

پولیش کاری سر فمورال مصنوعی با ابزار مبتنی بر الیاف سیسال زبر

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

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه میبد، میبد، ایران.
^۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
^۳ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
 مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

چکیده

در این پژوهش، پولیش کاری به کمک الیاف به عنوان روشی برای رفع عوارض ناخواسته ناشی از ساینده‌ها بر روی سطوح قطعات حساسی مانند پروتزها، عدسی‌ها و پره‌های توربین ارائه شده است. برای این منظور، ابتدا یک ابزار پولیش کاری مبتنی بر الیاف سیسال زبر ساخته شد. سپس عملکرد این ابزار بر روی نسبت زبری سطح و نرخ پولیش کاری سر فمورال مصنوعی ساخته شده از فولاد زنگ نزن 316L مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که ابزار پولیش کاری مبتنی بر الیاف سیسال زبر در پرداخت سطح سر فمورال مصنوعی مؤثر و کارآمد عمل می‌کند. مشاهدات میکروسکوپی نشان داد که مکانیسم اصلی پرداخت، شکست تدریجی الیاف سیسال و تشکیل ریزرشته‌هایی خودسازگار است که به عنوان ساینده‌ای نرم عمل می‌کنند. این فرآیند در مدت ۲/۵ ساعت، با عبور از فاز خشن کاری به نانوپر پرداخت کاری، سطحی با میانگین زبری ۳۶/۹۶ نانومتر و بازتاب آینه‌ای بر روی سر فمورال ایجاد نمود. در نتیجه، ابزار پولیش کاری مبتنی بر الیاف سیسال به‌عنوان روشی کارآمد برای اصلاح سطح قطعات با هندسه پیچیده در صنایع پزشکی، هوافضا و خودروسازی پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: ابزار پولیش کاری؛ الیاف سیسال زبر؛ سر فمورال مصنوعی؛ نسبت زبری سطح؛ نرخ پولیش کاری.

Polishing of artificial femoral head with coarse sisal fiber-based tool

Yahya Choopani^{1,*}, Mohsen Khajezadeh², Mohammad Reza Razfar³¹Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Meybod University, Meybod, Iran.²Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.³Full Prof, Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

In this study, fiber-assisted polishing is introduced as a method to eliminate the undesirable effects caused by abrasives on the surfaces of sensitive components such as prostheses, lenses, and turbine blades. To this end, a polishing tool based on coarse sisal fibers was first fabricated. The performance of this tool was then evaluated in terms of surface roughness ratio and polishing rate on an artificial femoral head made of 316L stainless steel. The results indicate that the coarse sisal fiber-based polishing tool performs effectively and efficiently in finishing the surface of the artificial femoral head. Microscopic observations revealed that the primary polishing mechanism involves the gradual fracture of sisal fibers and the formation of self-adaptive microfilaments that act as a soft abrasive. Over a period of 2.5 hours, transitioning from the rough machining phase to nano-polishing, this process produced a surface with an average roughness of 36.96 nm and mirror-like reflectivity on the femoral head. Accordingly, the sisal fiber-based polishing tool is proposed as an efficient method for surface modification of components with complex geometries in the medical, aerospace, and automotive industries.

Keywords: Polishing tool; Coarse sisal fiber; Artificial femoral head; Surface roughness ratio; Polishing rate.

۱- مقدمه

آرتروپلاستی کامل مفصل ران^۱ (THA) یکی از موفق‌ترین و مقرون به‌صرفه‌ترین جراحی‌های ارتوپدی است که در آن مفصل ران آسیب‌دیده جایگزین مفصل ران مصنوعی می‌شود، در شکل ۱ یک نمونه از آن به تصویر کشیده شده است [۱]. یافته‌ها نشان می‌دهد که یک‌راه حل مؤثر برای افزایش طول عمر THA بهبود خواص تریبولوژی (اصطکاک، روانکاری و سایش) سطوح بیرینگ این پروتزها است [۲ و ۳]. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، یکی از این سطوح بیرینگ، حرکت نسبی بین سطح کاسه پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا^۲ (UHMWPE) با سطح سر فلزی فمورال است. در این راستا، مک‌کلپ و همکاران [۴] گزارش کردند که با کاهش زبری سطح سر فمورال، سایش UHMWPE کاهش می‌یابد. در مطالعه دیگر، داوسون [۵] در یک بررسی تطبیقی جامع اذعان داشت که سختی و توپوگرافی سطح سر فمورال نقش بسیار مهمی بر روی فرآیند سایش UHMWPE دارد، به همین جهت تولید سر فلزی فمورال با دستیابی به یک سطح پرداخت عالی و صاف در توسعه ایمپلنت‌ها توصیه شده است. به‌هرحال، ایشان تأکید کردند که از منظر تریبولوژیکی مطلوب است سر فمورال سخت‌ترین و صاف‌ترین سطح ممکن را دارا باشد. در این زمینه، استاندارد بین‌المللی (ISO 7206-2 (2011/AMD 1:2016) تأکید کردند که حداقل متوسط زبری سطح سر فلزی فمورال و کاسه UHMWPE نباید به ترتیب بیشتر از ۲ میکرومتر و ۰/۰۵ میکرومتر باشد [۶]. برای دستیابی به این استاندارد، تلاش‌های زیادی انجام شده است که در ادامه تعدادی از آن‌ها بازبینی شده است.

به‌عنوان اولین فرآیند پولیش کاری سنتی، می‌توان به پولیش کاری و بافینگ اشاره نمود که در آن با استفاده از ابزارهای سنتی نظیر ساینده‌ها، الیاف‌ها، پارچه‌ها و .. سطوح فلزی را تا محدوده نیمه‌روشن، آینه روشن و درخشندگی زیاد، به‌صورت دستی پولیش کاری می‌کنند [۷]. اگرچه هنوز فرآیند پولیش کاری و بافینگ به‌عنوان یک فرآیند صنعتی پرکاربرد استفاده می‌شود، اما پولیش کاری دستی به کمک چرخ‌های بافینگ نه‌تنها زبری سطح یکنواخت به دست نمی‌آید، بلکه

دقت ابعادی قطعات نیز به خطر می‌افتد. از طرفی دیگر، در عملیات بافینگ نه‌تنها کیفیت پولیش کاری بستگی به دقت، تجربه و مهارت اپراتور دارد، بلکه اساساً یک کار زمان‌بر، دشوار و پرهزینه است، به‌طوری‌که بهره‌وری آن نیز پایین است. جهت غلبه بر این چالش‌ها، بوگ [۸] در یک مطالعه مروری تکنولوژی ربات پرداخت کاری و کاربرد آن در صنایع مختلف را پیشنهاد نمودند و گزارش کردند که مزیت کلیدی این تکنولوژی افزایش بهره‌وری است، به‌طوری‌که برای پولیش کاری دستی و بافینگ سر فمورال مصنوعی ۴۵ تا ۹۰ دقیقه زمان لازم است، درحالی‌که یک ربات می‌تواند این کار را با نتایج عالی در مدت زمان ۷ الی ۸ دقیقه به دست آورد. در تلاشی دیگر، شاهینیان و همکاران [۹ و ۱۰] یک ابزار پولیش کاری حاوی الیاف‌های نایلون ۶/۶ در یک ماشین‌ابزار کنترل عددی پنج محوره برای پولیش کاری سطوح کرومی و غیر مسطح از جنس شیشه گرید BK7 ساختند و گزارش کردند که زبری سطح نمونه‌ها از ۱/۸۹ نانومتر به ۳/۶۶ نانومتر افزایش یافته است و بعد از ۵/۳۳ ساعت پولیش کاری، سایش کمی بر روی الیاف مشاهده نمودند. به‌رحال، مزایای بسیاری از این ابزار گزارش شده است، به‌طوری‌که توصیه کردند تولیدکنندگانی که سطوح پیچیده و آزاد تولید می‌کنند می‌توانند از این ابزار برای ساخت قطعات در صنایع مختلف نظیر اپتیک (برای نمونه عدسی‌ها)، پزشکی (برای نمونه ایمپلنت‌های ارتوپدی)، انرژی (برای نمونه پره‌های توربین) و سایر صنایع استفاده کنند [۱۱]. در راستای بهبود کیفیت سطح قطعات پزشکی، روش پولیش کاری الکتروشیمیایی^۳ (ECP) به‌عنوان یک جایگزین غیر مکانیکی برای روش‌های سنتی مورد توجه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، دوپرتین و همکارانش [۱۲] به بررسی تجربی تأثیر این روش بر دقت هندسی سرهای فمورال ساخته‌شده از آلیاژ کروم-کبالت پرداخته‌اند. در این پژوهش، از توالی فرآیندی متشکل از تراشکاری (به‌عنوان ماشین‌کاری اولیه)، سنگ‌زنی بشکه‌ای^۴ (به مدت ۱۸۰ دقیقه)، سنگ‌زنی درگ^۵ (به مدت ۵۰ دقیقه) و در نهایت پولیش کاری الکتروشیمیایی (به مدت ۳ دقیقه) استفاده شده است. اگرچه نتایج این مطالعه دستیابی به صافی سطحی در محدوده ۲۰ نانومتر را نشان می‌دهد، اما زمان کل فرآیند نزدیک به ۲۳۰

⁴ Barrel grinding

⁵ Drag grinding

¹ Total hip arthroplasty (THA)

² Ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE)

³ Electrochemical Polishing (ECP)

ساینده SiC، شفاف و روشن نیست. علاوه بر این، دستگاه و روش پیشنهادی سر فمورال پروتزهای مفصل ران را طی سه مرحله پرداخت کاری می‌نماید که از منظر بهره‌وری ایده‌آل نیست. در مطالعه اخیر، هنگ و همکاران [۱۷] یک روش جدید پرداخت کاری ساینده مغناطیسی^۴ (MAF) چندمحوری را برای پرداخت سر فمورال ایمپلنت‌های مفصل ران معرفی کردند. نتایج نشان داد این روش در زمان کوتاه ۱۲ دقیقه‌ای، بدون ایجاد نقص سطحی، میانگین زبری سطح را از ۰/۳۰۱ میکرومتر به ۰/۰۴۴ میکرومتر کاهش داد. این بهبود ۸۵,۳۸ درصدی، دستیابی به سطحی فوق‌العاده صاف را ممکن ساخته و کارایی این تکنیک را برای کاربردهای مهندسی پزشکی تأیید می‌کند.

با توجه به مطالعات پیشین، دستیابی هم‌زمان به پولیش کاری خودکار و صافی سطح مطلوب عاری از آسیب‌های سطحی در فرآیند پرداخت سر فمورال پروتزهای لگن، همچنان یکی از چالش‌های مهم پیش روی جوامع صنعتی و دانشگاهی است. علاوه بر این، مطالعات داخلی انگشت‌شماری در زمینه پولیش کاری سر فمورال پروتزهای لگن انجام شده است [۱۸] و پولیش کاری به کمک الیاف سیسال زبر تاکنون در تحقیقات داخلی مورد توجه قرار نگرفته است. حتی در سطح بین‌المللی نیز، مطالعات محدودی مانند پژوهش چوپانی و همکاران [۱۹] به بررسی اولیه این موضوع پرداخته‌اند، اما این موضوع به صورت نظام‌مند و جامع تحلیل نشده است. این پژوهش با هدف غلبه بر این چالش، به طراحی و توسعه یک فرآیند پولیش کاری کاملاً خودکار و نوآورانه مبتنی بر الیاف سیسال زبر می‌پردازد. نوآوری اصلی این تحقیق در به‌کارگیری الیاف سیسال زبر به‌عنوان جایگزین ساینده‌های متداول، ارائه فرآیندی تک‌مرحله‌ای و حذف عوارض جانبی ناخواسته بر روی بافت سطح سر فمورال نهفته است. در این راستا، ابزار پولیش کاری جدیدی متشکل از لاستیک استایرن بوتادین^۵ (SBR) به‌عنوان یک باند ویسکوالاستیک، الیاف سیسال زبر به‌عنوان ساینده و روغن نفتنیک به‌عنوان یک حلال و روان‌کننده، ساخته شده است. سپس به‌منظور ارزیابی عملکرد این ابزار، اثر پارامترهای کلیدی شامل فشار اکستروژن هیدرولیک و تعداد سیکل‌های

دقیقه است. از این رو، اگرچه پولیش کاری الکتروشیمیایی به خودی خود سریع است، اما این روش به دلیل نیاز به پیش‌پردازش‌های طولانی و چندمرحله‌ای، از منظر بهره‌وری و قابلیت اتوماسیون کامل با چالش مواجه است. در مطالعه دیگری، کیانی مجد و همکاران [۱۳] تأثیر امواج فراصوت بر فرآیند پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی^۱ (ECD) آلیاژ برنج C86300 را بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که افزودن امواج فراصوت، جریان الکتریکی را افزایش می‌دهد که این امر به نوبه خود منجر به افزایش نرخ براده‌برداری می‌شود. در پژوهشی مشابه، کیانی مجد و حاجی‌علی‌محمدی [۱۴] همین فرآیند را به کمک امواج فراصوت برای فنر حلقه روغن در موتورهای احتراقی به کار بردند. نتایج تحقیق آن‌ها نیز نشان داد که اعمال ارتعاشات فراصوت، نرخ پلیسه‌گیری را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

در تلاش‌های اخیر، چوپانی و همکاران [۱۵ و ۱۶] دستگاه و روش پرداخت کاری جریان ساینده^۲ (AFF) برای پولیش کاری سر فمورال پروتزهای مفصل ران ساخته شده از فولاد زنگ نزن 316L طراحی و ساختند. آن‌ها گزارش کردند که دستگاه و روش پیشنهادی برای پولیش کاری سر فمورال مؤثر و کارآمد است، به طوری که نه تنها زبری سطح نمونه‌ها از ۲۴۵ نانومتر به ۲۰/۳ نانومتر کاهش یافته است، بلکه انحراف شکل کروی سر فمورال تا محدوده ۷ میکرومتر به دست آمده است. به‌رحال، اگرچه مزایای بسیاری از دستگاه و روش پیشنهادی گزارش شده است، اما بررسی مورفولوژی سطح نمونه‌های پرداخت شده نشان می‌دهد که ذرات ساینده سیلیکون کارباید^۳ (SiC) طی پرداخت کاری با فشار اکستروژن هیدرولیک بالا در درون بافت سطح سر فمورال شکسته می‌شود. از این رو درصدی از این ذرات در درون بافت سطح سر فمورال باقی می‌ماند که اثرات جانبی ناخواسته بر روی بافت سطح سر فمورال ایجاد می‌کنند که نتیجه آن علاوه بر به خطر افتادن سلامت سطح سر فمورال، ممکن است زیست سازگار بودن سر فلزی فمورال ساخته شده از فولاد زنگ نزن 316L تحت شعاع قرار بگیرد. همچنین، بررسی بصری نمونه‌ها نشان می‌دهد که رنگ سر فمورال پرداخت شده به دلیل ماهیت ذرات

⁵ Styrene butadiene rubber (SBR)

¹ Electrochemical deburring (ECD)

² Abrasive flow finishing (AFF)

³ Silicon carbide (SiC)

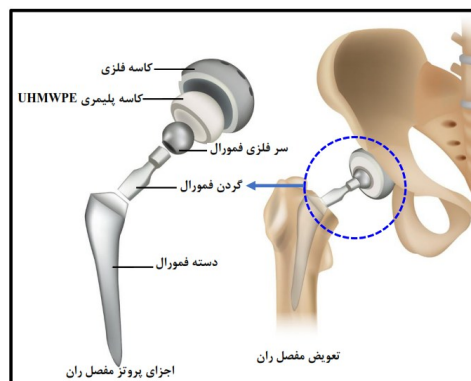
⁴ Magnetic abrasive finishing (MAF)

با حداکثر دبی 2.6 LPM، یک مخزن روغن با ظرفیت حدود ۱۵ لیتر، شیرهای کنترلی برقی، گیج فشار و غیره) مسئول تأمین فشار اکستروژن مورد نیاز است. سیستم جک‌های هیدرولیک فوقانی و تحتانی با حداکثر طول کورس ۷۵ میلی‌متر، فشار لازم را به ابزار پولیش کاری اعمال کرده و حرکت رفت و برگشتی آن را کنترل می‌کنند. سیلندره‌های فوقانی و تحتانی با قطر سوراخ ۶۱ میلی‌متر، به عنوان محفظه‌های نگه‌دارنده ابزار عمل می‌کنند. از میکروسوئیچ‌ها نیز برای معکوس کردن حرکت و تنظیم کورس جک‌ها استفاده می‌شود.

مکانیسم بازوی متحرک شامل یک ستون، بازو، فیکسچر نگه‌دارنده سیلندر فوقانی، پیچ و مهره M40 و صفحه نگه‌دارنده، امکان تنظیم دقیق دستگاه را فراهم می‌کند. برای افزایش مقاومت در برابر سایش، از پوش‌های فولادی درون سیلندرها استفاده شده و یک پنل عملیاتی نیز جهت کنترل کلیه عملیات در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۲ (الف و ب) نشان داده شده، ماکت معکوس سر فمورال مصنوعی به کمک پیچ و مهره بین سیلندره‌های ابزار پولیش کاری محکم شده است. این ماکت با طراحی منحصر به فرد خود نه تنها سر فمورال مصنوعی را در ناحیه پولیش کاری ثابت نگه می‌دارد، بلکه باعث اکستروژن ابزار پولیش کاری بر روی ناهمواری‌های سطح آن می‌شود.

ابزار پولیش کاری ترکیبی از SBR، الیاف سیسال زبر و روغن نفتنیک است که مطابق شکل ۲-ب به صورت رفت و برگشتی بر روی سطح ناهموار سر فمورال اکستروژن می‌شود. پیش از آغاز فرآیند، الیاف سیسال زبر به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و هندسی خاص، به صورت ناهمگن در محیط ویسکوالاستیک (شامل SBR و روغن نفتنیک) توزیع شده و پیوند ضعیفی تشکیل می‌دهند. با شروع پولیش کاری، رفتار رئولوژیکی ابزار تغییر می‌کند و مشابه مواد شبه پلاستیک با رفتار رقیق شونده برشی می‌شود که این ویژگی، امکان اکستروژن سریع‌تر و آسان‌تر را در نرخ‌های برشی بالا فراهم می‌کند. در طول فرآیند، الیاف سیسال زبر در اثر تجزیه مکانیکی به ماکرو و میکرورشته‌های سیسال با لبه‌های برشی تیز تبدیل می‌شوند. هم‌زمان، در نتیجه واکنش شیمیایی بین روغن نفتنیک و الیاف، پیوند مستحکمی تشکیل می‌شود که

پولیش کاری بر روی نسبت زبری سطح و نرخ پولیش کاری سر فمورال مصنوعی ساخته شده از فولاد زنگ نزن 316L مورد مطالعه تجربی قرار گرفت. در نهایت، به منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج، مورفولوژی سطح نمونه‌ها قبل و بعد از پولیش کاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM) مقایسه و بررسی شد.



شکل ۱- تعویض مفصل ران (Courtesy of)
(<https://www.emuh.emu.edu.tw>)

۲- مواد، تجهیزات و آزمایش‌های تجربی

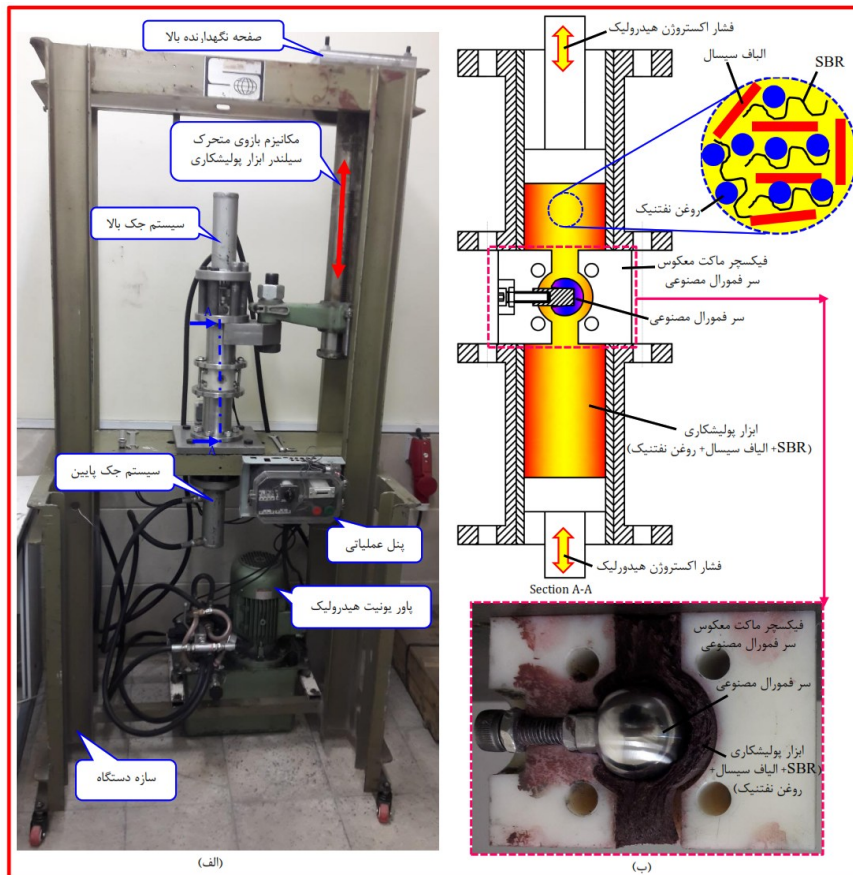
دستگاه و روش مورد استفاده برای انجام آزمایش‌های پولیش کاری سر فمورال مصنوعی در شکل ۲ (الف و ب) ارائه شده است. این سیستم شامل سه بخش اصلی است: دستگاه پایه، فیکسچر ماکت معکوس سر فمورال مصنوعی و ابزار پولیش کاری متشکل از الیاف سیسال زبر. به‌طور کلی، محدوده فشار کاری در دستگاه پایه ۰/۷ تا ۲۰ مگاپاسکال است [۲۰]. بر همین اساس، طراحی و ساخت دستگاه پایه در سطح آزمایشگاهی، با در نظرگیری معیارهای اقتصادی و استحکام، برای حداکثر فشار کاری ۱۵ مگاپاسکال انجام شده است. مشخصات استخراج شده برای طراحی و ساخت این دستگاه در جدول ۱ آورده شده است.

همان‌طور که در نمای برش خورده شکل ۲-الف مشاهده می‌شود، دستگاه پایه از یک سازه فولادی تشکیل شده که تمامی قطعات بر روی آن نصب شده‌اند. یک پاور یونیت هیدرولیک ساخت شرکت HAWE Hydraulik GmbH & Co. KG با مدل R2,6 / B 13A500-V3 (شامل یک موتور سه فاز ساخت شرکت زیمنس با مدل 100L/4A، یک پمپ از نوع R6

^۱ Scanning electron microscopy (SEM)

سطح اولیه، سختی قطعه کار، استحکام پیوند، فشار اکستروژن و تعداد سیکل‌های پولیش کاری بستگی دارد.

این ماکرو و میکرورشته‌ها را به صورت یکپارچه حفظ می‌کند. این رشته‌های حاصل، همانند ساینده‌های نرم عمل کرده و ناهمواری‌های سطح را برش می‌دهند. بر اساس آزمایش‌های اولیه، میزان برداشت ماده در این روش به عواملی نظیر زبری



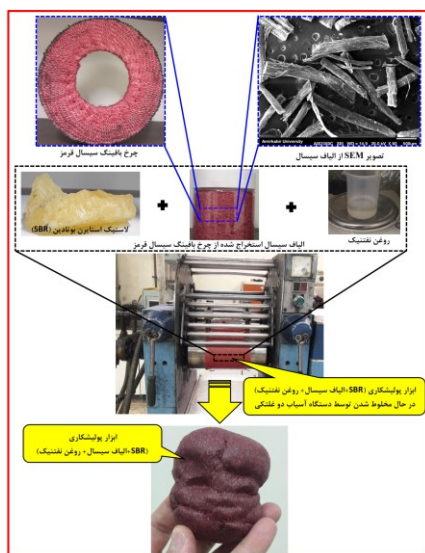
شکل ۲- دستگاه و روش پولیش کاری سر قمورال مصنوعی: (الف) یک تصویر واقعی به همراه یک نمای در برش از ناحیه پولیش کاری و (ب) یک تصویر واقعی از ناحیه پولیش کاری سر قمورال مصنوعی.

در مطالعه حاضر، برای ساخت ابزار پولیش کاری مبتنی بر الیاف سیسال زبر از یک چرخ بافینگ سیسال زبر نوع قرمز استفاده شده است که خواص شیمیایی و فیزیکی آن به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. الیاف سیسال زبر به دلیل خواص منحصربه‌فرد آن در چرخ‌های بافینگ برای برش سریع فولاد و فولاد زنگ نزن استفاده می‌شود [۲۱]. با بهره‌گیری از [۱۹ و ۲۲] و آزمایش‌های اولیه، یک ابزار پولیش کاری با استفاده از معادله ۱ با ترکیبی از ۲۵ درصد وزنی SBR، ۶۶ درصد وزنی الیاف سیسال زبر و ۹ درصد وزنی روغن نفتتیک

جدول ۱- مشخصات استخراج شده برای طراحی و ساخت دستگاه پایه.

پارامتر	واحد	مقدار
حداکثر فشار کاری	(MPa)	۱۵
حداکثر طول کورس چک‌ها	(mm)	۷۵
قطر سوراخ سیلندر ابزار پولیش کاری	(mm)	۶۱
طول کورس جریان ابزار پولیش کاری	(mm)	۵۵
حجم ابزار پولیش کاری	(cm ³)	۱۶۰/۷۳

مصنوعی در جدول ۴ آورده شده است. تمامی نمونه‌ها توسط شرکت خدمات پزشکی دوستان نیک فراهم شده است که در شکل ۴ تصویری از آن‌ها به همراه یک پروتز مفصل ران نشان داده شده است. بعد از آزمایش‌های اولیه، بهترین سطح پرداخت برای سر فمورال مصنوعی در مقدار بهینه فشار اکستروژن هیدرولیک ۱۲ مگاپاسکال و تعداد سیکل پولیش کاری ۱۰۰۰ به دست آمده است. از این رو، آزمایش‌های پولیش کاری بر اساس این مقادیر تنظیم شده است که جزئیات آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. قبل و بعد از انجام آزمایش‌ها، ابتدا تمامی نمونه‌ها با استفاده از حمام التراسونیک به مدت ۴ دقیقه تمیز شده‌اند. سپس، زبری سطح نمونه‌ها، پیش و پس از فرآیند، در پنج ناحیه متفاوت بر روی بخش فوقانی سر فمورال مصنوعی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها تحت شرایط یکسان و در جهت عمود بر جریان ماشین کاری با استفاده از دستگاه زبری سنج SURFCOM 130A (ساخت کارل زایس، آلمان) انجام گرفت. طول ارزیابی ۴ میلی‌متر و طول نمونه‌برداری ۰/۰۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد (مطابق شکل ۵). در نهایت، مقادیر به دست آمده میانگین گرفته شد و مقدار متوسط زبری سطح (Ra) گزارش شد.



شکل ۳- آماده‌سازی ابزار پولیش کاری برای انجام آزمایش‌ها

ساخته شده است. مراحل ساخت ابزار پولیش کاری مرحله به مرحله در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل، ابتدا SBR که نقش یک باند ویسکوالاستیک دارد در دمای ۵۰-۲۵ سانتی‌گراد به‌طور تجربی غلتک کاری شد. سپس، الیاف سیسال زیر به‌عنوان ساینده طی چندین مرحله غلتک کاری به SBR اضافه گردید. در نهایت، برای دستیابی به یک ابزار پولیش کاری انعطاف‌پذیر در طی چندین مرحله غلتک کاری روغن نفتیک به‌عنوان یک روان‌کننده اضافه شد.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی الیاف سیسال زیر [۲۳]

درصد	عنصر شیمیایی
۱/۰۰	خاکسترها
۲/۰۰	موم‌ها
۸/۰۰	لیگنین
۱۰/۰۰	H سلولز
۱۶/۰۰	پنتوسان
۶۲/۰۰	سلولز

جدول ۳- خواص فیزیکی الیاف سیسال زیر [۲۴]

پارامتر	مقدار
چگالی (g/cm ³)	۱/۴۵
قطر (μm)	۳۰۰-۱۰۰
ازدیاد طول در هنگام شکست (%)	۹-۴
استحکام کششی (MPa)	۷۰۰-۴۵۰
مدول یانگ (MPa)	۱۳۰۰۰-۷۰۰۰

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

در پژوهش حاضر، برای ارزیابی عملکرد ابزار پولیش کاری مبتنی بر الیاف سیسال زیر، اثر پارامترهای فشار اکستروژن هیدرولیک و تعداد سیکل‌های پولیش کاری بر روی نسبت زبری سطح^۱ (SRR) و نرخ پولیش کاری^۲ (PR) سر فمورال مصنوعی مفصل ران ساخته شده از فولاد زنگ نزن گرید 316L با قطر ۲۸ میلی‌متر و سختی ۳۲۱ برینل، بررسی شده است. برای محاسبه نسبت زبری سطح و نرخ پولیش کاری به ترتیب از معادله ۲ و ۳ استفاده شده است. ترکیب شیمیایی سر فمورال

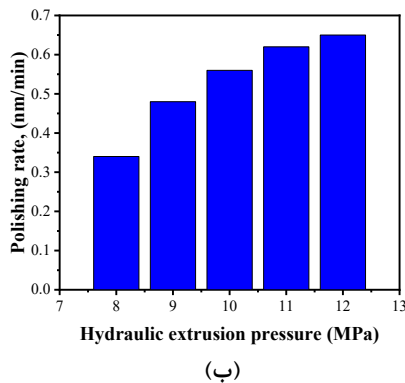
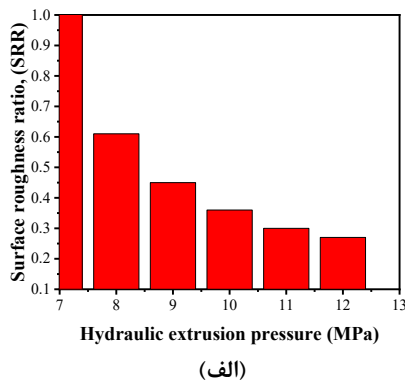
¹ Surface roughness rate (SRR)

² Polishing rate (PR)

³ The average surface roughness (Ra)

۳- نتایج و بحث

اثر فشار اکستروژن هیدرولیک بر روی نسبت زبری سطح و نرخ پولیش کاری سر فمورال مصنوعی تحت شرایط بهینه تعداد سیکل پولیش کاری ۱۰۰۰ به ترتیب در شکل ۶ (الف) و (ب) نشان داده شده است. از شکل پیداست که با افزایش مقدار فشار اکستروژن هیدرولیک، مقدار نسبت زبری سطح یک روند کاهشی را تجربه می‌کند (شکل ۶-الف)، در حالی که با افزایش مقدار فشار اکستروژن هیدرولیک، مقدار نرخ پولیش کاری یک روند افزایشی را نشان می‌دهد (شکل ۶-ب).



شکل ۶- اثر فشار اکستروژن هیدرولیک بر روی (الف) نسبت زبری سطح (SRR) و (ب) نرخ پولیش کاری

با افزایش مقدار فشار اکستروژن هیدرولیک، چگالی الیاف سیسال زبر در ابزار پولیش کاری افزایش می‌یابد که نتیجه آن علاوه بر افزایش تعداد الیاف‌های سیسال زبر در تماس با ناهمواری‌های سطح سر فمورال مصنوعی است، ویسکوزیته ابزار پولیش کاری نیز افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی، ابتدا باند ویسکوالاستیک SBR به دلیل تعامل با ناهمواری‌های سر فمورال مصنوعی در فیکسچر ماکت

$$\text{Surface roughness ratio, } SRR = \frac{\text{Final}_{Ra}}{\text{Initial}_{Ra}} \quad (2)$$

$$\text{Polishing rate } (\mu\text{m}/\text{min}) = \frac{\text{Initial}_{Ra} - \text{Final}_{Ra}}{\text{Total polishing time}} \quad (3)$$

جدول ۴- ترکیب شیمیایی سر فمورال مصنوعی ساخته شده از فولاد زنگ نزن 316L

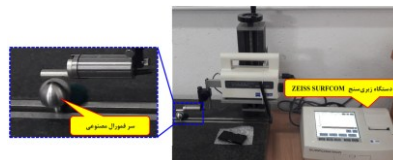
عنصر شیمیایی	درصد وزنی (%)
آهن	فلز پایه
کربن	۰/۰۳
منگنز	۲/۰۰
فسفر	۰/۰۲۵
گوگرد	۰/۰۰۳
سیلیسیم	۰/۷۵
کروم	۱۷/۰۰-۱۹/۰۰
نیکل	۱۳/۰۰-۱۵/۰۰
مولیبدن	۲/۷۰-۳/۰۰



شکل ۴- تصویر واقعی تعدادی از نمونه‌های سر فمورال مصنوعی ساخته شده از فولاد زنگ نزن 316L به همراه یک پروتز مفصل ران

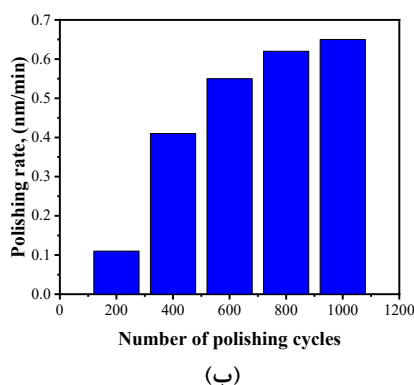
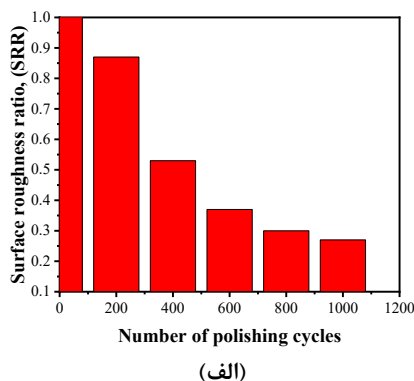
جدول ۵- پارامترها و سطوح مورد استفاده در انجام آزمایش‌های پولیش کاری.

پارامترها	واحد	مقادیر سطوح پارامترها
فشار اکستروژن هیدرولیک	(MPa)	۱۲ ۱۱ ۱۰ ۹ ۸
تعداد سیکل‌های پولیش کاری	---	۱۰۰۰ ۸۰۰ ۶۰۰ ۴۰۰ ۲۰۰



شکل ۵- یک تصویر واقعی از نحوه اندازه‌گیری زبری سطح سر فمورال با استفاده از زبری سنج ZEISS SURFCOM 130A

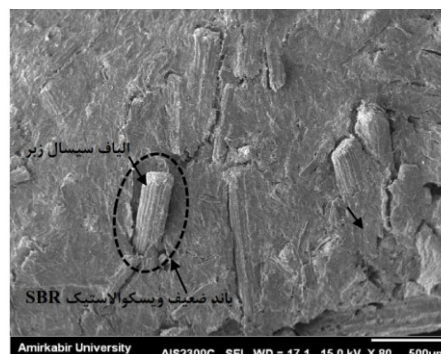
اثر تعداد سیکل‌های پولیش کاری بر روی نسبت زبری سطح و نرخ پولیش کاری سر فمورال مصنوعی تحت شرایط بهینه فشار اکستروژن هیدرولیک ۱۲ مگاپاسکال به ترتیب در شکل ۸ (الف و ب) نشان داده شده است. شکل نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سیکل‌های پولیش کاری، مقدار نسبت زبری سطح کاهش می‌یابد (شکل ۸-الف)، در حالی که با افزایش تعداد سیکل‌های پولیش کاری، مقدار نرخ پولیش کاری افزایش می‌یابد (شکل ۸-ب). با افزایش تعداد سیکل‌های پولیش کاری، تعداد ماکرو و میکرو-رشته‌های سیسال که به ناهمواری‌های سطح سر فمورال برخورد می‌کنند در هر ثانیه افزایش می‌یابد که نتیجه آن کاهش قابل توجهی در قله‌های سطح سر فمورال است. این امر در کاهش نسبت زبری سطح سر فمورال و افزایش نرخ پولیش کاری بسیار مؤثر است.



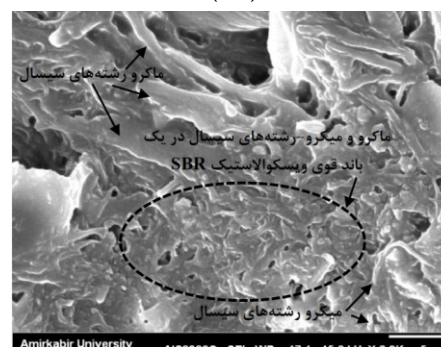
شکل ۸- اثر تعداد سیکل‌های پولیش کاری بر روی (الف) نسبت زبری سطح (SRR) و (ب) نرخ پولیش کاری

برای درک بهتر اثر تعداد سیکل‌های پولیش کاری، مورفولوژی سطح سر فمورال مصنوعی پولیش کاری شده بررسی شده است. همان‌طور که در شکل ۹-الف مشاهده

معکوس دچار تغییر شکل می‌شود، از این‌رو نیروی تغییر شکل مؤثری به الیاف سیسال زیر وارد می‌شود که نتیجه آن پدیده فیبرلاسیون یا تجزیه مکانیکی شدید است. در طی این پدیده، الیاف سیسال زیر به ماکرو و میکرو-رشته‌های سیسال با لبه‌های برشی تیز تبدیل می‌شوند. در چنین شرایطی، علاوه بر ایجاد یک باند قوی ویسکوالاستیک SBR، نیروهای پولیش کاری (نیروی نرمال و نیروی مماسی) بین تعداد بیشتری از ماکرو و میکرو-رشته‌های سیسال با لبه‌های برشی تیز تقسیم می‌شوند. از این‌رو، عمق نفوذ ماکرو و میکرو-رشته‌های سیسال به درون سطح سر فمورال مصنوعی کاهش می‌یابد. بنابراین، با افزایش فشار اکستروژن هیدرولیک، ماکرو و میکرو-رشته‌های سیسال در تماس با ناهمواری سطح سر فمورال به‌عنوان یک میکرو-برس نرم (یا ساینده نرم) عمل می‌کنند که نتیجه آن علاوه بر کاهش زبری سطح سر فمورال مصنوعی، انجام عملیات پولیش کاری در مقیاس نانومتری است. تفسیر فوق‌الذکر را می‌توان در شکل ۷ جستجو نمود.



(الف)

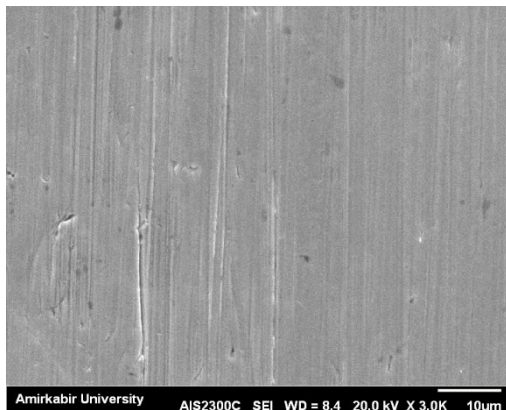


(ب)

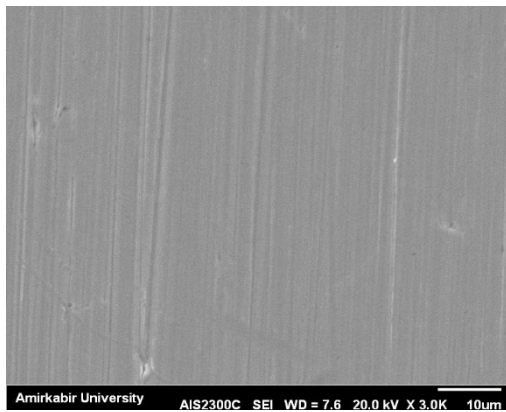
شکل ۷- شماتیک و تصویر SEM از ناحیه پولیش کاری (الف) ابزار پولیش کاری بدون فشار اکستروژن هیدرولیک (ب) ابزار پولیش کاری تحت فشار اکستروژن هیدرولیک ۱۲ مگاپاسکال و تعداد سیکل پولیش کاری ۱۰۰۰

پولیش کاری نیز به ترتیب به کمترین و بیشترین مقدار خود می‌رسند.

همان‌طور که در تفسیر فوق، ا شماره شد با افزایش تعداد سیکل‌های پولیش کاری تا ۱۰۰ دمای ناحیه پولیش کاری افزایش می‌یابد که نتیجه آن کاهش ویسکوزیته ابزار پولیش کاری و به دنبال آن استحکام باند کاهش می‌یابد که پیامد آن مختل شدن عملیات پولیش کاری است. برای رفع این مشکل، تمامی آزمایش‌ها در یک ۱۰۰ سیکل پولیش کاری انجام شد، سپس دستگاه خاموش شد تا دمای ناحیه پولیش کاری و ابزار پولیش کاری به دمای محیط برگردد.



(الف)



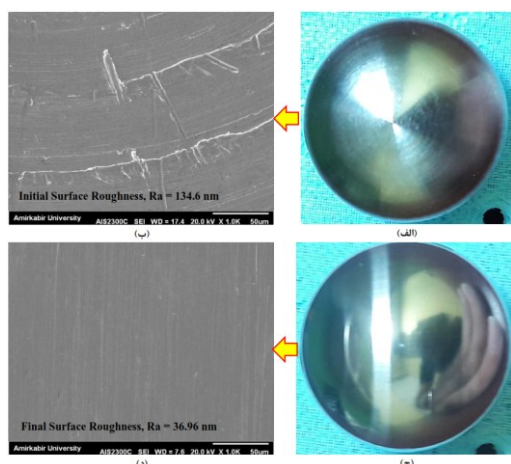
(ب)

شکل ۹- تصاویر SEM از مورفولوژی سطح پولیش کاری شده در تعداد سیکل‌های پولیش کاری (الف) ۲۰۰ و (ب) ۱۰۰۰

به منظور درک بهتر عملکرد ابزار پولیش کاری پیشنهاد شده، مورفولوژی سطح سر فمورال مصنوعی قبل و

می‌شود، با افزایش تعداد سیکل‌های پولیش کاری تا ۲۰۰، ناهمواری‌های سطح سر فمورال به‌طور قابل‌توجهی بهبود نمی‌یابد، به‌طوری‌که هنوز روی بافت سطح سر فمورال علائم پیشروی ناشی از ماشین کاری اولیه به‌خوبی دیده می‌شود. این بدان معناست که استحکام باند ضعیف است زیرا چسبندگی بین حامل ویسکوالاستیک SBR و الیاف سیسال زبر پایین است. در این شرایط، حامل ویسکوالاستیک SBR نمی‌تواند به‌خوبی الیاف سیسال زبر را در ناحیه پولیش کاری محکم نگهداری کند، در نتیجه عمق فرورفتگی الیاف سیسال زبر به درون سطح سر فمورال مصنوعی حداقل است، به‌طوری‌که قابلیت حذف علائم پیشروی ناشی از ماشین کاری اولیه را ندارد. علاوه بر این تفسیر فوق، می‌توان گفت که در سیکل‌های اولیه پولیش کاری، ناهمواری‌های سطح سر فمورال مصنوعی بسیار زیاد است، از این‌رو بیشترین انرژی به دلیل پدیده‌های مالش و لغزش صرف پدیده فیبرلاسیون یا تجزیه مکانیکی شدید می‌شود. به‌هرحال، در ۲۰۰ سیکل پولیش کاری، عملیات پولیش کاری قابل‌توجهی انجام نمی‌شود که نتیجه آن کاهش اندکی در نسبت زبری سطح و افزایش اندکی در نرخ پولیش کاری است.

همان‌طور که در شکل ۹-ب مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سیکل‌های پولیش کاری تا ۱۰۰۰، نه‌تنها ناهمواری‌های سطح سر فمورال حذف‌شده است، بلکه یک سطح پولیش کاری یکنواختی برای سر فمورال به‌دست‌آمده است. این نشان می‌دهد که در ابزار پولیش کاری به دلیل واکنش شیمیایی بین حامل ویسکوالاستیک SBR، روغن نفتنیک و ماکرو و میکرو-رشته‌های سیسال یک نوع اصلاح شیمیایی رخ می‌دهد که نتیجه آن افزایش چسبندگی است. زمانی که چسبندگی بین حامل ویسکوالاستیک SBR و ماکرو و میکرو-رشته‌های سیسال افزایش می‌یابد، یک باند قوی ایجاد می‌شود که حرکت، آزادی و جهت‌گیری ماکرو و میکرو-رشته‌های سیسال را محدود می‌کند. در چنین شرایطی، ماکرو و میکرو-رشته‌های سیسال در تماس با ناهمواری‌های سطح سر فمورال به‌عنوان یک ساینده نرم نظیر یک میکرو- برس نرم عمل می‌کنند. از این‌رو، می‌توان گفت که با افزایش تعداد سیکل‌های پولیش کاری تا ۱۰۰۰ یک نوع اصلاح سطح انجام می‌شود که نتیجه آن علاوه بر به دستیابی به یک سطح پرداخت فوق صیقل و یکنواخت برای سر فمورال، نسبت زبری سطح و نرخ



شکل ۱۰- تصاویر واقعی و تصاویر SEM از سر فمورال مصنوعی: (الف و ب) قبل از پولیش کاری با متوسط زبری سطح ۱۳۴/۶ نانومتر و (ج و د) بعد از پولیش کاری با متوسط زبری سطح ۳۶/۹۶ نانومتر تحت شرایط پولیش کاری (فشار اکستروژن هیدرولیک ۱۲ مگاپاسکال و تعداد سیکل پولیش کاری ۱۰۰۰)

نتایج کار حاضر به خوبی صحت‌گذاری می‌کند که ابزار پولیش کاری مبتنی بر الیاف سیسال زیر برای پولیش کاری سر فمورال مصنوعی یک روش ایده‌آل و کارآمد است، زیرا علاوه بر پولیش کاری یکنواخت، یک سطح پولیش کاری شده یا سلامت سطح بالای مطابق با الزامات استاندارد مربوطه [۶] برای سر فمورال پروتزهای مفصل ران نتیجه داده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک ابزار پولیش کاری نوآورانه مبتنی بر الیاف سیسال زیر برای پرداخت سر فمورال ایمپلنت‌های مفصل ران از جنس فولاد زنگ‌نزن 316L ارائه شد. عملکرد این ابزار با بررسی تأثیر فشار اکستروژن هیدرولیک و تعداد سیکل‌های پولیش کاری بر نسبت زبری سطح و نرخ پولیش کاری ارزیابی گردید. یافته‌ها نشان داد که این روش برای پولیش کاری سر فمورال مصنوعی مؤثر و کارآمد است. تصاویر میکرو اسکوپي علاوه بر تأیید این یافته‌ها، نشان می‌دهند که الیاف سیسال در طی فرآیند، تحت تأثیر تجزیه مکانیکی و تصفیه شیمیایی، به ماکرو و میکرو-رشته‌هایی تبدیل می‌شوند که نقش ساینده‌های نرم را ایفا می‌کنند. این ساینده‌ها ناهمواری‌های

بعد از پولیش کاری توسط تصاویر واقعی و تصاویر SEM موجود در شکل ۱۰ (الف-د) بررسی شده است. بررسی تصاویر واقعی نشان می‌دهد که محیط اطراف سر فمورال مصنوعی قبل از پولیش کاری (شکل ۱۰-الف) روی سطح آن منعکس نشده است. این گویای این حقیقت است که ناهمواری‌های سطح سر فمورال مصنوعی قبل از پولیش کاری بسیار زیاد است، از این رو بازتاب نور در میان قله و دره‌های سطح سر فلزی فمورال محوشده است. در مقابل، محیط اطراف سر فمورال مصنوعی بعد از پولیش کاری توسط ابزار پولیش کاری پیشنهاد شده (شکل ۱۰-ج) روی سطح آن با وضوح بالایی منعکس شده است. این بدان معنا است که ناهمواری‌های سطح سر فلزی فمورال حداقل شده است، از این رو بازتاب مناسبی قابل مشاهده است. علاوه بر این، بررسی تصاویر SEM نشان می‌دهد که قبل از پولیش کاری یعنی ماشین کاری اولیه (شکل ۱۰-ب) روی بافت سطح سر فمورال مصنوعی علاوه بر مشخص بودن جهت ماشین کاری اولیه، ناهمواری‌های سطحی (یعنی خراش‌ها، شیارها و علائم پیش‌روی) بسیاری تا محدوده ۱۳۴/۶ نانومتر وجود دارد. در مقابل، ناهمواری‌های سطح سر فمورال مصنوعی بعد از پولیش کاری به کمک ابزار پولیش کاری پیشنهاد شده (شکل ۱۰-د) به میزان قابل توجهی تا محدوده ۳۶/۹۶ نانومتر کاهش یافته است، با اشاره به شکل ۱۰-ج و شکل ۱۰-د، ابزار پولیش کاری مبتنی بر الیاف سیسال زیر نه تنها یک سطح پولیش کاری صاف و یکنواختی بدون آسیب‌های سطحی به‌مانند یک آینه روشن برای سطح سر فمورال مصنوعی نتیجه داده است، بلکه بر روی بافت سطح سر فمورال مصنوعی جهت‌های در مقیاس کوچک ایجاد نموده است، به طوری که علائم پولیش کاری توسط ماکرو و میکرو-رشته‌های سیسال روی بافت سطح پولیش شده قابل شناسایی است. نتایج فوق‌الذکر، علاوه بر تأیید تفسیرهای انجام شده، تأکید می‌کند که ماکرو و میکرو-رشته‌های سیسال در تعامل با ناهمواری سطح سر فمورال مصنوعی در فیکسچر ماکت معکوس به‌مانند ساینده‌های نرم رفتار می‌کند.

[12] Döbberthin, C., Müller, R., Meichsner, G., Welzel, F., & Hackert-Oschätzchen, M. (2020). Experimental analysis of the shape accuracy in electrochemical polishing of femoral heads for hip endoprosthesis. *Proc Manuf*, 47, 719-724.

[13] KianiMajd, M., Hajjalimohammadi, A., Raiat Roknabadi, A., & Golbaz, S. (2023). Experimental study of the effect of ultrasonic waves on the parameters of the electrochemical deburring process. *I J Manuf Eng*, 10(2), 1-6.

[14] KianiMajd, M., & Hajjalimohammadi, A. (2024). Development of an electrochemical deburring process using ultrasonic waves for combustion engine oil spring ring. *J Eng Res*, 71(2), 55-68.

[15] Choopani, Y., Khajehzadeh, M., & Razfar, M. R. (2020). Using inverse replica fixture technique for improving nano-finishing of hip joint implant in abrasive flow finishing process. *Int J Adv Manuf Technol*, 110, 3035-3050.

[16] Choopani, Y., Khajehzadeh, M., & Razfar, M. R. (2021). Optimal parameters of abrasive flow finishing for hip joint implants. *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, 235(11), 1818-1831.

[17] Heng, L., Song, J. H., & Mun, S. D. (2023). A novel methodology of MAF process via a multi-axis/multi-faceted polishing technique for enhancing surface quality of artificial hip joint component. *J Magn and Magn Mater*, 570, 170523.

[18] Choopani, Y., Khajehzadeh, M., & Razfar, M. R. (2025). An experimental study on abrasive flow machining of artificial hip joint. *Amirkabir J Mech Eng*, 57(2), 215-234.

[19] Choopani, Y., Khajehzadeh, M., & Razfar, M. R. (2022). Novel polishing media based on fiber for finishing hip joint implants. *Int J Adv Manuf Technol*, 118(1), 479-495.

[20] Dabrowski, L., Marciniak, M., & Szewczyk, T. (2006). Analysis of abrasive flow machining with an electrochemical process aid. *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, 220(3), 397-403.

[21] Sax, D. J. (2001). Buffing wheels and equipment. *Metal Finishing*, 99, 54-69.

[22] Choopani, Y., Khajehzadeh, M., & Razfar, M. R. (2021). Development of fiber flow finishing (FFF) process for polishing hip prostheses. *J Manuf Proc*, 68, 1245-1260.

[23] Kumar RP, Nair KCM, Thomas S, Schit SC, Rammurthy K (2000) Morphology and melt rheology behavior of short-sisal-fibre-reinforced SBR composites. *Compos Sci Technol* 60:1737-1751.

[24] Kumar, R. P., Amma, M. G., & Thomas, S. (1995). Short sisal fiber reinforced styrene-butadiene rubber composites. *J Appl Polym Sci*, 58(3), 597-612.

سطح را به‌طور مؤثر حذف می‌کنند، به‌طوری‌که پس از ۲/۵ ساعت پولیش کاری، سطحی یکنواخت با میانگین زبری حدود ۳۶/۹۶ نانومتر (مشابه یک سطح آینه‌ای) و بدون آسیب‌های سطحی حاصل می‌شود. همچنین، نتایج به‌وضوح نشان داد که افزایش فشار تا ۱۲ مگاپاسکال، نسبت زبری سطح را کاهش و افزایش سبک‌های کاری تا ۱۰۰۰ سبک، نرخ پولیش کاری را افزایش می‌دهد. در نتیجه، ابزار پیش‌نهادهی به‌عنوان یک راه‌حل کارآمد و قابل‌توسعه برای پولیش کاری سطوح پیچیده در صنایع پزشکی، هوافضا و خودروسازی توصیه می‌شود.

۵- مراجع

[1] Garellick, G., Malchau, H., Herberts, P., Hansson, E., Axelsson, H., & Hansson, T. (1998). Life expectancy and cost utility after total hip replacement. *Clin Orthop and Rel Res*, 346, 141-151.

[2] Santavirta, S., Bohler, M., Harris, W. H., Kontinen, Y. T., Lappalainen, R., Muratoglu, O., ... & Salzer, M. (2003). Alternative materials to improve total hip replacement tribology. *Acta orthop Scandinavica*, 74(4), 380-388.

[3] Heisel, C., Silva, M., & Schmalzried, T. P. (2003). Bearing surface options for total hip replacement in young patients. *JBJS*, 85(7), 1366-1379.

[4] McKellop, H., Shen, F. W., DiMaio, W., & Lancaster, J. G. (1999). Wear of gamma-crosslinked polyethylene acetabular cups against roughened femoral balls. *Clin Orthop and Rel Res*, 369, 73-82.

[5] Dowson, D (1995). A comparative study of the performance of metallic and ceramic femoral head components in total replacement hip joints, *Wear*, 190, 171-183.

[6] Cubillos, P. O., dos Santos, V. O., Pizzolatti, A. L., O. Moré, A. D., & M. Roesler, C. R. (2021). Surface finish of total hip arthroplasty implants: are we evaluating and manufacturing them appropriately? *J Test and Eval*, 49(6), 4550-4559.

[7] Dickman, A. I. (2002). Polishing and buffing. *Metal Finishing*, 100, 31-50.

[8] Bogue, R. (2009). Finishing robots: a review of technologies and applications. *Industrial Robot: An Int J*, 36(1), 6-12.

[9] Shahinian, H., & Mullany, B. (2019). Polishing spherical BK7 workpieces with fiber-based tools. *Optic Eng*, 58(9), 092610-092610.

[10] Shahinian, H., Cherukuri, H., & Mullany, B. (2016). Evaluation of fiber-based tools for glass polishing using experimental and computational approaches. *Appl Optic*, 55(16), 4307-4316.

[11] Shahinian, H., & Mullany, B. Fiber based finishing tools. United States Patent US20180154495, USA, 2018.