

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 57(2) (2025) 215-234 DOI: 10.22060/mej.2025.24050.7834

An Experimental Study on Abrasive Flow Machining of Artificial Hip Joint

Yahya Choopani¹*, Mohsen Khajehzadeh², Mohammad Reza Razfar²

¹Department 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

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 (% Δ 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 %∆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.

ABSTRACT: Due to its unique geometry, the uniform machining of the femoral head in artificial hip

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 μ m for the UHMWPE cup and less than 0.2 μ 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 (ΔRa) 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



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



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 % Δ Ra of the femoral head of an artificial hip joint. As shown in Fig. 4a, % Δ Ra 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 % Δ Ra 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 (% Δ Ra improvement of 40.40%) due to deeper particle penetration. Mesh 600 yielded a more notable surface roughness reduction (% Δ Ra improvement of 86.12%), while mesh 1000 yielded a highly polished, mirror-like surface (% Δ Ra improvement of 91.61%). These results corroborate the strong dependency of final surface finish on abrasive mesh size.

$\ensuremath{\mathsf{3-2-Comparison}}$ of surface morphology of samples before and after $\ensuremath{\mathsf{AFM}}$

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 μ m) 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 μ m, resulting in a smooth, mirror-like surface that provided a clear reflection of



Fig. 4. Effect of AFM process input parameters on the average %∆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, Ultrahigh-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.

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۷ شماره ۲، سال ۱۴۰۴، صفحات ۲۱۵ تا ۲۳۴ DOI: 10.22060/mej.2025.24050.7834

مطالعه تجربی بر روی ماشین کاری جریان ساینده مفصل ران مصنوعی

يحيى چوپانى'*، محسن خواجەزادە'، محمدرضا رازفر'

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: ۱۲۰۴/۰۱/۱۹ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹ ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

کلمات کلیدی: ماشین کاری جریان ساینده مفصل ران مصنوعی فیکسچر ماکت معکوس ابزار ماشین کاری زبری سطح

ماکروسکوپی بررسی کردند و دریافتند که میزان سایش این کاسه به زبری

سطح سر فلزی فمورال بستگی دارد؛ بهطوری که با کاهش زبری سطح،

سایش نیز کمتر می شود. در مطالعه ای دیگر، جدنمالم و همکاران [۳] تأثیر

زبری سطح سر فلزی فمورال بر سایش کاسه پلیاتیلن با وزن مولکولی بسیار

بالا را بررسی کردند و گزارش دادند که افزایش زبری سطح سر فلزی، نرخ

سایش کاسه پلیاتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا را بهطور چشمگیری بالا

میبرد. با توجه به اهمیت زبری سطح سر فلزی فمورال در نرخ سایش و

طول عمر پروتزهای مفصل ران، استاندارد بینالمللی ISO 7206-2 پس

از بررسیهای جامع اعلام کرده است که میانگین زبری سطح سر فلزی

فمورال و کاسه پلیاتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا باید به ترتیب کمتر از

mμ ۲ mμ و ۳μ ۲/۰۵ mμ و ۲ mμ

ماشین کاری جریان ساینده ٔ بهعنوان یک راهحل مؤثر و کارآمد برای پرداخت

سطوح پیچیده مطرح شده است. در ادامه، روند تکاملی این تکنولوژی مورد

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 سیکلهای ماشین کاری و اندازه مش ساینده کاربید سیلیسیوم بر میانگین درصد تغییر در زبری سطح سر فمورال مفصل ران مصنوعی ساخته شده از فولاد زنگ نزن IT۶۲ 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. آزمایشهای انجام شده نتایع کارایی این روش را تأیید میکنند، بلکه نشان می دهند که میانگین درصد تغییر در زبری سطح نمونهها با استفاده از سایندههای با مش ۲۰۶۰، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۰ به ترتیب ۲۰/۴۰، ۲۰/۶۲٪ و ۲۰/۰۰ بهبود یافته است. همچنین، بررسی مورفولوژی سطح نمونهها نشان داد که روش پیشنهادی سطحی صاف و یکنواخت بدون آسیبهای سطحی ایجاد کرده است که منجر به بهبود یکپارچگی سطح مش ۲۰۵ مرجز و بین بهبود یکوران مان می ده در آسیبهای سطحی ایجاد کرده است که منجر به بهبود یکپارچگی سطح داد که روش پیشنهادی می مود

۱ – مقدمه

آرتروپلاستی کامل مفصل ران^۱ یکی از جراحیهای مؤثر ارتوپدی است که در شکل ۱ بهصورت شماتیک نمایش داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده میشود، مفصل ران مصنوعی جایگزین مفصل طبیعی شده است. در این پروتز، یک کاسه پلیاتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا^۲ بین سر فلزی فمورال^۳ و کاسه فلزی قرار میگیرد. به دلیل تماس مداوم سر فلزی با کاسه پلیاتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا، پدیده سایش رخ میدهد. مطالعات نهتنها این پدیده را تأیید کردهاند، بلکه نشان دادهاند که سایش کاسه پلیاتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا تأثیر قابل توجهی بر طول عمر مفصل ران مصنوعی دارد [۱]. کوپر و همکاران [۲] مکانیسم سایش در کاسه پلیاتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا را از دیدگاه میکروسکوپی و

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

4. Abrasive flow machining (AFM)

Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

^{*} نویسنده عهدهدار مکاتبات: Choopani@meybod.ac.ir

بررسی قرار میگیرد.

تکنولوژی ماشین کاری جریان سایندہ یکی از روش های ماشین کاری غیر سنتی است که در سال ۱۹۶۰ توسط شرکت اکسترود هون در آمریکا توسعه یافت. این تکنولوژی برای عملیات مختلفی مانند پرداخت کاری، دبورینگ^۲، ریدایزینگ، پولیشینگ و سایر فرآیندهای اصلاح سطح در صنایع پیشرفته ازجمله یزشکی، هوافضا، خودروسازی و دیگر حوزهها به کار می رود [۵]. در این روش، ابزار ماشین کاری ترکیبی از یک ماده حامل ویسکوالاستیک، ذرات ساینده و افزودنیهای دیگر است که در آن ذرات ساینده بهصورت تصادفی و بدون جهت مشخص توزیع شدهاند. با اعمال فشار هیدرولیک، این ابزار مانند یک چرخ سنگ نرم و انعطافیذیر رفتار می کند و با تغییر شکل، خود را با سطح قطعه کار تطبیق می دهد. در این حالت، ابزار انعطاف پذیر از طريق فيكسچر مخصوص روى ناهموارىهاى سطح قطعهكار به حركت درمیآید و با حرکت رفت و برگشتی، عملیات پرداخت را انجام میدهد. این فرأيند تا رسيدن به صافى مطلوب سطح ادامه مى يابد [8] . با توجه به ماهيت تکنولوژی ماشین کاری جریان ساینده، عمق نفوذ ذرات ساینده به سطح قطعه کار بسیار کم است. بنابراین، این روش نهتنها قادر است ناهمواریها را تا مقیاس میکرو و نانومتر کاهش دهد، بلکه از نظر تکنولوژیهای ساخت، یک فرآیند سرد محسوب می شود. این ویژگی باعث ایجاد تنش های پسماند فشاری روی سطح قطعه کار می شود که از نظر یکپارچگی سطح⁶ و بهبود عملکرد بسیار مطلوب است [۷]. بااین حال، تلاش های گستردهای برای به کارگیری تکنولوژی ماشین کاری جریان ساینده در صنایع مختلف، به ویژه روی سطوح پیچیده مهندسی، صورت گرفته است [۸]. در ادامه، برخی از این كاربردها مرور مىشود.

پری و استکهاوس [۹] در یک مطالعه جامع، کاربرد تکنولوژی ماشینکاری جریان ساینده را در ماشینکاری قطعات توربینهای گازی ازجمله 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

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 بهواسطه این تکنولوژی نهتنها موجب ارتقای عملکرد موتور گردیده، بلکه به کاهش قابل توجه آلایندهها نیز منجر شده است.

سارکار و جین [۱۱] ماشین کاری سطوح آزاد سر فمورال مفصل زانو مصنوعی ساخته شده از فولاد زنگ نزن را با استفاده از تکنولوژی ماشین کاری جریان ساینده بررسی کردند. نتایج نشان داد که این تکنولوژی سطحی با یرداخت 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^ع برای پروتزهای مفصل زانو سازگاری دارد. همچنین، آنها اشاره کردند که این روش علاوه بر کاهش زمان ماشین کاری، منجر به دوام بیشتر، خواص تريبولوژيکی بهتر و عملکرد بالاتر مفصل زانو مصنوعی می شود. در مطالعهای دیگر، ژانگ و همکاران [۱۲] سطوح هندسی پیچیده سر فمورال مفصل زانو مصنوعی ساختهشده از آلیاژ تیتانیوم را با استفاده از تکنولوژی ماشین کاری جریان ساینده، ماشین کاری 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 ماشین کاری جریان ساینده، ماشین کاری سطوح مفصل زانو مصنوعی تیتانیومی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که این تکنولوژی برای ماشین کاری مفصل زانو مصنوعی مناسب است، زیرا زبری سطحی یکنواخت در محدوده ۱۷۱ تا ۳۹۴ نانومتر برای نمونهها به دست آمد.

واریساوا و همکاران [۱۴] از جت آب ساینده^۷ برای پرداخت سطح سر فمورال مفصل ران مصنوعی ساختهشده از آلیاژ کبالت-کروم-مولیبدن^۸ استفاده کردند. نتایج نشان داد که این روش زبری سطح را تا محدوده ۲/۲ نانومتر کاهش میدهد. بااین حال، این روش باعث کاهش دقت گردی سر فمورال میشود. در مطالعه دیگری، سانگ و همکاران [۱۵] پرداخت کاری سر فمورال مفصل ران مصنوعی ساختهشده از آلیاژ 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.

^{1.} Extrude Hone Corporation

^{2.} Deburring

^{3.} Radiusing

^{4.} Polishing

^{5.} Surface integrity

^{6.} American Society for Testing and Materials (ASTM)

^{7.} Abrasive water jet (AWJ)

^{8.} Cobalt-chromium-molybdenum (CO-Cr-Mo)

^{9.} Bonnet polishing

اگرچه مزایای متعددی برای این تکنولوژی گزارش شده است، اما از نظر بهرهوری دارای محدودیتهایی است. علاوه بر این، چالش اصلی این روش، فرسایش ابزار ماشین کاری است که نیازمند نظارت و اصلاح مداوم میباشد. در تلاشی دیگر، سابرمانیان و همکاران [۱۶] پرداختکاری نانومتری سر فمورال مفصل ران مصنوعی از جنس کروم-کبالت را با استفاده از فرآیند ماشین کاری جریان ساینده مورد مطالعه قرار دادند. آنها حداقل زبری سطح بهدستآمده را ۳۹ نانومتر گزارش کردند. بااین حال، تصاویر میکروسکوپی نشان دهنده عدم یکنواختی در پرداخت سطح است که علت آن طراحی نامناسب فیکسچر نگهدارنده سر فمورال میباشد. این موضوع منجر به توزیع غیریکنواخت سرعت جریان ابزار پرداخت کاری در سطح قطعه شده است. در مطالعه دیگری، دوبرتین و همکاران [۱۷] با استفاده از روش پولیش کاری الكتروشيميايي، سطح سر فمورال مفصل ران مصنوعي از جنس آلياژ كروم-کبالت را تا زبری ۳µ ۰/۰۲ پرداخت کردند. این فرآیند شامل مراحل متوالی تراشکاری (بهعنوان ماشین کاری اولیه)، ۱۸۰ دقیقه سنگزنی بشکهای، ۵۰ دقیقه سنگزنی درگ^۳ و درنهایت ۳ دقیقه پرداخت نهایی با پولیش کاری الكتروشيميايي بود. نتايج نشان داد كه دستيابي به اين سطح از يرداخت نیازمند حدود ۲۳۳ دقیقه زمان است. باوجود 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 پرداختکاری خودکار سر فمورال مفصل ران مصنوعی از جنس فولاد زنگ نزن ۱۳۱۶ ارائه کردند. در این روش، از الیاف سیسال^۴ بهعنوان جایگزینی کارآمد برای سایندههای متعارف استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان میدهد که این روش نهتنها توانسته سطحی صاف با کیفیت آینهای (زبری سطح۶۹۶۶ تانومتر) ایجاد کند، بلکه بدون ایجاد آسیبهای 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 مدلسازی رسوب ذوبشده^م، به بررسی پرداختکاری سطوح این قطعات با تکنولوژی ماشینکاری جریان ساینده پرداختند. نتایج

درصد بهبود بخشد. پژوهشگران این روش را بهعنوان راهکاری امیدبخش برای ارتقای کیفیت سطوح قطعات تولیدی به روش مدلسازی رسوب ذوب شده معرفی کردهاند. در پژوهشی جدید، مینا و همکاران [۲۱] ابتدا سر فمورال مفصل ران مصنوعی را با استفاده از تکنولوژی تفت جوشی لیزری انتخابی² طراحی و ساختند، سپس فرآیند ماشین کاری نمونهها را با روش ماشین کاری جریان ساینده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که زبری سطح نمونهها ۲۵/۱۹ درصد بهبودیافته و میزان برداشت ماده ۶۹ میلی گرم ثبت شده است.

مطالعات پیشین نشان میدهد روشهای فعلی پرداخت کاری سر فمورال مفصل ران مصنوعی با چالشهای متعددی از جمله دقت هندسی پایین، سایش سریع ابزار، پرداخت غیریکنواخت، بازدهی کم و زمان فرآیند طولانی مواجه هستند. در صنعت داخلی نیز روشهای سنتی مانند پولیش کاری دستی نه تنها قادر به ایجاد سطحی یکنواخت نیستند، بلکه از نظر اقتصادی و زمانی مقرون به صرفه نمى باشند. ضرورت اين مطالعه، توسعه يک سيستم پرداخت خودکار و کارآمد برای رفع مشکلات کیفی و افزایش بهرموری روشهای موجود است. نوآوری های کلیدی این پژوهش شامل ۱) طراحی و ساخت یک نمونه صنعتی از دستگاه ماشین کاری جریان ساینده ، ۲) توسعه فیکسچر ماکت معکوس متناسب با آناتومی سر فمورال، ۳) بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند (فشار اکستروژن هیدرولیک، تعداد سیکلهای ماشین کاری و اندازه مش ساینده) بر روی میانگین درصد تغییر در زبری سطح^۲ سر فلزی فمورال ساخته شده از فولاد زنگ نزن ۳۱۶L و ۴) تحلیل مورفولوژی سطح با ميكروسكوپ الكتروني روبشي^ ميباشد. يافتههاي اين مطالعه ميتواند تحولی در فرآیند تولید ایمپلنتهای ارتوپدی ایجاد کرده و جایگزین مناسبی برای روشهای 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

^{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. اَرتروپلاستی 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 ساینده: 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 نفتنیک، از آسیاب دو غلتكى مدل پلىمىكس ال ٢٠٠^۴ ساخت آلمان استفاده شد كه جزئيات 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 نفتنیک بهتدریج 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 ناهمواریهای سطح سر فلزی فمورال جریان یابد. برای کاهش ویسکوزیته و افزایش انعطاف پذیری و خودشکل دهی ابزار ماشین کاری، با توجه به اندازه مش ساینده کاربید سیلیسیوم (یعنی ۲۴۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰)، به ترتیب ۱٪، ۲٪ و ۳٪ روغن نفتنیک اضافه شد. پسازاین اصلاح، مشاهده شد که ابزار ماشین کاری تحت فشار اکستروژن هیدرولیک، مانند یک چرخسنگ انعطاف پذیر روی سطح سر فلزي فمورال جريان مي يابد. نتيجه اين بهبود، دستيابي به ابزاري متناسب با هندسه سر فمورال مفصل ران مصنوعی بود که از نظر کاربرد در فرآیندهای ساخت و تولید، بینظیر است (شکل ۲-ب را ببینید).

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

۲ –۳ – رویکرد تجربی

در این پژوهش، از سر فلزی فمورال مفصل ران مصنوعی ساختهشده از فولاد زنگ نزن L ۳۱۶ با قطر ۲۸ میلیمتر و سختی برینل ۳۲۱ استفادهشده است. ترکیب شیمیایی این ماده در جدول ۱ ارائهشده است. تمامی نمونهها توسط شرکت خدمات پزشکی دوستان نیک تأمین شدهاند و در شکل ۵، تعدادی از آنها به همراه یک پروتز مفصل ران نمایش داده شده است. پیش و پس از انجام آزمایشها، نمونهها به مدت ۴ دقیقه در حمام آلتراسونیک تمیز شدند. سپس زبری سطح نمونهها (قبل و بعد از فرآیند) در جهت عمود بر جریان ماشین کاری، در ۵ نقطه مختلف روی بخش بالایی سر فمورال شده است. دستگاه ماشین کاری جریان ساینده شامل سازه اصلی، پاور یونیت هیدرولیک (متشکل از موتور سهفاز، پمپ، گیج فشار و غیره)، سیستمهای هیدرولیک جکهای بالا و پایین، سیلندرهای ابزار ماشین کاری بالا و پایین، مكانيسم بازوى متحرك سيلندر بالايي، ميكروسوييچهاى بالا و پايين، ينل عملياتي و ساير اجزاء است. اين سيستم امكان كنترل و تنظيم فشار اکستروژن هیدرولیک، طول کورس پیستون ها، حجم ابزار ماشین کاری و تعداد سیکلهای ماشین کاری را فراهم می کند. ابزار ماشین کاری ویسکوالاستیک تركيبي از لاستيك استايرن بوتادين٬ ساينده كاربيد سيليسيوم٬ و روغن نفتنیک است که بین فیکسچر ماکت معکوس و سر فلزی فمورال قرار می گیرد. با استفاده از سیستم هیدرولیک جکهای بالا و پایین، ابزار ماشین کاری بهصورت 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 ناهمواریهای سطح را بهبود میبخشد. جنس فیکسچر از پلیآمید ضد سایش انتخابشده که استحکام بالا، مقاومت به سایش و آببندی عالی دارد و با استفاده از فرز سیانسی 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 عمليات ميكرو-نانو ماشين كارى مطابق با هندسه قطعه انجام شود. اين روش امکان پرداخت دقیق و یکنواخت سطح سر فلزی فمورال را با دقت بالا فراهم مي كند.

۲- ۲- ساخت ابزار ماشین کاری

در پژوهش حاضر، با استفاده از منابع [۲۲] و [۲۳] و همچنین آزمایشهای اولیه، سه نوع ابزار ماشین کاری ویسکوالاستیک با ترکیبی از ۱۴ درصد وزنی لاستیک استایرن بوتادین، ۸۸ درصد وزنی ساینده کاربید سیلیسیوم در اندازههای مش ۲۴۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ (شکل ۳) و ۸ درصد وزنی روغن نفتنیک، مطابق رابطه (۱) ساخته شد. برای اختلاط یکنواخت لاستیک

^{4.} Polymix L200

^{5.} SURFCOM 130A

^{1.} Styrene butadiene rubber (SBR)

^{2.} Silicon carbide (SiC)

^{3.} Computer numerical control (CNC)





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

ساخت شرکت کارل زایس ^۸ آلمان انجام گرفت. پارامترهای اندازه گیری شامل طول ارزیابی ۴ میلیمتر، فیلتر زبری ۸۰٫۰۸ میلیمتر و سرعت ردیابی ۶٫۰ میلیمتر بر ثانیه بود. میانگین زبری سطح اولیه نمونهها در نقاط مختلف، ۳µ ۲/۲۴۵ ثبت شد. نحوه اندازه گیری زبری سطح نمونههای سر فلزی در شکل ۶ نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند ماشین کاری جریان ساینده شامل فشار اکستروژن هیدرولیک، تعداد سیکلهای ماشین کاری و اندازه مش ساینده کاربید سیلیسیوم 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 مرحلهٔ ماشین کاری شامل خشن کاری)

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۳۱۶L.

Table 1.	Chemical	composition	of 316L	stainless	steel.
----------	----------	-------------	---------	-----------	--------

درصد وزنی (٪)	عنصر شيميايي
فلز پايه	آهن
• / • ٣	كربن
۲/• •	منگنز
۰/•۲۵	فسفر
• / • • ٣	گوگرد
• /Y ۵	سيليسيم
۱۷/••-۱۹/••	كروم
۱۳/۰۰-۱۵/۰۰	نيكل
۲/۷۰-۳/۰۰	موليبدن

1. Carl Zeiss

2. Full factorial method



شکل ۴. مراحل ساخت یک ابزار ماشین کاری. Fig. 4. The steps of manufacturing a machining tool.

با سایندهٔ مش ۲۴۰ (، پرداخت کاری (با سایندهٔ مش ۶۰۰) و نانو پرداخت کاری (با سایندهٔ مش ۱۰۰۰) انجام شد. پارامترهای ورودی و سطوح آنها در جدول ۲ و دادههای تجربی در جدول ۳ ارائه شدهاند.

Percentchange in surface roughness,

$$Ra\left(or \ \%\Delta R_{a}\right) = \left(\frac{Initial_{Ra} - Final_{Ra}}{Initial_{Ra}}\right) \times 100 \tag{(Y)}$$

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، تأثير فشار اکستروژن هيدروليک بر ميانگين درصد

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



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 اندازه گیری زبری سطح سر فمورال با استفاده از زبری سنج A ZEISS SURFCOM.



جدول ۲. پارامترها و سطوح مورداستفاده در روش طراحی آزمایش کامل.

Fable 2. Parameters and levels use	d in the full	experimental	design method.
---	---------------	--------------	----------------

مقادير سطوح پارامترها		واحد	پارامترها ورودی فرآیند	
11	٩	٧	(MPa)	فشار اكستروژن هيدروليک
۱۵	۱۰۰	۵۰		تعداد سیکلهای ماشین کاری
1 • • •	۶	74.		اندازه مش ساینده

جدول ۳. دادههای تجربی بهدست آمده بر اساس روش طراحی آزمایش کامل.

<i>زبری سطح (</i> μm <i>)</i>		شماره آزمایش		
	اندازه مش ساینده	تعداد سیکلهای ماشینکاری	فشار اکستروژن هیدرولیک ۱۹۹۸	_
			(IVIF a)	
•/194	74.	۵۰	Ŷ)
•/• ٣٧	<i>\\$</i>	۵۰	Y	٢
•/• ٢٢	1	۵۰	Y	٣
•/14٣	74.	1	γ	۴
•/•٣١	۶	1	٧	۵
۰/۰۲۵	1	1	٧	۶
•/\\.	74.	10.	٧	٧
•/• 47	۶	۱۵۰	Y	٨
• / • YV	1	۱۵۰	Y	٩
•/137	74.	۵۰	٩	١.
٠/•٣١	۶	۵۰	٩))
•/• ٣	1	۵۰	٩	١٢
•/\\۶	74.	1	٩	١٣
•/• ۲٨	۶	1	٩	14
• / • ۲ • ۳	1 • • •	۱۰۰	٩	۱۵
•/107	74.	۱۵۰	٩	18
•/• ۳۵	۶	۱۵۰	٩	17
•/• 44	1	۱۵۰	٩	١٨
٠/١۴٩	74.	۵۰	11	١٩
•/• ٣٧	۶	۵۰	11	۲.
• / • T I	1	۵۰	11	۲۱
۰/۱۲۶	74.	1	11	٢٢
•/•٣۴	۶	1	11	۲۳
•/• 44	1	۱	11	74
•/188	74.	۱۵۰	11	۲۵
•/•٣٣	۶	۱۵۰	11	78
•/• 88	1	10.	11	۲۷

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

همچنین، با افزایش فشار، ویسکوزیته ابزار ماشین کاری 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 وقتی فشار اکستروژن هیدرولیک از ۷ به MPa ۹ افزایش مییابد، درصد تغییر در زبری سطح به حداکثر مقدار خود می سد. این نشان دهنده بیشترین میزان ماشین کاری در فشار MPa ۹ است. اما با افزایش فشار به ۱۸ MPa، درصد تغییر در زبری سطح کاهش مییابد. بنابراین، بیشترین درصد تغییر در زبری سطح در فشار بهینه MPa ۹ رخ می دهد. برای توضیح این رفتار می توان گفت که با افزایش فشار، عمق نفوذ دانه های ساینده به ناهمواری های سطح بیشتر می شود. درنتیجه، برداشت ماده افزایش یافته و ناهمواری های سطح کاهش می یابد که به افزایش درصد تغییر در زبری سطح منجر می شود.



(ج)





منفی بر درصد تغییر در زبری سطح می گذارد. از سوی دیگر، شکست دانهها باعث ایجاد ذرات کوچکتری می شود که نیروی ماشین کاری بین آن ها توزیع می شود. درنتیجه، در فشار بالا (مثلاً ۱۹۸۹)، میزان برداشت ماده نسبت به فشار بهینه (۹ MPa) کمتر شده و درصد تغییر در زبری سطح کاهش می یابد.

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

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 بهصورت 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]. همان طور که در شکل ۷–ب مشاهده میشود، با افزایش تعداد سیکلهای ماشین کاری، مقدار درصد تغییر در زبری سطح ابتدا افزایش و سپس کاهش



(ج)





فمورال به دلیل تراشکاری سیان سی 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 بهشدت 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. درنتیجه، توانایی لاستیک استایرن بوتادین در نگهداری ذرات ساینده کم میشود و ذرات به جای برش سطح، می یابد. این روند نشان دهنده وجود یک مقدار بهینه برای تعداد سیکلهای ماشین کاری در پرداخت سطح سر فمورال مفصل ران مصنوعی است. بررسی دقیق تر نشان می دهد که با افزایش تعداد سیکلها از ۵۰ تا ۱۰۰، مقدار درصد تغییر در زبری سطح افزایش می یابد که بیانگر بیشترین کارایی ماشین کاری در ۱۰۰ سیکل است. اما با افزایش تعداد سیکلها به ۱۵۰، مقدار درصد تنییر در زبری سطح به حداقل خود می رسد. بنابراین، شکل ۸ به وضوح نشان می دهد که بیشترین مقدار درصد تغییر در زبری سطح در ۱۰۰ سیکل ماشین کاری اتفاق می افتد. برای توجیه این رفتار می توان چنین استد لال کرد: قبل از فرآیند ماشین کاری جریان ساینده، ناهمواری های 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 کاربید 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 ماشین کاری جریان ساینده به جنس قطعه کار و کیفیت پرداخت مورد نیاز بستگی دارد. در این فرآیند، ذرات درشتتر (با مش پایین) معمولاً برای پرداخت اولیه استفاده می شوند، زیرا با نفوذ بیشتر در سطح، نرخ برداشت ماده را افزایش میدهند، اما زبری سطح بیشتری باقی می گذارند. 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 پایین تر است است [۲۴]. این رابطه معکوس بین اندازه ذرات و نتایج پرداخت، امکان انتخاب دقیق تر پارامترها را بر اساس نیازهای هر پروژه فراهم میکند. شکل ۷-ج بهوضوح نشان میدهد که با افزایش اندازه مش ساینده کاربید سیلیسیوم، مقدار درصد تغییر در زبری سطح روند افزایشی دارد. بیشترین مقدار درصد تغییر در زبری سطح در اندازه مش ۱۰۰۰ مشاهده می شود. بر اساس ارزیابی های دقیق، مقادی دد در در 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 می توان گفت که در ابزار ماشین کاری با مش ۲۴۰، به دلیل توزیع نیروهای ماشین کاری بین تعداد کمتری از ذرات ساینده (ناشی از حجم ثابت لاستیک استایرن بوتادین) عمق نفوذ دانهها افزایشیافته و برداشت ماده بیشتر می شود. این شرایط منجر به خشن کاری سطح، حذف آثار تراشکاری سیان سی و ایجاد میکرو خراشهای متناسب با مش ۲۴۰ می گردد. در مقابل، ابزار ماشین کاری با مش ۶۰۰ با کاهش اثر دانههای ساینده، پرداخت نهایی با زبری کمتر را ایجاد میکند. درنهایت، ابزار ماشینکاری با مش ۱۰۰۰ با حداقل اثرگذاری روی سطح، پرداخت نانویی حاصل میکند که نتیجه آن سطحی صیقلی (حدود ۰/۰۲۰۳ mµ) و آینهای است. این یافتهها تأکید می کنند که انتخاب اندازه مش ساینده نقش تعیین کنندهای 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 نمونه ها قبل و بعد از فرآیند ماشین کاری جریان ساینده

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

مفصل ران مصنوعی، قبل و بعد از فرآیند ماشین کاری جریان ساینده، با استفاده از تصاویر واقعی (شکلهای ۹-الف و ۹-ب) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکلهای ۹-ج و ۹-د) به صورت مقایسه ای بررسی شده است. مقایسه ی شکل های ۹-الف و ۹-ب نشان می دهد که محیط اطراف سر فلزی فمورال قبل از فرآیند ماشین کاری 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 ماشین کاری جریان ساینده است که باعث محو شدن بازتاب نور میان قلهها و درههای سطح می شود. در مقابل، پس از ماشین کاری با فرآیند ماشین کاری جریان ساینده (شکل ۹-ب)، محیط اطراف بهوضوح روی سطح منعکس شده است که نشان دهندهی کاهش قابل توجه قلهها و درههای سطح و ایجاد بازتابی مطلوب است. همچنین، مقایسه ی شکل های ۹-ج و ۹-د گویای این است که پیش از فرآیند ماشین کاری جریان ساینده (یعنی پس از تراشکاری سیانسی، شکل ۹-ج)، علاوہ بر جہت مشخص ماشین کاری سیانسی، ناهمواریهای سطحی مانند خراشها، شیارها و علائم پیشروی بهروشنی دیده می شود، به طوری که میانگین زبری سطح ۰/۲۴۵ mµ اندازه گیری شده است. درحالی که پس از پردازش ماشین کاری جریان ساینده (شکل ۹-د)، این ناهمواری ها به شدت کاهش یافته و سطحی صاف و یکنواخت، مشابه آینه، با زبری در محدودهی ۰/۰۲۰۳ mµ یجاد شده است.

یافتههای این مطالعه بهوضوح نشان میدهد که استفاده از فیکسچر ماکت معکوس سر فمورال در فرآیند ماشین کاری جریان ساینده برای پرداخت سر فلزی فمورال در مفصل ران مصنوعی، روشی کارآمد و مؤثر است. در این روش، ابزار ماشین کاری 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 ماشین کاری یکنواخت و دقیق سر فلزی فمورال میشود، به گونهای که الزامات استاندارد 2062 عار مورد محدوده مجاز زبری سطح (کمتر از μm). برای ایمپلنتهای مفصل ران رعایت میشود [۴].

۴– نتیجهگیری

در این مطالعه، آزمایش های فرآیند ماشین کاری جریان ساینده با استفاده از فیکسچر ماکت معکوس سر فمورال بر روی سر فلزی فمورال مفصل ران مصنوعی ساخته شده 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 سطح سر فمورال: (الف و ج) بعد از تراشکاری سیانسی با متوسط زبری سطح μα ۹/۲۴۵ و (ب و د) بعد از فرایند ماشین کاری (فشار اکستروژن هیدرولیک MPa ۹، و (ب و د) بعد از فرایند ماشین کاری (فشار اکستروژن هیدرولیک MPa ۹، 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 μm and (b and d) after abrasive flow machining process with an average surface roughness of 0.0203 μm under machining conditions (hydraulic extrusion pressure of 9 MPa, number of machining cycles of 100 and abrasive mesh size of 1000).

> بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی فرآیند شامل فشار اکستروژن هیدرولیک (۷، ۹ و ۱۱۱ MPa)، تعداد سیکلهای ماشین کاری (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 ~۹۲ درصدی زبری
> سطح (از ۳µ ۰/۲۴۵ mμ به ۲/۲۴۵ mμ) شد که مؤید کارایی بالای این
> روش در پرداخت سطوح فلزی پیچیده است.

با افزایش فشار اکستروژن هیدرولیک تا مقدار بهینه ۹ MPa، بهبود

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 ماشین کاری 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، بهطوری که برای مشهای ۲۴۰،

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
- M. Hasegawa, S. Tone, Y. Naito, A. Sudo, Ultrahigh-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 nanofinishing 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

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۷، شماره ۲، سال ۱۴۰۴، صفحه ۲۱۵ تا ۲۳۴