



بررسی اثر هندسه بافت بر روی رفتار اصطکاکی آببندهای مکانیکی گرافیتی

ادیب ریاحی، مسعود فرحناکیان*، حمزه شاهراجیبیان*

گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: shahrajabian@iau.ac.ir و farahnakian@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۸ اردیبهشت ۱۴۰۴
پذیرش: ۱۸ شهریور ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

آببند مکانیکی

هندسه بافت

چگالی سطحی بافت

تست اصطکاک

مکانیزم آببندهای مکانیکی به عنوان یکی از اجزای حیاتی در سیستم‌های دوار صنعتی، نقش تعیین‌کننده‌ای در جلوگیری از نشت سیالات تحت فشار و کاهش تلفات انرژی ایفا می‌کنند. عملکرد بهینه این آببندها تا حد زیادی به رفتار اصطکاکی بین سطوح تماس آن‌ها وابسته است که خود متأثر از مشخصات هندسی و توپوگرافی سطح می‌باشد. در این تحقیق، بافت‌هایی با هندسه مختلف و چگالی سطحی یکسان توسط لیزر فایبر با توان ۳۰ وات بر روی آببندهای مکانیکی دوار ایجاد شده است. بافت نمونه‌ها به صورت اشکال هندسی لوزی، دایره و مربع در نظر گرفته شد، و تست اندازه‌گیری اصطکاک توسط دستگاه ویژه‌ای که به این منظور ساخته شده است در فشارها و سرعت‌های مختلف انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد سطوح دارای بافت هندسی نسبت به سطح بدون بافت هندسی در همه شرایط باعث افزایش بازده آببندی شد. در محدوده فشار ۵ تا ۱۵ بار (فشار پمپ‌های صنعتی گریز از مرکز دبی بالا) سطح با بافت لوزی شکل بهترین عملکرد را نسبت به بقیه سطوح با بافت‌های دیگر نشان داد، بطوریکه در فشار ۵ بار نسبت به سطح بدون بافت حدود ۵۰٪ گشتاور و اصطکاک را کاهش داد.

The effect of surface texture geometry on the frictional behavior of graphite mechanical seals

Adib Riahi, Masoud Farahnakian*, Hamzeh Shahrajabian*

Department of Mechanical Engineering, Na. C, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

* Corresponding Author's Email: farahnakian@gmail.com & shahrajabian@iau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 28 April 2025

Accepted: 9 September 2025

Keywords:

Mechanical Seal

Texture Geometry

Textured Surface Density

Friction Test

Abstract

Mechanical seals serve as critical components in industrial rotary systems, playing a decisive role in preventing pressurized fluid leakage and reducing energy losses. The optimal performance of these seals largely depends on the frictional behavior between their contact surfaces, which is itself influenced by surface geometric characteristics and topography. In this study, various geometric textures with identical surface densities were created on rotary mechanical seals using a 30W fiber laser. The sample textures were designed as diamond (rhombic), circular, and square patterns. Friction measurements were conducted using a custom-built test rig under varying pressures and rotational speeds. Experimental results demonstrated that textured surfaces consistently outperformed non-textured surfaces in sealing behavior across all test conditions. Within the pressure range of 5-15 bar (typical for high-flow industrial centrifugal pumps), the diamond-patterned surface exhibited superior performance compared to other textures, reducing torque and friction by approximately 50% relative to the non-textured surface.

Please cite this article using:

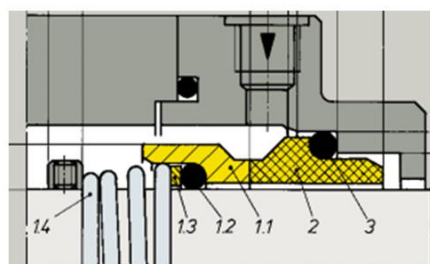
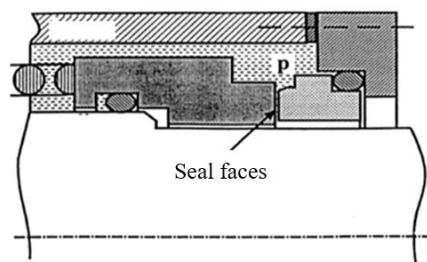
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Riahi A, Farahnakian M, Shahrajabian H. The effect of surface texture geometry on the frictional behavior of graphite mechanical seals. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Aug 23;12(6):57-68. doi: 10.22034/ijme.2025.519612.2073 [In Persian]

۱- مقدمه

مکانیزم آببندهای مکانیکی^۱ به عنوان یکی از اجزای حیاتی در سیستم‌های دوار صنعتی، نقش تعیین کننده‌ای در جلوگیری از نشت سیالات تحت فشار و کاهش تلفات انرژی ایفا می‌کنند. با توجه به کاربرد گسترده پمپ‌ها در صنایعی چون پتروشیمی، فرآوری فلزات و سایر کارخانجات تولیدی، کار بر روی بهینه‌سازی آببند مکانیکی آن‌ها، به عنوان یکی از قطعات مصرفی و با عمر محدود، جهت افزایش راندمان آببندی و طول عمر در شرایط کارکرد مختلف، نیازی اساسی می‌باشد.

آببند مکانیکی معمولاً از دو قسمت فلزی و لاستیکی تشکیل شده است، بعضی مواقع قسمت چرخان آببند از گرافیت با روکش فولادی ساخته می‌شود، البته سطح بین حلقه‌های دوار و ثابت بسیار صیقلی می‌باشد. در یک آببند مکانیکی سه نقطه مهم وجود دارد که در آب بندی مؤثر است: ۱- مابین حلقه ثابت و پوسته، ۲- مابین حلقه دوار و محور، ۳- مابین حلقه ثابت و متحرک. آببندی در حالت اول توسط گسکت‌ها و حلقه‌های لاستیکی (اورینگ) صورت می‌گیرد و در حالت دوم توسط حلقه‌های لاستیکی و در حالت سوم با تماس مستقیم سطح تخت دو حلقه فلزی که همواره توسط فنری به هم فشرده می‌شوند، انجام می‌گیرد [۱]. شماتیکی از یک آببند مکانیکی در شکل ۱ نشان داده شده است. ساختمان آببند مکانیکی از دو سطح تشکیل شده است که یکی از آن‌ها ثابت و در داخل بدنه قرار می‌گیرد و دیگری که متحرک است و با محور می‌چرخد، که توسط فیلم نازکی از مایع پمپ شونده داخل استافین باکس که بین دو سطوح قرار می‌گیرد روانکاری شده و از تماس مستقیم سطوح آببندی ممانعت می‌شود. همچنین حرارت تولید شده توسط مایع سیل فلش^۲ که روی سطوح آببندی در داخل محفظه آببندی تزریق می‌شود، خنک می‌شود. آببند اولیه از دو سطح تشکیل شده که یکی از آن‌ها روی بدنه پمپ ثابت است و به آن سطح ثابت آببندی^۳ و دیگری سطح دوار آببندی^۴ که روی شفت نصب شده است و با سرعت محور می‌چرخد و در اثر حرکت نسبی دو سطح و اعمال نیروهای هیدرودینامیکی و هیدرولیکی و نیروی فنر به اندازه ناچیزی (حدود ۰/۰۰۵ میلی متر) از همدیگر فاصله می‌گیرند که باعث ایجاد فیلم سیال بین دو سطح می‌گردد و نشتی را به حداقل قابل قبول می‌رساند. وجود این فیلم سیال از اصطکاک و سایش سطوح آببندی که ایجاد حرارت زیاد می‌کند، جلوگیری می‌کند. هرچه خاصیت روانکاری سیال آببند شونده بهتر باشد طول عمر قطعات افزایش پیدا خواهد کرد. آببند داخلی به آببندی گفته می‌شود که قطر خارجی آببند با سیال سیل شونده در تماس باشد. از مزایای این نوع آبند می‌توان به تمیزکاری سطوح آببند بصورت اتوماتیک توسط نیروی گریز از مرکز، خنک‌کاری راحت‌تر سطوح آببند و استفاده از فشار داخل محفظه آببند (استافین باکس) برای فشرده کردن سطوح آببندی روی یکدیگر و ممانعت از نشتی، اشاره کرد.



1.1	472	Seal face
1.2	412.1	O-ring
1.3	474	Thrust ring
1.4	478	Righthand spring
1.4	479	Lefthand spring
2	475	Type G9 stationary seat
3	412.2	O-ring

شکل ۱ نمای شماتیکی از حلقه‌های آببند مکانیکی [۱]

1 Mechanical Seals

2 Seal Flush

3 Stationary Seal Ring

4 Rotary Seal Ring

در دهه اخیر، بافت سطوح به عنوان یک تقویت کننده روانکاری، کاهش دهنده اصطکاک و سایش قطعات مکانیکی، شناخته شده است. طراحی بافت سطح یکی از قسمت‌های مهم مهندسی سطح می‌باشد [۲، ۳]. با پیشرفت تکنولوژی روش‌های پرداخت مختلف در دسترس می‌باشند و می‌توان سطوح تخت و با کیفیت سطح بالایی به وجود آورد و سپس با استفاده از روش‌هایی مانند لیزر^۱، حکاکی با یون‌های واکنش پذیر^۲ و غیره، روی سطح آن‌ها شکل‌های مختلف ایجاد کرد. از فواید ایجاد بافت بر روی سطوح، می‌توان به افزایش فشار هیدرودینامیکی برای افزایش ظرفیت تحمل بار [۴]، عمل کردن به عنوان میکروانباره برای روانکاری در مواردی که وضعیت روانکاری ضعیف است [۵] و تله برای ذرات و پلیسه‌ها برای جلوگیری از سایش شدید روی سطح [۶] اشاره کرد. تولید فشار هیدرودینامیکی اضافی معمولاً به عنوان مهم‌ترین اثر بافت سطح تحت شرایط بارهای کم و سرعت زیاد مطرح شده است.

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی سطح، از جمله زبری، جهت‌گیری بافت^۳ و الگوی توزیع حفره‌ها بر ضریب اصطکاک، سایش و طول عمر آببندهای مکانیکی پرداخته‌اند. توسعه فناوری‌های ساخت پیشرفته، همچون لیزر مارکینگ و پردازش‌های میکروسکوپی، امکان طراحی سطوحی با بافت‌های هندسی کنترل شده را فراهم کرده است. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که بهینه‌سازی هندسه بافت سطح می‌تواند منجر به کاهش اصطکاک، بهبود توزیع روانکار و افزایش پایداری ترمودینامیکی در شرایط کاری مختلف شود [۷-۹].

یو [۷] آزمایش‌هایی بر روی جنس‌های دیگری از آببندهای مکانیکی را ادامه داد. وی با مطالعاتی بر روی چرخش کاربرد سیلیکون بر روی حلقه گرافیت، نشان داد که نمونه کاربرد سیلیکون سوراخ‌کاری شده نتایج اصطکاکی بهتری نسبت به سطح نمونه صاف دارد. در وانگ و همکاران [۸] آزمایش‌هایی را بر روی آببندهایی از جنس فولاد ۴۰۳۰ سوراخ‌کاری شده با سوراخ‌های خیلی ریز بر روی سطوحی از جنس کاربرد سیلیکون انجام دادند. بر اساس این آزمایش‌ها آن‌ها متوجه شدند که نقطه بهینه‌ای برای هندسه سوراخ و توزیع سوراخ وجود دارد و بیان کردند که مزایای بیشتری در ترکیبی از سوراخ‌های بزرگ و کوچک نسبت به سطوح بدون سوراخ و حتی با سوراخ‌های یکسان وجود دارد. تا قبل از سال ۲۰۰۸ بررسی‌ها بر روی شکل‌های مختلف انجام می‌گرفت اما در این سال نانبو و همکاران [۹] تأثیر شکل کف بافت‌ها را روی افزایش روانکاری با استفاده از شبیه‌سازی عددی روانکاری الاستو هیدرودینامیک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پیشنهاد کردند که در شکل کف بافت‌ها باید یک میکرو لبه یا میکرو پله اضافه گردد تا از فیلم‌های ضخیم به وجود آمده محافظت کنند.

رفتار اصطکاکی و سایشی این آببندها به شدت تحت تأثیر مشخصات توپوگرافی و هندسی سطح تماس آن‌ها قرار دارد. در طول دهه گذشته، مطالعات گسترده‌ای به بررسی تأثیر الگوهای مختلف بافت سطح بر عملکرد تریبولوژیکی آببندهای مکانیکی پرداخته‌اند. تحقیقات نشان داده‌اند که بافت‌های سطحی با الگوهای هندسی مشخص می‌توانند اصطکاک را کاهش داده و طول عمر آببندها را افزایش دهند. لی و همکاران [۱۰] در مطالعه خود نشان دادند که بافت‌های حفره‌دار^۴ با آرایش شش‌ضلعی، به دلیل ایجاد فشار هیدرودینامیکی مؤثرتر، عملکرد بهتری در کاهش اصطکاک نسبت به الگوهای تصادفی دارند. همچنین، وانگ و همکاران [۱۱] دریافتند که عمق و چگالی بهینه حفره‌ها تأثیر مستقیمی بر تشکیل لایه روانکار و کاهش سایش دارد.

جهت‌گیری بافت سطح نیز عامل مهمی در رفتار اصطکاکی است. شی و همکاران [۱۲] با استفاده از شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی نشان دادند که بافت‌های خطی موازی با جهت حرکت، در مقایسه با بافت‌های عمود بر آن، باعث کاهش قابل توجه ضریب اصطکاک می‌شوند. از سوی دیگر، چن و همکاران [۱۳] تأکید کردند که بافت‌های چندمقیاسی^۵ که ترکیبی از ریزساختارها و درشت‌ساختارها هستند، به دلیل بهبود توزیع روانکار و کاهش تماس جامد-جامد، عملکرد بهتری در شرایط بارگذاری بالا دارند.

با توسعه فناوری‌های ساخت پیشرفته، امکان ایجاد بافت‌های پیچیده با دقت بالا فراهم شده است. ما و همکاران [۱۴] از روش لیزر فمتو ثانیه برای ایجاد بافت‌های نانوساختار با حداقل آسیب حرارتی استفاده کردند و بهبود قابل توجهی در مقاومت به سایش مشاهده نمودند. همچنین، وانگ و همکاران [۱۵] نشان دادند که استفاده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی در ترکیب با بافت‌های سطحی می‌تواند اصطکاک را تا ۴۰٪ کاهش دهد.

¹ Laser Surface Texturing (LST)

² Reactive Ion Etching (RIE)

³ Texture Orientation

⁴ Dimple Textures

⁵ Multi-Scale Textures

کرتز و همکاران [۱۶] نقش توپوگرافی سطح در ترشوندگی بر روی مواد مختلف را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که توپوگرافی سطح نشانه‌ی مهمی برای ترشوندگی مواد است. شی و همکاران [۱۷] اثر میکرو شیار و میکرو سوراخ را بر روی ظرفیت تحمل بار در آببندهای گازی بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در میکرو شیارها تحمل بار بیشتری نسبت به میکرو سوراخ در چگالی پایین دارند ولی در چگالی‌های بالا سوراخ‌های بیضوی از میکرو شیارها تحمل بار بیشتر دارند. ادموت و همکاران [۱۸]، هندسه واقعی میکرو سوراخ را بر روی کارایی آببندها بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که عیوب ماشینکاری در ایجاد میکرو بافت‌ها در کارایی آبند تاثیر می‌گذارد و کنترل هندسه میکرو سوراخ‌ها برای کارایی بهتر بافت امری ضروری می‌باشد.

ژانگ و همکاران [۱۹] به منظور بهبود کارایی آبند مکانیکی، بافت سطح و مشخصه‌های هندسی آن‌ها را بهینه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بافت سنگفرشی عملکرد آبندی بهتری را با نسبت بالای ظرفیت باربری به نشتی و نسبت سختی فیلم روغن به نشتی در سرعت‌ها و فشارهای زاویه‌ای مختلف نشان می‌دهد. وانگ و همکاران [۲۰] برای بهبود عملکرد آبندی و افزایش طول عمر آبند مکانیکی سطح انتهایی میکسر داخلی، فناوری بافت سطحی به سطح انتهایی آبند مکانیکی را معرفی کردند. نتایج نشان داد که در شرایط حالت پایدار، آرایش‌های مختلف بافت‌های مثلث قائم‌الزاویه متساوی الساقین اثرات فشار هیدرودینامیکی آشکاری را ایجاد می‌کنند و باعث می‌شوند آبند مکانیکی ظرفیت فیلم روغن را تولید کند. ادموست و همکارش [۲۱] در مقاله‌ای به بررسی بهبود عملکرد آبندهای مکانیکی از طریق بافت‌دار کردن سطح و پوشش‌دهی با الماس پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب پوشش‌دهی با الماس و بافت‌دار کردن سطح، عملکرد آبندهای مکانیکی را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. این ترکیب باعث افزایش عمر مفید، کاهش نیاز به نگهداری، کاهش مصرف انرژی و بهبود قابلیت اطمینان در شرایط عملیاتی سخت می‌شود.

وجود نتایج متنوع و استفاده از روش‌های گوناگون نشان می‌دهد که هنوز راه طولانی در مطالعه بر روی سطوح آبند دارای بافت‌های میکرونی وجود دارد تا بتوان با رسیدن به نتیجه مطلوب، اصطکاک را بر روی این سطوح به حداقل ممکن رسانده و عمر آن‌ها را به حد قابل توجهی افزایش داد. در این پژوهش همانند تحقیق‌های قبلی تمرکز بر روی عامل اصلی کاهش عمر سطوح، یعنی نیروی اصطکاک است. در بیشتر پژوهش‌های گذشته این بافت‌ها بر روی سطوح ثابت ایجاد شده‌اند، اما در این پژوهش بافت‌ها بر روی سطوح متحرک طراحی شده‌اند. همچنین تحقیق‌های قبلی بیشتر بر روی موادی مانند فولاد زنگ‌نزن، سیلیکون کارباید و حتی سطوح دارای پوشش انجام شده است، حال آنکه در این پژوهش از سطوح گرافیتی استفاده شده است که امروزه بیشترین کاربرد را در ساخت سطوح آبندی در صنایع مرسوم و پرکاربرد دارند. همچنین برای اولین بار از سطوح آبندی با بافت‌هایی با شکل هندسی لوزی استفاده شد. در ساخت دستگاه آزمایش نیز، سعی شده است که تا حد امکان به محل اصلی کار این آبندها در پمپ‌ها نزدیک باشد، تا در شرایط هرچه واقعی‌تر آزمایش گردد. این پژوهش از محدود فعالیت‌هایی در این زمینه می‌باشد که علاوه بر انجام آزمایش‌ها در فشارهای گوناگون که روش مرسوم آزمایش این آبندها از گذشته بوده است، در سرعت‌های دورانی گوناگون نیز آزمایش‌هایی انجام می‌گیرد.

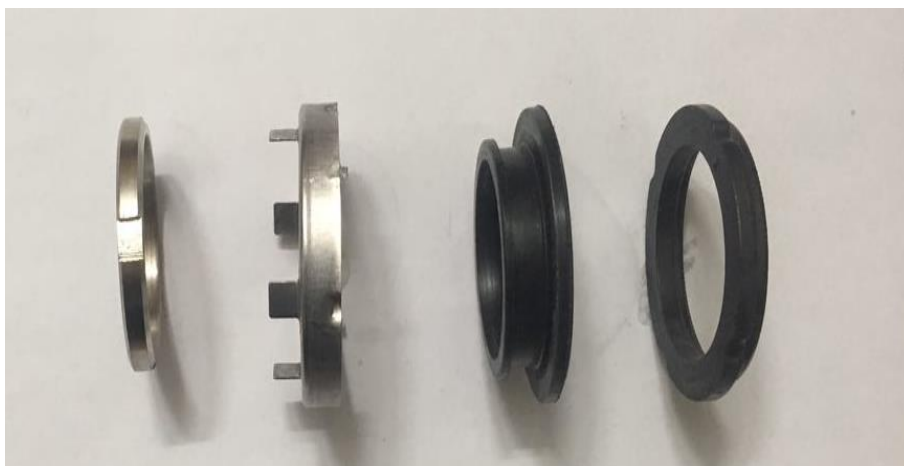
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- قطعه‌کار

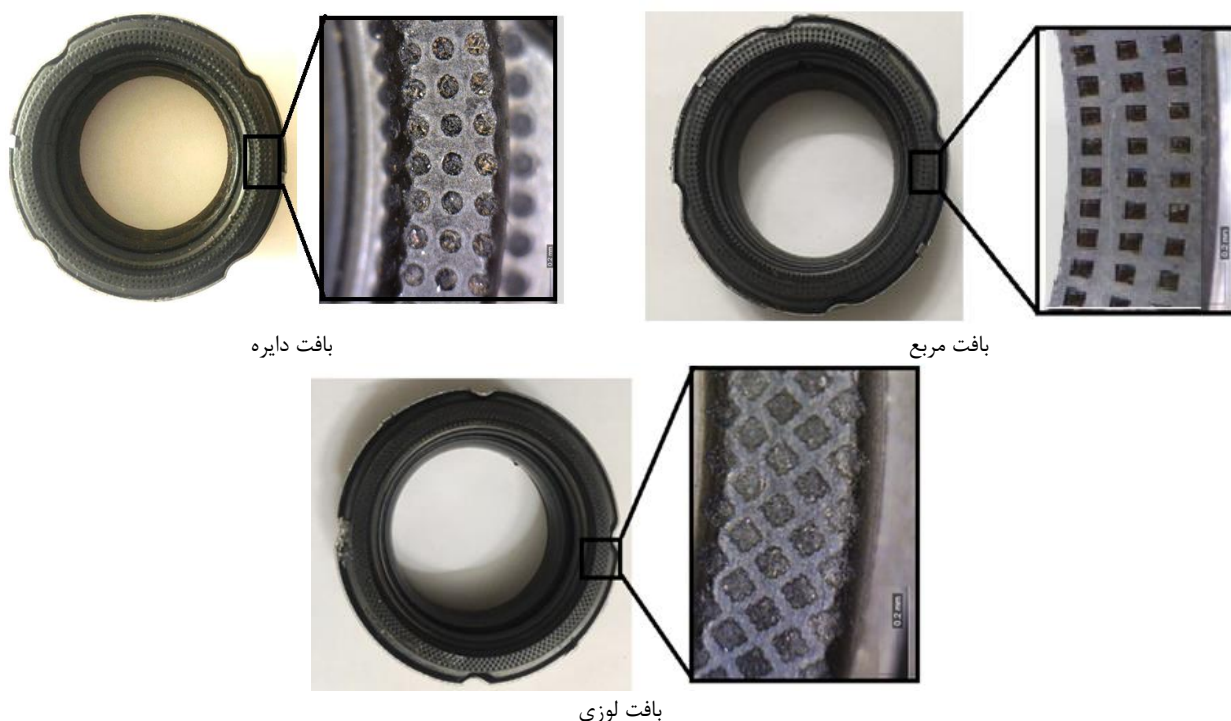
سطح آبند مکانیکی از جنس گرافیت با قطر داخلی ۳۲ میلی‌متر، قطر خارجی ۴۴ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر می‌باشد. آبند مکانیکی مورد استفاده در این تحقیق از نوع بورگمن MG1 می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. این قطعه‌کار در تمامی آزمایش‌ها ثابت بوده و بافت‌هایی با اشکال هندسی دایره، لوزی و مربع روی آن ایجاد شده است. این بافت‌ها در اشکال هندسی دایره، لوزی و مربع (با قطر ۰/۴ میلی‌متر) با چگالی سطح یکسان به وسیله دستگاه حکاکی لیزر بر روی سطوح ایجاد شده‌اند. در این پژوهش از یک لیزر فایبر دستگاه حکاکی فلز فایبر مدل YLP با حداکثر توان ۳۰ وات جهت ایجاد الگو بر روی سطح آبند استفاده شده است. در جدول ۱، تنظیمات دستگاه لیزر گزارش شده است. در شکل ۳ سطح آبندی که با استفاده از لیزر بر روی آن بافت ایجاد شده است را نشان می‌دهد، چگالی بافت در همه سطوح حدود ۲۲ درصد در نظر گرفته شد.

جدول ۱ تنظیمات لیزر و مقادیر خروجی آن

سرعت حرکت لیزر (mm/s)	توان لیزر (W)	موقعیت نقطه کانونی (mm)	طول ضلع یا قطر بافت (mm)	عمق بافت (mm)
۱۰	۳۰	۰	۰/۴	۰/۰۵



شکل ۲ آببند مکانیکی مورد استفاده در این تحقیق [۲۲]



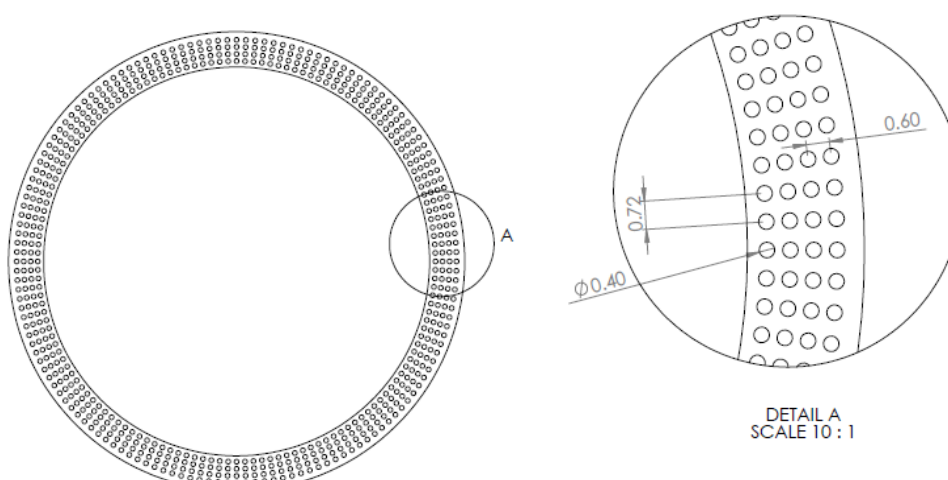
شکل ۳ بافت‌هایی با شکل‌های مختلف بر روی سطح

چگالی سطح بافت‌های ایجاد شده با اشکال هندسی مختلف بر روی سطوح آببند مکانیکی، ثابت در نظر گرفته شده است تا بتوان آزمایش‌ها بر روی سطوح آببند را در شرایط یکسان انجام داد، این امر تأثیر بسیار زیادی بر روی قابلیت قیاس مستقیم نتایج حاصل از آزمایش‌های متعدد در شرایط مختلف بر روی سطح آببندهای دارای بافت‌های با اشکال هندسی متفاوت دارد. همانطور که از جدول ۲ دریافت می‌شود علی‌رغم تفاوت سطح مقطع سوراخ‌های ایجاد شده بر روی سطوح آببند مکانیکی چگالی سطح این سوراخ‌ها بر روی تمامی سطح آببندها با اشکال هندسی متفاوت بافت‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. در اشکال هندسی متفاوت قطر دایره، ضلع مربع و همچنین قطر کوچک لوزی یکسان در نظر گرفته شده است تا تأثیر همه این اشکال بر روی جریان‌های سیال تا حد ممکن به یکدیگر نزدیک باشد.

شکل ۴ سطح آببند مکانیکی که بافت‌هایی به شکل دایره با قطر 0.4 میلی‌متر با استفاده از لیزر بر روی آن ایجاد شده است را نشان می‌دهد. فاصله بین بافت‌ها طوری در نظر گرفته شده است که ۲۲ درصد از سطح آببند را پوشش دهد که نمایان‌گر چگالی سطح بافت دایره بر روی این سطح می‌باشد.

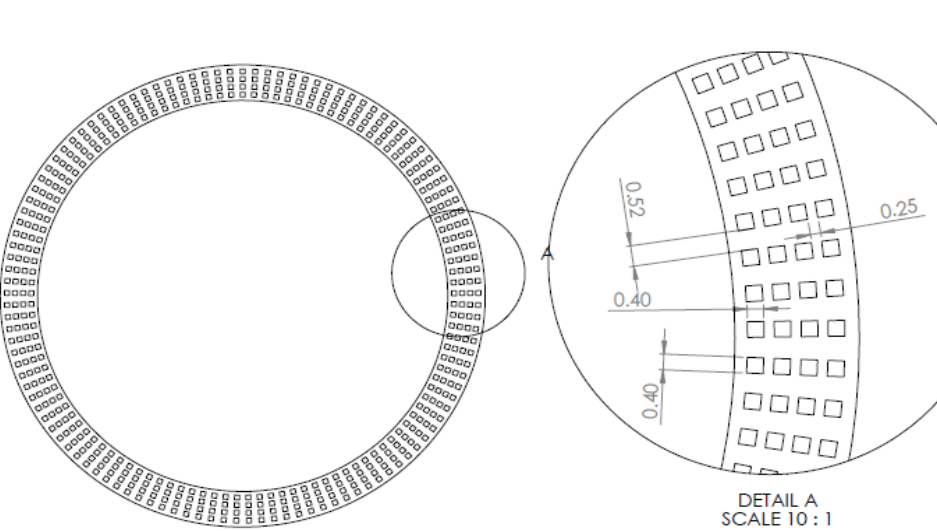
جدول ۲ ابعاد و شکل سوراخ‌های بافت

شماره نمونه	شکل بافت	قطر/طول بافت (mm)	چگالی سطح %	مساحت حفره (mm ²)
۱	دایره	۰/۴	۲۲	۰/۱۲۵۶
۲	مربع	طول ضلع ۰/۴	۲۲	۰/۱۶
۳	لوزی	طول قطر کوچک ۰/۴	۲۲	۰/۱۶



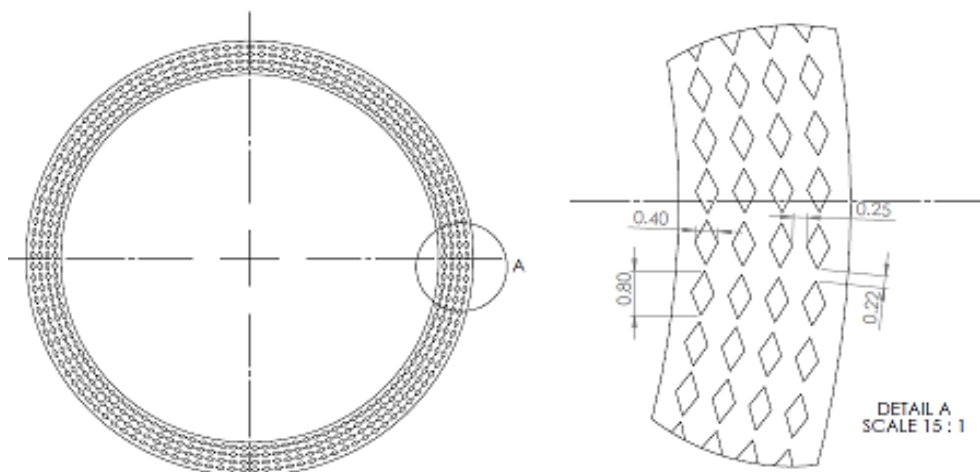
شکل ۴ نقشه آببند مکانیکی با سطح آببندی دارای بافت دایره

شکل ۵ سطح آببند، آببند مکانیکی که بافت‌هایی به شکل مربع با طول ضلع ۰/۴ میلی‌متر با استفاده از لیزر بر روی آن ایجاد شده است را نشان می‌دهد. همانند نمونه سطح آببندی، آببند مکانیکی با بافت دایره در این نمونه نیز فاصله بین بافت‌ها طوری در نظر گرفته شده است که ۲۲ درصد از سطح آببند را پوشش دهد که نمایان‌گر چگالی سطح بافت مربع بر روی این سطح می‌باشد.



شکل ۵ نقشه آببند مکانیکی با سطح آببندی دارای بافت مربع

در شکل ۶ آببند مکانیکی که بافت‌هایی به شکل لوزی با طول وتر کوچک ۰/۴ میلی‌متر و طول وتر بزرگ ۰/۸ میلی‌متر با استفاده از لیزر بر روی آن ایجاد گردید را نشان می‌دهد. همانند نمونه سطح آببند آببند مکانیکی با بافت دایره و همچنین مربع چگالی سطح این سطح آببند، آببند مکانیکی نیز ۲۲ درصد می‌باشد تا تمامی نمونه‌های آزمایش دارای چگالی سطح یکسان باشند.



شکل ۶ نقشه آببند مکانیکی با سطح آببندی دارای بافت لوزی

۲-۲- دستگاه آزمایش سطوح آببند مکانیکی

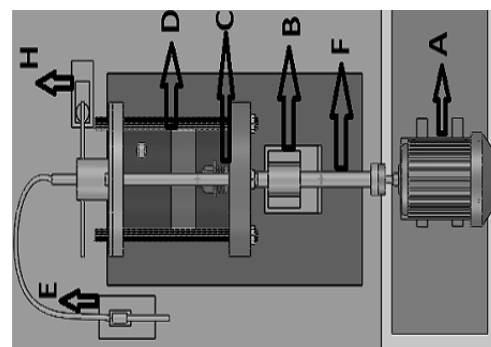
جهت آزمایش سطوح آببند مکانیکی نیاز به ساخت دستگاهی می‌باشد تا بتوان نمونه‌ها را در آن قرار داد و تحت فشار و سرعت گردش مختلف آزمایش کرد تا بتوان نزدیک‌ترین شرایط را به شرایط کاری صنعتی آببند مکانیکی به وجود آورد. در این پژوهش از یک دستگاه جهت نصب آببند با مشخصات ذیل استفاده شد. ۱- الکتروموتور زیمنس ۴ پل با توان ۱/۱ کیلووات جهت محرک دستگاه، ۲- شفت با طول ۶۱۰ میلی‌متر، قطر وسط شفت ۴۰ میلی‌متر و قطر ابتدا و انتهای شفت ۳۰ میلی‌متر جهت نصب سطوح آب بند بر روی آن، ۳- دو عدد بلبرینگ به شماره فنی 6306 2Z جهت مهار شفت و چرخش شفت درون آن‌ها، ۴- مخزن تحت فشار، ۵- فشار سنج، ۶- پمپ دستی. برای تحت فشار قرار دادن سطوح آببند مکانیکی نیاز به ساخت محفظه‌ای بود تا بتواند این فشار را تحمل کند. این محفظه به صورت استوانه‌ای و با قطر ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شفت ذکر شده با استفاده از یک عدد کوپلینگ تفلونی به شفت الکتروموتور کوپل گردید. برای تحت فشار قرار دادن سطوح آببند مکانیکی نیاز به ساخت محفظه‌ای بود تا بتوان این فشار را تحمل کند. این محفظه به صورت استوانه‌ای با قطر ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سطح مقطع دایره‌ای محفظه آزمایش باعث تسهیل فرآیند ساخت شده است. با در نظر گرفتن اهرام‌هایی برای این محفظه که در ارتباط با سطح آببند ثابت، آببند مکانیکی می‌باشد. نیروهای حاصل از اصطکاک سطوح ثابت و متحرک آببند مکانیکی که باعث گردش محفظه بر اثر گشتاور پیچشی حاصل از نیروهای اصطکاکی می‌گردد، توسط نیرو سنج نصب شده، اندازه گیری می‌شود و با استفاده از فرمول ۱ گشتاور وارد بر سطوح آببند محاسبه می‌گردد.

$$M = F \times L \quad (1)$$

که L فاصله عمودی و F نیرو می‌باشد. با مونتاژ قطعات بر روی هم دستگاه ساخته می‌شود، که در شکل ۷ شماتیک دستگاه نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۷ (الف) تصویر شماتیک و (ب) تصویر واقعی دستگاه آزمایش

۲-۳- طراحی آزمایش

در این مطالعه، پارامترهای مورد آزمایش سرعت دوران، فشار سیال و شکل بافت می‌باشد. سرعت دوران در ۵ سطح، فشار در ۵ سطح مختلف که در مجموع (۵×۵=۲۵) آزمایش برای هر بافت سطح آببند مکانیکی باید انجام شود. انتخاب محدوده فشار سیال بر مبنای محدوده فشار پمپ‌های صنعتی انتخاب شد. فشار ۵ تا ۱۵ بار محدوده اصلی عملکرد پمپ‌های سانتریفیوژ با دبی بالا در صنعت هستند. در این پژوهش از آب که یک سیال پر مصرف می‌باشد، استفاده شد. جدول ۳ پارامترها و سطوح انتخاب شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳ پارامترهای آزمایش و سطوح آنها

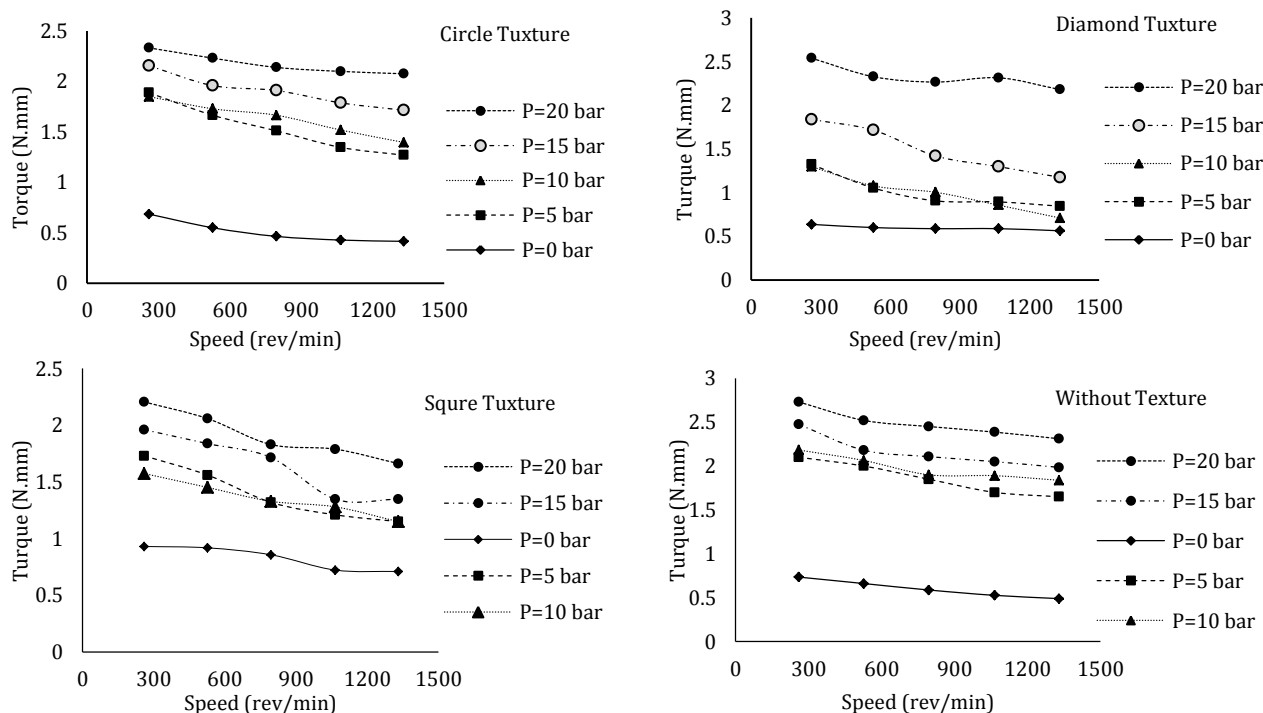
پارامترها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵
سرعت چرخشی (rpm)	۲۶۰	۵۳۰	۸۰۰	۱۱۰۰	۱۳۵۰
فشار (Bar)	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰
نوع بافت	دایره	مربع	لوزی	بدون بافت	-

۲-۴- نحوه انجام آزمایش

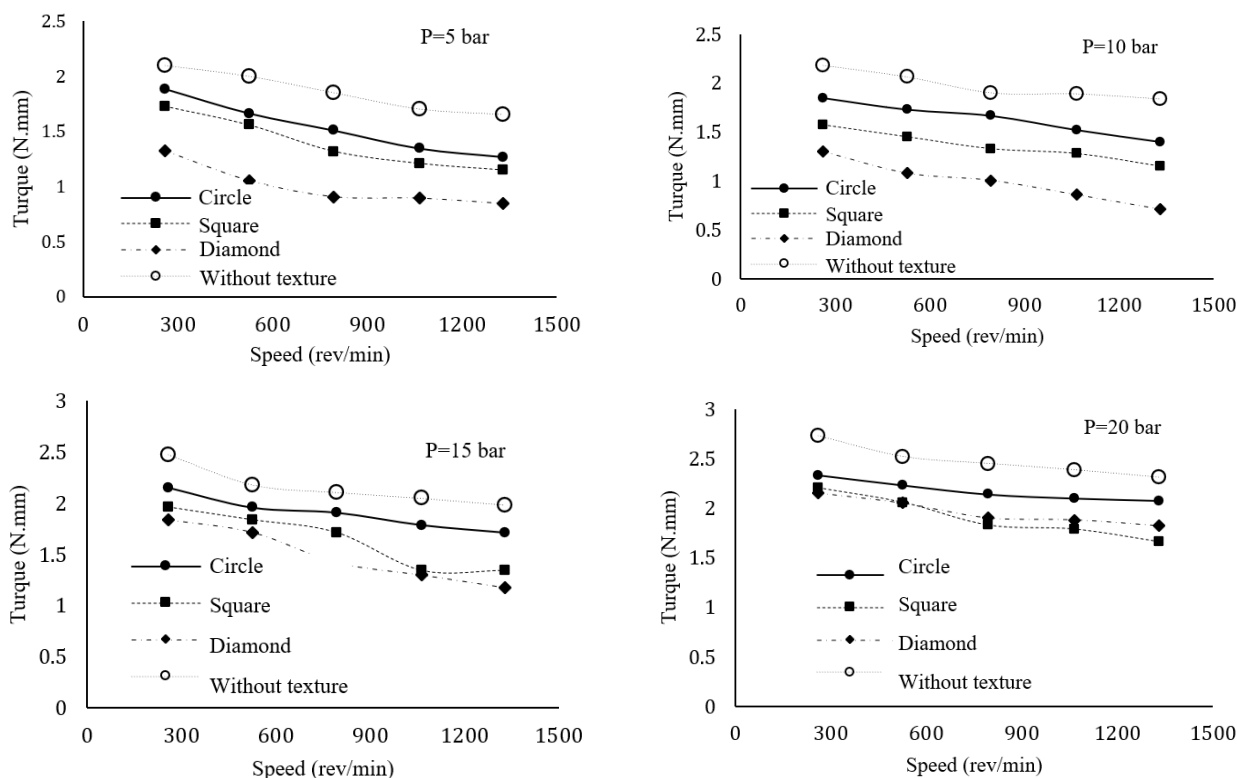
جهت آزمایش ابتدا سطح آببندی را در قسمت تعبیه شده نصب کرده و محفظه از آب پر می‌شود و دستگاه با دور موتور مورد نظر روشن می‌شود. با استفاده از پمپ دستی جابجایی مثبت از نوع سیلندر پیستونی فشار محفظه آببند را افزایش داده می‌شود تا به فشار مورد نظر برسد، سپس با استفاده از نیروسنج تعبیه شده زیر بازوی محفظه، نیروی وارده بر بازوی محفظه را که ناشی از اصطکاک به وجود آمده بین سطح آببندی است، اندازه‌گیری می‌شود و با ضرب کردن در طول بازو نیرو تبدیل به گشتاور می‌شود.

۳- نتایج و بحث

در نمودارهای شکل ۸ و ۹، آببندهای مکانیکی با سطح آببندی دارای بافت‌هایی با شکل‌های هندسی مختلف و سطح آببندی بدون بافت با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نمودارها بر اساس مقایسه یک بافت در فشارهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ بار و در سرعت‌های ۲۶۰، ۵۳۰، ۸۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۳۵۰ دور بر دقیقه رسم شده‌اند تا بتوان یک بافت را در تمام شرایط بررسی کرد. در انتها تمامی بافت‌ها در یک فشار خاص و در سرعت‌های متفاوت با یکدیگر مقایسه می‌شوند.



شکل ۸ تأثیر سرعت و فشار بر روی گشتاور ایجاد شده برای بافت‌های مختلف



شکل ۹ تأثیر سرعت و بافت بر روی گشتاور ایجاد شده برای فشارهای مختلف

۳-۱- تأثیر سرعت و فشار بر روی سطوح با بافت‌های مختلف

آببند مکانیکی با سطح آببندی بدون بافت نیز همانند سطوح دارای بافت در دستگاه آزمایش قرار گرفت و آزمایش گردید تا بتوان سطوح آببندی دارای بافت را با آن مقایسه کرد. شکل ۸ تأثیر سرعت و فشار را بر روی سطوح آببندی بدون بافت در آببندهای مکانیکی بررسی می‌کند. همانطور که در نمودارها مشخص است با افزایش سرعت در تمامی فشارها ضریب اصطکاک کاهش پیدا می‌کند، زیرا با افزایش سرعت، رژیم جریان از حالت مرزی به حالت مخلوط تغییر یافته و باعث کاهش اصطکاک می‌شود. در نمودارهای این آزمایش که در شکل ۸ نشان داده شده است با افزایش فشار، نیروی اصطکاک در یک سرعت مشخص زیاد می‌شود که دلیل آن نیرویی است که به انتهای سطح متحرک آببند وارد می‌شود و سطح متحرک را به سطح ثابت نزدیک‌تر می‌کند. در فشارهای بالا سطح تماس تقریباً ثابت خواهد شد و لایه روانکار قادر به جدایش سطح ثابت و متحرک آببند نخواهد شد.

۳-۲- مقایسه بافت‌ها با یکدیگر در یک فشار معین

نمودار شکل ۹ کلیه بافت‌ها را در سرعت‌های مختلف و در فشار ثابت در کنار یکدیگر بررسی می‌کند. برای سطح با بافت دارای شکل هندسی لوزی در سرعت‌های مختلف و فشارهای ۵، ۱۰ و ۱۵ بار که به ترتیب گشتاورهایی در بازه ۰/۸ تا ۱/۳، ۰/۸ تا ۱/۲ و ۱/۱ تا ۱/۸ نیوتن متر را تحمل می‌کند، بوجود می‌آید و در فشار ۲۰ بار در سرعت‌های مختلف، سطوح با بافت دارای شکل هندسی مربع گشتاوری بین ۱/۶ تا ۲/۲ نیوتن متر را تحمل می‌کند که در مقایسه با سطوح دیگر بهترین عملکرد را دارند.

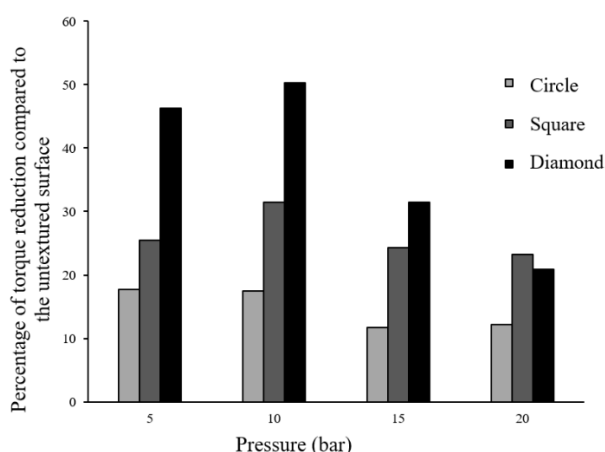
با مشاهده نمودار فوق مشخص می‌گردد که بطور تقریبی در بیشتر سرعت‌ها و در فشارهای مختلف، بدترین عملکرد متعلق به آببند مکانیکی با سطح آببند های بدون بافت می‌باشد، که این بدین معنا می‌باشد که در سرعت و فشار مذکور سطوح آببند مکانیکی بدون بافت بیشترین نیروی اصطکاکی را بر هم وارد می‌کنند و کمترین عمر را دارند، و بهترین عملکرد متعلق به آببند مکانیکی با سطح آببندهایی با بافت‌های دارای شکل هندسی لوزی می‌باشد که این بدین معنا می‌باشد که در بیشتر دورها و فشار ۱۰ بار سطوح آببند مکانیکی با سطح آببند با بافت‌های دارای شکل هندسی لوزی کمترین نیرو را بر یکدیگر وارد کرده و کمترین اصطکاک را بر هم وارد می‌کنند و بیشترین عمر را دارند.

شکل‌های مختلف سوراخ شامل دایره، مربع و لوزی در جهت‌های مختلف به مسیر لغزش دو سطح ثابت و متحرک تاثیر واضحی روی ظرفیت تحمل بار و اصطکاک آببندهای مکانیکی دارد. شکل‌های لوزی عمود به مسیر لغزش بهترین نتیجه را در کاهش اصطکاک از خود نشان می‌دهد.

در بافت‌هایی که جهت شیار عمود به مسیر لغزش است، در مقایسه با جهت شیار موازی با جهت لغزش در وضعیتی که فشار پایین می‌باشد، کاهش پیدا می‌کند و دلیل آن را این‌گونه بیان کردند، که شیار عمود به مسیر لغزش می‌تواند نیروی چسبندگی ناشی از موینگی آب را به حداقل برساند، که در وضعیت‌های با بار کم بسیار ضروری می‌باشد [۲۳].

بافت لوزی در مقایسه با دیگر بافت‌ها، لبه تیز دارد، لبه تیز سوراخ‌ها جریان را به دو فاز گاز-مایع تقسیم می‌کنند و یک جریان یکنواخت دو فازی روی سطوح بین هر دو سوراخ تشکیل می‌شود که از نشتی سیال به خارج جلوگیری می‌کند [۲۴].

همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، سطح با بافت لوزی در فشار ۵ و ۱۰ بار بطور میانگین توانسته است حدود ۵۰ درصد گشتاور را کاهش دهد. البته در فشارهای بالاتر این درصد کاهش گشتاور، کمتر می‌شود و بطور میانگین در فشارهای ۱۵ و ۲۰ حدود ۲۵ درصد، گشتاور نسبت به سطح بدون بافت کاهش می‌یابد. سطح با بافت مربعی بین ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش گشتاور نسبت به سطح بدون بافت دارد و بافت با شکل دایره‌ای کمترین کاهش گشتاور را دارد.



شکل ۱۰ کاهش گشتاور برای بافت‌های مختلف نسبت به سطح بدون بافت

در جدول ۴ نتایج این تحقیق با تحقیقات مشابه مقایسه شده است.

جدول ۴ مقایسه تحقیق حاضر با تحقیقات مشابه

نتایج	هدف تحقیق	محقق
حفره‌های دایره‌ای توزیع فشار یکنواخت‌تری ایجاد می‌کنند و عملکرد هیدرودینامیکی بهینه‌تری دارند. عمق بهینه حفره برای بیشترین کارایی، حدود ۵-۱۰ میکرون تعیین شد. حفره‌های فرسوده با لبه‌های نامنظم، کارایی آببند مکانیکی را تا ۱۵-۲۰٪ کاهش می‌دهند.	بررسی شکل حفره‌ها (دایره و بیضی) بر عملکرد آببند مکانیکی بافت دار	ادجوت و همکاران [۱۸]
سطوح بافت‌دار با لیزر تا ۴۰-۶۰٪ کاهش اصطکاک در مقایسه با سطوح صاف نشان دادند. حفره‌های با قطر ۵۰-۲۰۰ میکرون و عمق ۱۰-۳۰ میکرون بیشترین بهبود را در عملکرد ایجاد کردند. تراکم بهینه بافت حدود ۲۰-۴۰٪ پوشش سطحی تعیین شد.	بررسی تأثیر شامل اندازه، شکل، تراکم و عمق بافت سطح با لیزر بر بهبود عملکرد تریبولوژیکی (اصطکاک، سایش و روانکاری) آببند مکانیکی	اتسیون [۲۵]
بافت لوزی بهترین عملکرد را داشت بطوریکه در فشار ۵ بار ۵۰٪ اصطکاک و گشتاور را کاهش داد.	بررسی اثر شکل هندسی بافت (لوزی، دایره و مربع) بر ضریب اصطکاک و گشتاور در آببند مکانیکی	این تحقیق

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، سطوح دارای بافت با شکل‌های هندسی دایره، مربع و لوزی با یک نمونه سطح بدون بافت در شرایط مختلف فشار و در سرعت‌های گوناگون مورد آزمایش قرار گرفت. با اندازه‌گیری نیروی اصطکاک بین سطوح ثابت و متحرک آببندهای مکانیکی از طریق سنجش گشتاور بین سطوح، در شرایط گوناگون آزمایش نتایج مختلفی حاصل گردید که نتایج حاصل عبارتند از:

- رفتار سطوح آببندی با بافت‌های هندسی متفاوت در شرایط کاری مختلف، متفاوت است ولی از الگوی بطور تقریبی یکسانی در بازه‌های فشار و سرعت‌های پایین و بالا پیروی می‌کند.
- با افزایش سرعت در تمامی فشارها گشتاور کاهش پیدا می‌کند و با افزایش فشار، گشتاور افزایش می‌یابد.
- آببند مکانیکی با سطوح آب بندی با بافت‌های دارای شکل هندسی لوزی بهترین عملکرد را دارد. سطح با بافت لوزی در فشار ۵ و ۱۰ بار بطور میانگین حدود ۵۰ درصد گشتاور را کاهش می‌دهد.
- سطح با بافت مربعی بین ۲۰ تا ۳۰ درصد و سطح با بافت دایره‌ای بین ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش گشتاور نسبت به سطح بدون بافت دارد.
- از این موضوع می‌توان استنباط کرد که با بکارگیری سطوح آببندی با بافت‌های هندسی مناسب با شرایط کاری، می‌توان عمر این سطوح آببندی را بطور مؤثر و قابل توجهی افزایش و هزینه‌ها را تا حد امکان کاهش داد.

References

- [1] Flitney R. Seal and Sealing Handbook. 2nd ed. The Trade & Technical Press Limited; 2009.
- [2] Allahvakil H, Zarepour Firouzabadi H. A hybrid lapping/anodizing technique for surface modification of the tungsten carbide mechanical seals used in direct reduction plant compressors of steel production industries. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 May 21;11(3):26-37. doi: 10.22034/IJME.2024.433486.1909 [In Persian]
- [3] Samadi MR, Khoshanjam A, Khoshanjam K. The Effects of Angular Velocity and Combination of AlO₂ and SiC Abrasive Particle by Use of NMAF Method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021 Aug 23;8(6):26-33. [In Persian]
- [4] Hamilton DB, Walowit JA, Allen CM. A theory of lubrication by microirregularities. Journal of basic engineering. 1966 Mar 1;88(1):177-85. doi: 10.1115/1.3645799
- [5] Pettersson U, Jacobson S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts. Tribology international. 2003 Nov 1;36(11):857-64. doi: 10.1016/S0301-679X(03)00104-X
- [6] Suh NP, Mosleh M, Howard PS. Control of friction. Wear. 1994 Jun 1;175(1-2):151-8. doi: 10.1016/0043-1648(94)90178-3
- [7] Yu XQ, He S, Cai RL. Frictional characteristics of mechanical seals with a laser-textured seal face. Journal of Materials Processing Technology. 2002 Oct 11;129(1-3):463-6. doi: 10.1016/S0924-0136(02)00611-8
- [8] Wang X, Adachi K, Otsuka K, Kato K. Optimization of the surface texture for silicon carbide sliding in water. Applied surface science. 2006 Nov 30;253(3):1282-6. doi: 10.1016/j.apsusc.2006.01.076
- [9] Nanbu T, Ren N, Yasuda Y, Zhu D, Wang QJ. Micro-textures in concentrated conformal-contact lubrication: effects of texture bottom shape and surface relative motion. Tribology Letters. 2008 Mar;29(3):241-52. doi: 10.1007/s11249-008-9302-9
- [10] Li Q, Wang Y, Zhang S, Xu WW, Wang Z, Wang Z. Optimal design of parallel sliders with square-shaped textures considering fluid-structure interaction. Industrial Lubrication and Tribology. 2019 May 7;71(4):620-7. doi: 10.1108/ILT-09-2018-0366
- [11] Wang X, Chen Y, Ding K, Yu C. Comparison of dimples and grooves based on friction and leakage properties of textured mechanical seals. Industrial Lubrication and Tribology. 2023 Feb 15;75(2):184-9. doi: 10.1108/ILT-09-2022-0294
- [12] Shi L, Wei W, Wang T, Zhang Y, Zhu W, Wang X. Experimental investigation of the effect of typical surface texture patterns on mechanical seal performance. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2020 May;42(5):227. doi: 10.1007/s40430-020-02318-1
- [13] Chen T, Ji J, Fu Y, Yang X, Fu H, Fang L. Tribological performance of UV picosecond laser multi-scale composite textures for C/SiC mechanical seals: Theoretical analysis and experimental verification. Ceramics International. 2021 Aug 15;47(16):23162-80. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.04.312
- [14] Ma J, Zhu X, Xu G, Zhao A, Zhang K, Li Y, Zhang Q, Sang L, Yang X. Effect of femtosecond laser composite texturing on tribological properties of 316LN stainless steel. In Journal of Physics: Conference Series 2025 Feb 1 (Vol. 2951, No. 1, p. 012047). IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/2951/1/012047

- [15] Wang S, Wang Y, Chen J, Zou Y, Ouyang J, Jia D, Zhou Y. Simple and scalable synthesis of super-repellent multilayer nanocomposite coating on Mg alloy with mechanochemical robustness, high-temperature endurance and electric protection. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022 Sep 1;10(9):2446-59. doi: [10.1016/j.jma.2020.11.024](https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.11.024)
- [16] Cortese B, Riehle MO, D'Amone S, Gigli G. Influence of variable substrate geometry on wettability and cellular responses. *Journal of colloid and interface science*. 2013 Mar 15;394:582-9. doi: [10.1016/j.jcis.2012.11.051](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.11.051)
- [17] Shi L, Wang X, Su X, Huang W, Wang X. Comparison of the load-carrying performance of mechanical gas seals textured with microgrooves and microdimples. *Journal of Tribology*. 2016 Apr 1;138(2):021701. doi: [10.1115/1.4031435](https://doi.org/10.1115/1.4031435)
- [18] Adjemout M, Andrieux A, Bouyer J, Brunetière N, Marcos G, Czerwec T. Influence of the real dimple shape on the performance of a textured mechanical seal. *Tribology International*. 2017 Nov 1;115:409-16. doi: [10.1016/j.triboint.2017.06.010](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.010)
- [19] Zhang N, Liu Y, Li Z, Zhan X. Sealing performance and optimization design of squamous textured mechanical seal. *Tribology International*. 2024 May 1;193:109425. doi: [10.1016/j.triboint.2024.109425](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109425)
- [20] Wang ZS, Yang FQ, Song YM, Han XJ. Performance of the internal mixer's end face mechanical seal with isosceles right triangle textures. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 2023 Sep 1;18(9):1057-69. doi: [10.1166/jno.2023.3489](https://doi.org/10.1166/jno.2023.3489)
- [21] Adjemout M, Huard S. Enhanced mechanical seals performance by surface texturing and diamond coating. *Sealing Technology*. 2021 Nov;2021(11):4-9.
- [22] EagleBurgmann. *Mechanical Seal Technology and Selection [Catalogue]*. Germany: EagleBurgmann.
- [23] Yu H, Wang X, Zhou F. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces. *Tribology Letters*. 2010 Feb;37(2):123-30. doi: [10.1007/s11249-009-9497-4](https://doi.org/10.1007/s11249-009-9497-4)
- [24] Tokunaga Y, Inoue H, Okada K, Shimomura T, Yamamoto Y. Effects of cavitation ring formed on laser-textured surface of mechanical seal. *Tribology Online*. 2011 Jan 31;6(1):36-9. doi: [10.2474/trol.6.36](https://doi.org/10.2474/trol.6.36)
- [25] Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing. *Tribology letters*. 2004 Nov;17(4):733-7. doi: [10.1007/s11249-004-8081-1](https://doi.org/10.1007/s11249-004-8081-1)