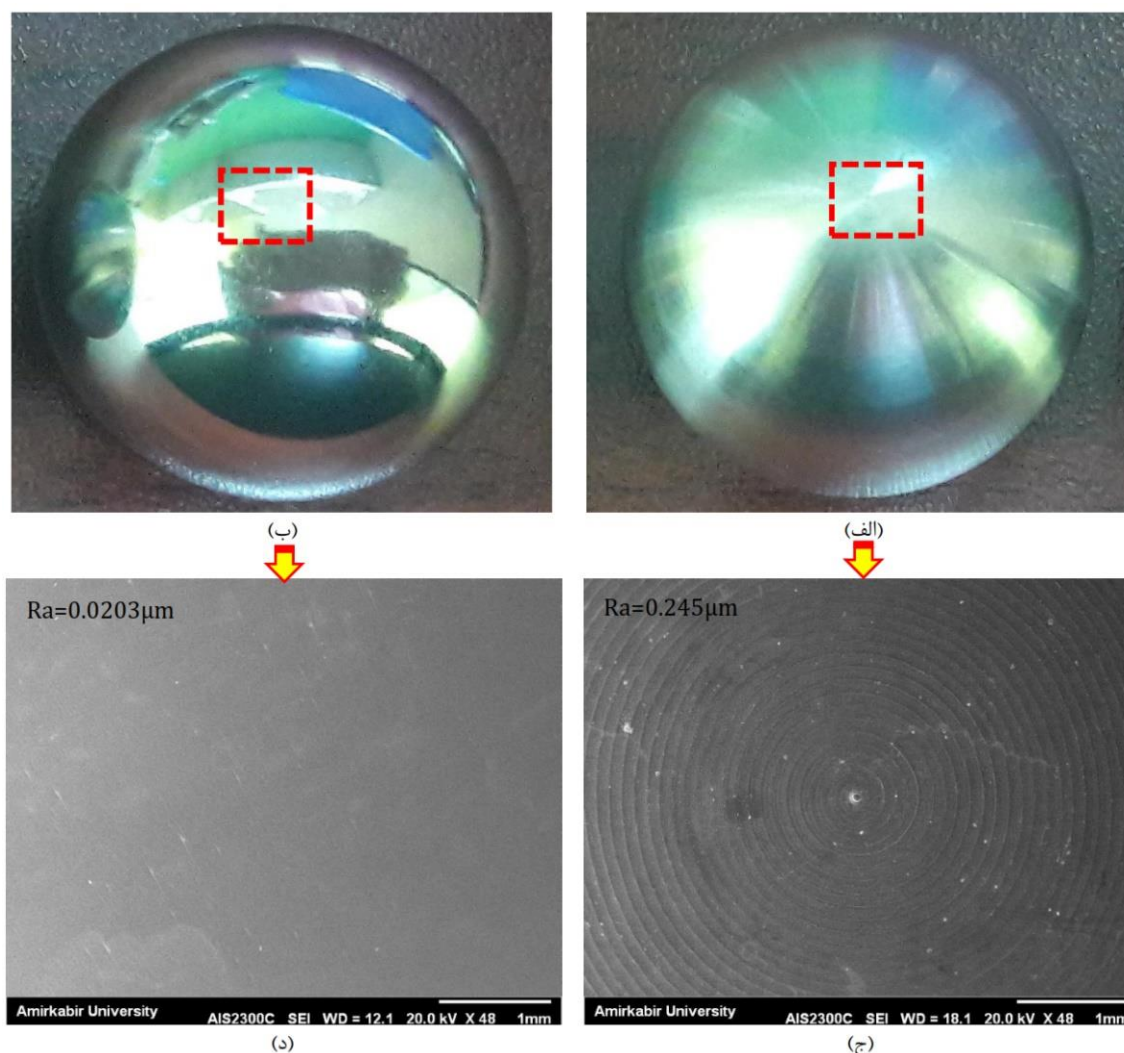
برای درک بهتر نتایج این پژوهش، مورفولوژی سطح سر فلزی فمورال

مفصل ران مصنوعی، قبل و بعد از فرآیند ماشین‌کاری جریان ساینده، با استفاده از تصاویر واقعی (شکل‌های ۹-الف و ۹-ب) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل‌های ۹-ج و ۹-د) به‌صورت مقایسه‌ای بررسی شده است. مقایسه‌ی شکل‌های ۹-الف و ۹-ب نشان می‌دهد که محیط اطراف سر فلزی فمورال قبل از فرآیند ماشین‌کاری جریان ساینده (یعنی پس از تراشکاری سی‌ان‌سی، شکل ۹-الف) روی سطح آن منعکس نشده است. این موضوع بیانگر زبری زیاد سطح سر فلزی فمورال پیش از پردازش ماشین‌کاری جریان ساینده است که باعث محو شدن بازتاب نور میان قله‌ها و دره‌های سطح می‌شود. در مقابل، پس از ماشین‌کاری با فرآیند ماشین‌کاری جریان ساینده (شکل ۹-ب)، محیط اطراف به‌وضوح روی سطح منعکس شده است که نشان‌دهنده‌ی کاهش قابل‌توجه قله‌ها و دره‌های سطح و ایجاد بازتابی مطلوب است. همچنین، مقایسه‌ی شکل‌های ۹-ج و ۹-د گویای این است که پیش از فرآیند ماشین‌کاری جریان ساینده (یعنی پس از تراشکاری سی‌ان‌سی، شکل ۹-ج)، علاوه بر جهت مشخص ماشین‌کاری سی‌ان‌سی، ناهمواری‌های سطحی مانند خراش‌ها، شیارها و علائم پیشروی به‌روشنی دیده می‌شود، به‌طوری‌که میانگین زبری سطح $0.245 \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شده است. درحالی‌که پس از پردازش ماشین‌کاری جریان ساینده (شکل ۹-د)، این ناهمواری‌ها به‌شدت کاهش یافته و سطحی صاف و یکنواخت، مشابه آینه، با زبری در محدوده‌ی $0.0203 \mu\text{m}$ ایجاد شده است.

یافته‌های این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهد که استفاده از فیکسچر ماکت معکوس سر فمورال در فرآیند ماشین‌کاری جریان ساینده برای پرداخت سر فلزی فمورال در مفصل ران مصنوعی، روشی کارآمد و مؤثر است. در این روش، ابزار ماشین‌کاری ویسکوالاستیک تحت فشار هیدرولیک اکستروژن، به‌صورت یکنواخت روی ناهمواری‌های سطح سر فمورال جریان می‌یابد و سرعت پرداخت تقریباً ثابتی را حفظ می‌کند. این امر منجر به ماشین‌کاری یکنواخت و دقیق سر فلزی فمورال می‌شود، به‌گونه‌ای که الزامات استاندارد ISO 7206-2 در مورد محدوده مجاز زبری سطح (کمتر از $0.05 \mu\text{m}$) برای ایمپلنت‌های مفصل ران رعایت می‌شود [۴].

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، آزمایش‌های فرآیند ماشین‌کاری جریان ساینده با استفاده از فیکسچر ماکت معکوس سر فمورال بر روی سر فلزی فمورال مفصل ران مصنوعی ساخته‌شده از فولاد زنگ نزن ۳۱۶L انجام شد. هدف اصلی،



شکل ۹. نمای واقعی و تصاویر میکروسکوپی از مورفولوژی سطح سر فمورال: (الف و ج) بعد از تراشکاری سی‌ان‌سی با متوسط زبری $0.245 \mu\text{m}$ و (ب و د) بعد از فرآیند ماشین‌کاری جریان ساینده با متوسط زبری $0.0203 \mu\text{m}$ تحت شرایط ماشین‌کاری (فشار اکستروژن هیدرولیک 9 MPa ، تعداد سیکل ماشین‌کاری ۱۰۰ و اندازه مش ساینده ۱۰۰۰).

Fig. 9. Actual view and microscopy images of the surface morphology of the femoral head: (a and c) after CNC turning with an average surface roughness of $0.245 \mu\text{m}$ and (b and d) after abrasive flow machining process with an average surface roughness of $0.0203 \mu\text{m}$ under machining conditions (hydraulic extrusion pressure of 9 MPa , number of machining cycles of 100 and abrasive mesh size of 1000).

پایدار و معناداری در میانگین درصد تغییر در زبری سطح مشاهده شد که نشان‌دهنده نقش کلیدی این پارامتر در افزایش کیفیت سطح است.

- بیشترین میزان بهبود در میانگین درصد تغییر در زبری سطح در ۱۰۰ سیکل ماشین‌کاری حاصل شد. این نتیجه بر ضرورت بهینه‌سازی زمان فرآیند برای جلوگیری از اثرات منفی ناشی از سیکل‌های اضافی (مانند سایش بی‌رویه) تأکید دارد.
- با افزایش اندازه مش ساینده (از مش ۲۴۰ به ۱۰۰۰)، میزان بهبود زبری سطح به‌طور معناداری افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که برای مش‌های ۲۴۰،

بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی فرآیند شامل فشار اکستروژن هیدرولیک (۷، ۹ و 11 MPa)، تعداد سیکل‌های ماشین‌کاری (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰) و اندازه‌ی مش ساینده کاربید سیلیسیوم (۲۴۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰) بر معیار میانگین درصد تغییر در زبری سطح بود. یافته‌های این پژوهش نشان داد:

- دستگاه و روش پیشنهادی منجر به کاهش 92% درصدی زبری سطح (از $0.245 \mu\text{m}$ به $0.0203 \mu\text{m}$) شد که مؤید کارایی بالای این روش در پرداخت سطوح فلزی پیچیده است.
- با افزایش فشار اکستروژن هیدرولیک تا مقدار بهینه 9 MPa ، بهبود

of abrasive flow machining, Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers (ASME), International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. Volume 5: Manufacturing Materials and Metallurgy; Ceramics; Structures and Dynamics; Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education; General. Toronto, Ontario, Canada. June 4–8, (1989), V005T11A003.

- [10] D. Jung, W. Wang, S. Hu, Microscopic geometry changes of a direct-injection diesel injector nozzle due to abrasive flow machining and a numerical investigation of its effects on engine performance and emissions, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 222(2) (2008) 241-252.
- [11] M. Sarkar, V. Jain, Nanofinishing of freeform surfaces using abrasive flow finishing process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231(9) (2017) 1501-1515.
- [12] L. Zhang, Z. Yuan, D. Tan, Y. Huang, An improved abrasive flow processing method for complex geometric surfaces of titanium alloy artificial joints, Applied Sciences, 8(7) (2018) 1037.
- [13] R. Ji, Z. Qi, J. Chen, L. Zhang, K. Lin, S. Lu, Y. Li, Numerical and experimental investigation on the abrasive flow machining of artificial knee joint surface, Crystals, 13(3) (2023) 430.
- [14] S.I. WARISAWA, H. SAWANO, M. MITSUISHI, K. KURAMOTO, Ultra-precision finishing for the femoral head of the artificial hip joint by means of abrasive waterjet, 砥粒加工学会誌, 48(2) (2004) 90-95.
- [15] S. Zeng, L. Blunt, R. Racasan, An investigation of the viability of bonnet polishing as a possible method to manufacture hip prostheses with multi-radius femoral heads, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 70 (2014) 583-590.
- [16] K.T. Subramanian, N. Balashanmugam, P.V. Shashi Kumar, Nanometric finishing on biomedical implants by abrasive flow finishing, Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 97 (2016) 55-61.
- ۶۰۰ و ۱۰۰۰ میانگین درصد تغییر در زبری سطح به ترتیب ۴۰/۴۰٪، ۸۶/۱۲٪ و ۹۰/۶۱٪ بهبود یافت. این امر نشان‌دهنده‌ی وابستگی قوی کیفیت سطح نهایی به اندازه ذرات ساینده است.

منابع

- [1] M. Hasegawa, S. Tone, Y. Naito, A. Sudo, Ultra-high-molecular-weight polyethylene in hip and knee arthroplasties, Materials, 16(6) (2023) 2140.
- [2] J. Cooper, D. Dowson, J. Fisher, Macroscopic and microscopic wear mechanisms in ultra-high molecular weight polyethylene, Wear, 162 (1993) 378-384.
- [3] A. Jedenmalm, S. Affatato, P. Taddei, W. Leardini, U. Gedde, C. Fagnano, M. Viceconti, Effect of head surface roughness and sterilization on wear of UHMWPE acetabular cups, Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials, 90(4) (2009) 1032-1042.
- [4] P.O. Cubillos, V.O. dos Santos, A.L. Pizzolatti, A.D. O. Moré, C.R. M. Roesler, Surface finish of total hip arthroplasty implants: are we evaluating and manufacturing them appropriately?, Journal of Testing and Evaluation, 49(6) (2021) 4550-4559.
- [5] L. Rhoades, Abrasive flow machining: a case study, Journal of Materials Processing Technology, 28(1-2) (1991) 107-116.
- [6] S. Han, F. Salvatore, J. Rech, J. Bajolet, Abrasive flow machining (AFM) finishing of conformal cooling channels created by selective laser melting (SLM), Precision Engineering, 64 (2020) 20-33.
- [7] J. Kenda, F. Pusavec, G. Kermouche, J. Kopac, Surface integrity in abrasive flow machining of hardened tool steel AISI D2, Procedia Engineering, 19 (2011) 172-177.
- [8] S. Singh, H. Kumar, S. Kumar, S. Chaitanya, A systematic review on recent advancements in Abrasive Flow Machining (AFM), Materials Today: Proceedings, 56 (2022) 3108-3116.
- [9] W.B. Perry, J. Stackhouse, Gas turbine applications

- parameters of abrasive flow finishing for hip joint implants, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235(11) (2021) 1818-1831.
- [24] V. Jain, S. Adsul, Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(7) (2000) 1003-1021.
- [25] L. Dabrowski, M. Marciniak, T. Szewczyk, Analysis of abrasive flow machining with an electrochemical process aid, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(3) (2006) 397-403.
- [26] R. Williams, K. Rajurkar, Stochastic modeling and analysis of abrasive flow machining, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 114 (1) (1992) 74-81.
- [27] M.R. Sankar, V. Jain, J. Ramkumar, Experimental investigations into rotating workpiece abrasive flow finishing, *Wear*, 267(1-4) (2009) 43-51.
- [28] S. Singh, M.R. Sankar, Design and performance evaluation of abrasive flow finishing process during finishing of stainless steel tubes, *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5) (2015) 3161-3169.
- [29] R. Jain, V. Jain, P. Kalra, Modelling of abrasive flow machining process: a neural network approach, *Wear*, 231(2) (1999) 242-248.
- [30] R. Williams, K. Rajurkar, L. Rhoades, Performance characteristics of abrasive flow machining, *Technical Paer of the Society of Manufacturing Engineers (SME)*, FC89-806, (1989) 695-706.
- [17] C. Döbberthin, R. Müller, G. Meichsner, F. Welzel, M. Hackert-Oschätzchen, Experimental analysis of the shape accuracy in electrochemical polishing of femoral heads for hip endoprosthesis, *Procedia Manufacturing*, 47 (2020) 719-724.
- [18] Y. Choopani, M. Khajehzadeh, M.R. Razfar, Development of fiber flow finishing (FFF) process for polishing hip prostheses, *Journal of Manufacturing Processes*, 68 (2021) 1245-1260.
- [19] Y. Choopani, M. Khajehzadeh, M.R. Razfar, Novel polishing media based on fiber for finishing hip joint implants, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118 (2022) 479-495.
- [20] A.W. Hashmi, H.S. Mali, A. Meena, K.K. Saxena, A.P.V. Puerta, U.S. Rao, D. Buddhi, K.A. Mohammed, Design and modeling of abrasive flow finishing of freeform surfaces of FDM printed femoral component of knee implant pattern, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17(5) (2023) 2507-2526.
- [21] M. Meena, N. Dixit, V. Sharma, Abrasive Flow Machining of Additively Manufactured Femoral Head of the Hip Joint, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(18) (2024) 9467-9479.
- [22] Y. Choopani, M. Khajehzadeh, M.R. Razfar, Using inverse replica fixture technique for improving nano-finishing of hip joint implant in abrasive flow finishing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110 (2020) 3035-3050.
- [23] Y. Choopani, M. Khajehzadeh, M.R. Razfar, Optimal

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Y. Choopani, M. Khajehzadeh, M. R. Razfar, An Experimental Study on Abrasive Flow Machining of Artificial Hip Joint, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 57(2) (2025) 215-234.

DOI: [10.22060/mej.2025.24050.7834](https://doi.org/10.22060/mej.2025.24050.7834)



