



Investigation of Effective Parameters in the Sealing System of Rotating Shaft Packings Based on Operational Conditions

Mohsen Morshedzadeh¹ , Mojtaba Sheikhi Azqandi^{*2} , Seyyed Esmaeil Hosseini³

1. M.Sc, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

2. Associate professor, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

3. M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

Abstract

This study has investigated the parameters influencing packing-type seals and their design for effective sealing of rotating shafts in mechanical systems. Seals serve as critical components in preventing fluid leakage and ingress of foreign particles, playing a key role in enhancing equipment reliability. The selection of packing materials and structures is influenced by operational parameters such as pressure, temperature, rotational speed, and fluid type (corrosive, abrasive, or neutral). In this research, various packing types, including braided packings, aramid fiber packings, and lantern ring-equipped packings, are analyzed. The use of advanced materials such as graphite, polytetrafluoroethylene (PTFE), and synthetic fibers, known for their high resistance to wear, corrosion, and elevated temperatures, is highlighted as an effective solution in demanding industries such as oil, gas, and petrochemicals. This study presents the relationship between gland pressure as a function of sealing length and the number of sealing rings. The results indicate that modern designs, such as spring-loaded packings and lantern ring-integrated systems, improve sealing performance under harsh conditions by applying controlled initial pressure and lubricant injection. Additionally, composite packings with uniform stress distribution reduce shaft friction and wear. However, challenges such as the need for optimization in high-pressure fluctuation environments and limitations in the industrial application of novel materials remain. This research proposes that future studies focus on developing smart materials, geometric optimization, and incorporating graphene.

Keywords

Seal, Rotating Shafts,
Industrial Packings,
Smart Materials, Optimal
Design

Received: 24.04.2025

Revised: 19.05.2025

Accepted: 25.05.2025

*Corresponding Author

Mojtaba Sheikhi Azqandi

Email

mojtabasheikhi@birjand.ac.ir

1- Introduction

Seals are mechanical devices used to prevent fluid leakage from their enclosing systems. Sometimes, the term "leak preventer" is used instead of "seal." These devices, in addition to preventing the escape of materials, also prevent the ingress of foreign particles into tanks or closed piping systems. Optimal seals are designed to achieve minimal leakage along with the least amount of friction and wear [1]. Considering the advancement of the mechanical industry in the field of seals and their applications, research and development in the

application of new seals in various industries has brought about extensive changes. These advancements have been an effective factor in enhancing the quality level of leakage prevention for rotating shafts of motors and pumps, as well as improving the performance of reciprocating pistons. An example of such progress in these industries is the use of smart materials in seals. Hydrogels are an example of these materials. Hydrogels, as three-dimensional polymer networks and water absorbents, have wide applications in various

How to Cite this Article:

[1] M. Morshedzadeh, M. Sheikhi Azqandi, and S. E. Hosseini, "Investigation of effective parameters in the sealing system of rotating shaft packings based on operational conditions," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 125–146, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.518949.1126> (in Persian)



industries. These materials in industrial mechanics can be used as smart seals. Unique characteristics such as biocompatibility, responsiveness to stimuli, and low cost have made hydrogels a key material in modern technologies [2-3]. Morshedzadeh and Sheikhi have focused on the application of hydrogels as seals [4]. Based on their investigation, smart hydrogels, due to their ability to absorb and retain water, responsiveness to environmental stimuli such as temperature, pH, or mechanical stress, and self-repairing property, are considered a novel option for sealing in various industries. In industry, these materials can be used as advanced sealants in hydraulic infrastructures, tunnels, concrete structures, and water and oil transmission lines. The use of smart hydrogels leads to reduced water consumption, increased structural durability, and decreased maintenance and repair costs.

Mechanical seals are an example of widely used seals in industries. Mechanical seals are critical components in various industries, whose primary function is to prevent fluid leakage in rotating equipment such as pumps, mixers, and turbines. These seals consist of a primary rotating ring and a secondary stationary ring that reduce friction and wear by creating a thin layer of lubricant between the contact surfaces. Their operation is based on the balance of hydrodynamic and hydrostatic forces, which are influenced by factors such as rotational speed, fluid pressure, and surface roughness. The proper performance of seals has been investigated through analytical methods, numerical simulation, and laboratory testing to ensure that the seal possesses a long service life, low leakage, and corrosion resistance [5-6].

Given the importance of reducing costs in seal production, packings, as one type of dynamic contact seal, hold a special place in the industry. In this research, the performance of contact seals of the packing type has been investigated. Based on the investigation conducted by the authors, the important criteria in packing seal design have not yet been comprehensively and practically examined. This paper attempts to present design criteria operationally. The internal structure of these seals, implementing design changes in components,

using advanced materials in packing strips, and employing the structure of non-contact seals in packings are among the factors that contribute to the optimization of these devices. These improvements lead to increased efficiency, reduced leakage, and significantly lower costs compared to non-contact seals.

2- Operating Method of Pressure Packing Seal

In sealing systems based on packing, as observed in Figure 1, an arrangement of several layers is used, in most cases four to five packing layers compacted in the dedicated space allocated for sealing [7].

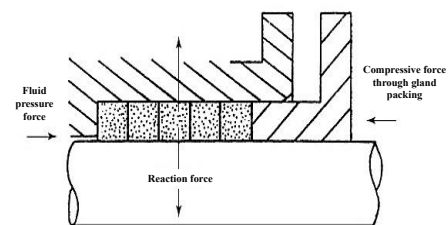


Figure 1: Cutaway sections of 5-layer packing contact seal [7]

In packing sealing systems, lubricant-impregnated packings are used to increase density and control operating temperature. These materials are activated under the influence of two main factors: mechanical compression resulting from force application by the packing gland, and heating generated by dynamic friction during shaft rotation. The significant point in the design and operation of packing sealing is the continuous monitoring of operational parameters, including operating temperature, leakage rate, and lubricant distribution quality; by observing these principles and precise control of effective parameters, optimal performance of packing sealing systems can be achieved.

2-1- Contact Pressure in Packing Seal

Figure 2 shows the compressive forces on the seal when the packing gland is tightened. When the gland bolts are uniformly tightened, the packing seal becomes fully compressed. The degree of this compression varies due to the frictional force between the shaft and the wall along the axis. The compression is lower at the point farthest from the gland, which can be modeled by assuming identical

packing materials and a lateral stress ratio K independent of the compression amount. Considering that the axial stress P_a in the seal at a distance X from the gland depends on the assumption that the lateral stress ratio K is independent of the compression amount, the radial contact stress P is calculated from Equation (1).

$$P = K \cdot P_a \tag{1}$$

When the gland is tightened, an element of the packing seal is displaced by dx along the axis, and the differential axial stress dp across this element is uniform [8].

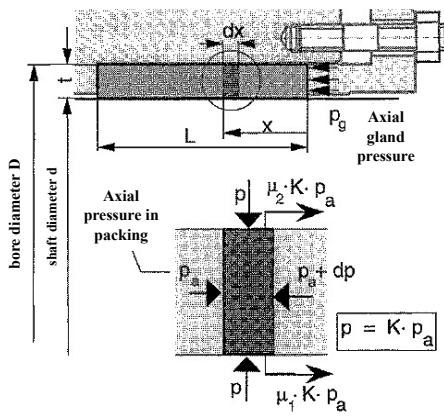


Figure 2: Contact pressure after tightening the gland packing [8]

2-2- Percentage of Pressure Applied to Packing Rings

If in the packing seal, the friction coefficient is assumed to be 0.15, the lateral stress ratio is equal to 0.4, and the packing geometry is a 1×1 cm square, then using Equation 2, the percentage of pressure applied to the first packing ring can be calculated.

$$P = K \cdot P_g \cdot e^{-\mu k x / t} \tag{2}$$

As observed, in the first packing ring, the radial contact pressure is equal to 37.7% of the gland pressure. This value decreases to 35.5% of the gland pressure in the second packing ring. Figure 3 shows the percentage of pressure applied to different packings with varying stiffness coefficients and a constant friction coefficient of 0.15 [9].

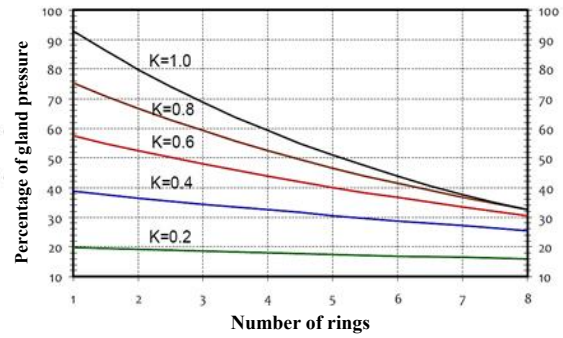


Figure 3: Percentage of applied pressure on different packings with varying lateral stress ratios and a constant friction coefficient of 0.15 [9]

In the graph of Figure 3, the vertical axis shows the percentage of gland pressure, and the horizontal axis shows the number of packing rings, where ring number 1 is the ring closest to the gland. Two important points can be deduced from this graph. The first point is that as the lateral stress ratio increases, the percentage of gland pressure on packing rings near the gland increases, and shaft wear also increases. Additionally, the pressure percentage on rings farther from the gland decreases, which indicates that wear on the shaft near the gland is greater.

3- Selection of packing type based on operational conditions

Packings are produced in various types and from different materials. The most common type is packings made of interwoven fibers, manufactured in square shapes using specialized braiding machines. These packings may use a single fiber type or combine multiple fibers, such as graphite-polytetrafluoroethylene (PTFE) fibers to reduce friction and increase flexibility, and aramid fibers to enhance strength and resistance to wear and even impact forces [10]. Compressed packings are typically made from additive-free plastics with low flexibility, generally used in simple installations like cold-water valves. Before braiding, fibers are lubricated with various lubricants depending on the packing's application (e.g., food or water use). Another type is graphite packings, produced by winding graphite layers in molds and compressing them. Standard packings usually have a square cross-section. Some packings feature a silicone elastomer core, which increases the seal's resistance

to vibrations and improves sealing performance [11].

4- Seal housing design criteria

Figure 4 presents several criteria required for the design and installation of packing seals, including tolerance values and geometric constraints of the system. For example, to achieve low leakage under vacuum, radial shaft movement must be less than two percent of the dimension x s. Parameter s denotes the packing width, as indicated in Figure 4. x is the permissible coefficient, its value dependent on shaft diameter and determined by Equation (3) [12].

$$x = \begin{cases} 1.07d < 60 \\ 1.0560 < d < 100 \\ 1.03d > 100 \end{cases} \quad (3)$$

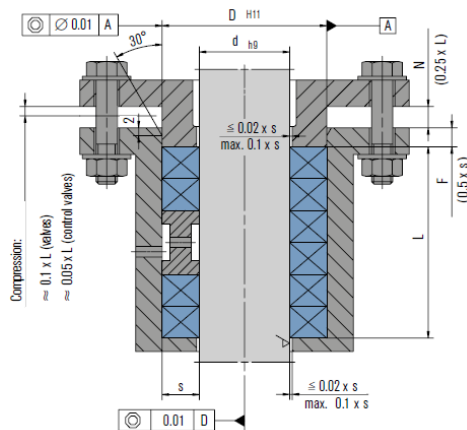


Figure 4: Tolerancing and geometric constraints related to the seal [12]

5- Conclusion

This research, through a systematic investigation of key parameters affecting the performance of packing seals in rotating shafts, demonstrated that combining advanced materials and optimizing mechanical design plays a decisive role in improving the efficiency and durability of these systems. The use of optimized lantern rings as an innovative solution enables simultaneous injection of lubricant and coolant in high-pressure environments, significantly enhancing sealing performance under challenging operational conditions. Additionally, composite packings with uniform stress distribution and reduced friction not only limit fluid leakage but also extend the service life of shafts and related equipment. For future research, the development of smart materials with self-healing capabilities or embedded sensors for real-time seal condition monitoring, geometric

optimization of packings with unconventional shapes, performance evaluation of advanced materials like graphene in specialized working environments, and cost reduction through replacing expensive materials with economical alternatives are proposed. This research, through the comprehensive analysis of parameters affecting packing design, introduces the use of optimized lantern rings as an innovative solution for simultaneous lubricant and coolant injection in high-pressure environments, which has been less explored in previous studies. Furthermore, proposing a hybrid composite material pattern (such as graphite-polytetrafluoroethylene with elastomeric cores) for uniform stress distribution and reduced shaft wear represents a key distinction from conventional research. Implementing packings equipped with self-adjusting springs capable of applying stable initial pressure without manual adjustments, as a flexible solution in high-speed rotary systems, is another innovation of this study.

6- References

- [1] R. K. Flitney, *Seals and Sealing Handbook*, 6th ed. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [2] I. B. Djemaa, S. Auguste, W. Drenckhan-Andreatta, and S. Andrieux, "Hydrogel foams from liquid foam templates: Properties and optimisation," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 294, p. 102478, 2021, doi: [10.1016/j.cis.2021.102478](https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102478).
- [3] L. Hu, Y. Yang, W. Yu, and L. Xu, "Hydrogels for Lubrication: Synthesis, Properties, Mechanism, and Challenges," *Lubricants*, vol. 12, no. 6, p. 186, 2024, doi: [10.3390/lubricants12060186](https://doi.org/10.3390/lubricants12060186).
- [4] M. Morshedzade and M. Sheikhi Azqandi, "Investigation and Analysis of Mechanical Properties and Response of Hydrogels in Smart Systems Based on the Type of Stimulus," in *1151-ICME2025*, 2025. (in Persian)
- [5] N. Reeh, G. Manthei, and P. J. Klar, "Soft sensor technology for the determination of mechanical seal friction power performance," *Appl. Syst. Innov.*, vol. 7, no. 3, p. 39, 2024, doi: [10.3390/asi7030039](https://doi.org/10.3390/asi7030039).
- [6] T. He, Q. Zhang, Y. Yan, J. Dong, and P. Zhou, "Numerical simulation of a new designed mechanical seals with spiral groove structures," *Lubricants*, vol. 11, no. 2, p. 70, 2023, doi: [10.3390/lubricants11020070](https://doi.org/10.3390/lubricants11020070).

-
- [7] B. D. Halligan, "Seals for Fluid Power Equipment Part Three Compression Packings," *Tribol. Ser.*, vol. 8, pp. 370–392, 1983, doi: [10.1016/S0167-8922\(08\)70706-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(08)70706-5).
- [8] J. L. Thomson, "A Theory of Sealing with Particular Reference to the Packed Stuffing Box," in *Int. Conf. on Fluid Sealing*, British Hydromechanics Research Association, Paper B1, 1961.
- [9] S. H. Yousefi, R. Ashrafi, and S. Golaei, "The effect of pressure and friction coefficient in gland packing design," in Second National Conference on Manufacturing Engineering, Islamic Azad Univ., Najafabad Branch, Iran, Oct.–Nov. 2009. (in Persian)
- [10] Fluid Sealing Association & European Sealing Association, *Compression packing: Technical manual*, 4th ed., 2018.
- [11] E. Staaf, "A review of the properties of expanded graphite and selected forms of PTFE as alternatives to asbestos in a sealing role," in *Proc. 8th Int. Conf. on Fluid Sealing*, Paper D1, BHRA, Sept. 1978.
- [12] Eagle Burgmann, *Compression Packing, Product Catalog*. 2015. [Online]. Available: <https://www.eagleburgmann.com>



بررسی پارامترهای مؤثر در سیستم پکینگ محور چرخشی و مرور تأثیر آن‌ها بر طراحی آب‌بند بر اساس شرایط کاری

محسن مرشدزاده^۱ ID، مجتبی شیخی ازغندی^۲ ID*، سید اسماعیل حسینی^۳ ID

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام حسین، تهران، ایران

چکیده

کلمات کلیدی

آب‌بند
محورهای چرخشی
پکینگ‌های صنعتی
مواد هوشمند
طراحی بهینه

در این پژوهش به بررسی پارامترهای مؤثر بر آب‌بند از نوع پکینگ و طراحی آن‌ها به‌منظور آب‌بندی مؤثر محورهای چرخشی در سیستم‌های مکانیکی پرداخته شده است. آب‌بندها به‌عنوان اجزای حیاتی در جلوگیری از نشت سیالات و ذرات خارجی، نقش کلیدی در افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات ایفا می‌کنند. انتخاب مواد و ساختار پکینگ‌ها تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی نظیر فشار، دما، سرعت چرخش محور و نوع سیال (خورنده، ساینده یا خنثی) قرار دارد. در این مطالعه، انواع پکینگ‌ها شامل پکینگ‌های بافته‌شده، الیاف آرامید و پکینگ‌های مجهز به حلقه فانوسی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. استفاده از مواد پیشرفته مانند گرافیت، پلی‌تترافلوئورواتیلن و الیاف مصنوعی به دلیل مقاومت بالا در برابر سایش، خوردگی و دمای بالا، به‌عنوان راهکاری مؤثر در صنایع چالش‌برانگیزی نظیر نفت، گاز و پتروشیمی معرفی شده‌اند. در این تحقیق رابطه بین فشار گلندی برحسب طول آب‌بندی و تعداد حلقه‌های آب‌بند ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که طراحی‌های نوین مانند پکینگ‌های با فنر و حلقه فانوسی، با اعمال فشار اولیه کنترل‌شده و تزریق روان‌ساز، عملکرد آب‌بندی را در شرایط دشوار تا حد زیادی بهبود می‌بخشند. همچنین، پکینگ‌های کامپوزیتی با توزیع یکنواخت تنش، اصطکاک و سایش شافت را کاهش می‌دهند. با این حال، چالش‌هایی نظیر نیاز به بهینه‌سازی در محیط‌های با نوسانات فشار بالا و محدودیت در کاربرد صنعتی مواد نوین باقی است. این پژوهش پیشنهاد می‌کند توسعه مواد هوشمند، بهینه‌سازی هندسی و استفاده از گرافن در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴

*نویسنده مسئول

مجتبی شیخی ازغندی

ایمیل

mojtabasheikhi@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

به اصول صنعت آب‌بندی، انواع مختلفی از این تجهیزات طراحی و در صنعت استفاده می‌شوند. در انتخاب یک آب‌بند برای کاربرد خاص، باید عوامل متعددی نظیر فشار، دما، خوردگی محیطی ناشی از ترکیباتی مانند سولفورهای موجود در هوا، جنس آب‌بند و سرعت محور دوار ماشین‌آلات مورد توجه قرار گیرند. به‌طور کلی، برای دستیابی به

آب‌بندها از جمله وسایل مکانیکی است که به‌منظور جلوگیری از نشت سیالات از سیستم‌های محصورکننده آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. گاهی به جای اصطلاح آب‌بند، واژه‌ی نشت‌بند نیز به کار می‌رود. این تجهیزات علاوه بر ممانعت از خروج مواد، از نفوذ ذرات خارجی به درون مخازن یا سیستم‌های لوله‌کشی بسته نیز جلوگیری می‌کنند. آب‌بندهای بهینه به گونه‌ای طراحی می‌شوند تا حداقل نشتی و همراه با کمترین مقدار اصطکاک و سایش را ایجاد کنند [۱]. با توجه

How to Cite this Article:

[1] M. Morshedzadeh, M. Sheikhi Azgandi, and S. E. Hosseini, "Investigation of effective parameters in the sealing system of rotating shaft packings based on operational conditions," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 125-146, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.518949.1126> (in Persian)



©2025 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند. این مواد در مکانیک صنایع می‌تواند به‌عنوان آب‌بند هوشمند مورد استفاده قرار گیرد. ویژگی‌های منحصر به فردی مانند زیست‌سازگاری، پاسخ به محرک‌ها و هزینه‌های پایین، هیدروژل‌ها را به ماده‌ای کلیدی در فناوری‌های نوین تبدیل کرده است [۵-۷]. مرشدزاده و شیخی به‌کارگیری هیدروژل‌ها به‌عنوان آب‌بند را مورد توجه قرار داده‌اند [۸]. بر اساس بررسی انجام‌شده توسط آن‌ها هیدروژل‌های هوشمند به دلیل توانایی جذب و نگهداری آب، پاسخگویی به محرک‌های محیطی مانند دما، pH یا تنش مکانیکی و خاصیت خودترمیمی، گزینه‌ای نوین برای آب‌بندی در صنایع مختلف محسوب می‌شوند. در صنعت، این مواد می‌توانند به‌عنوان درزگیرهای پیشرفته در زیرساخت‌های هیدرولیکی، تونل‌ها، سازه‌های بتنی و خطوط انتقال آب و نفت به کار روند. استفاده از هیدروژل‌های هوشمند باعث کاهش مصرف آب، افزایش دوام سازه‌ها و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. پژوهش‌های اخیر بر توسعه فرمولاسیون‌های پایدارتر و تقویت ویژگی‌های مکانیکی این مواد برای افزایش عملکرد در شرایط صنعتی متمرکز شده‌اند. در شبیه‌سازی انجام‌شده بر روی آب‌بندی هیدروژل‌ها، این موضوع مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله بیانگر این است که در صورت استفاده از هیدروژل‌های هوشمند محرک به رطوبت می‌توان در ماشین‌آلات و سازه‌ها به‌عنوان آب‌بند با درصد بالای آب‌بندی استفاده نمود [۸].

آب‌بندهای مکانیکی نمونه‌ای از آب‌بندهای پرکاربرد در صنایع است. آب‌بندهای مکانیکی از اجزای حیاتی در صنایع مختلف محسوب می‌شوند که وظیفه‌ی اصلی آن‌ها جلوگیری از نشت سیالات در تجهیزات دوار مانند پمپ‌ها، میکسرها و توربین‌ها است. این آب‌بندها متشکل از دو حلقه‌ی اولیه چرخان و ثانویه ثابت است که با ایجاد لایه‌ی نازکی از روان‌کار بین سطوح تماس، اصطکاک و سایش را کاهش می‌دهند. عملکرد آن‌ها مبتنی بر تعادل نیروهای هیدروستاتیکی و هیدرواستاتیکی است که تحت تأثیر عواملی مانند سرعت چرخش، فشار سیال و زبری سطح قرار می‌گیرد. عملکرد صحیح آب‌بندها با روش‌های تحلیلی، شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است تا اطمینان حاصل شود که آب‌بند از طول عمر بالا، نشت کم و مقاومت در برابر خوردگی برخوردار است [۹-۱۱]. با توجه به کاهش اصطکاک و کم‌کردن فرسایش در آب‌بندهای مکانیکی تاکی‌هیارا و همکاران در پژوهش مطالعه آب‌بند مکانیکی ساخته‌شده با چاپ سه‌بعدی با طراحی آب‌بند خاص و ایجاد شیپرها و حفره‌های داخلی، توزیع فشار

را حل فنی و مطمئن در آب‌بندی^۱ سیستم‌های مکانیکی، شناخت دقیق مسئله آب‌بندی و انتخاب نوع آب‌بند مناسب که به‌صورت پیوسته در صنعت در دسترس باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین تعیین مقدار نشتی مجاز در سیستم مکانیکی که باید کاهش یابد، حائز اهمیت است؛ زیرا جلوگیری کامل از نشتی و رساندن آن به صفر در عمل غیرواقعی است. با توجه به پیشرفت صنعت مکانیک در زمینه آب‌بندها و کاربردهای آن، تحقیق و توسعه در زمینه به‌کارگیری آب‌بندهای جدید در صنایع مختلف، تغییرات گسترده‌ای ایجاد کرده است. این پیشرفت‌ها عاملی مؤثر در ارتقای سطح کیفی نشت‌گیری شافت‌های چرخشی موتورها و پمپ‌ها و همچنین بهبود عملکرد پیستون‌های دارای حرکت رفت و برگشتی بوده‌اند. نمونه‌ای از این پیشرفت در این صنایع، در آب‌بندهای سیال مغناطیسی مشاهده می‌شود. آب‌بندهای مغناطیسی مبتنی بر فروسیال، به‌عنوان فناوری پیشرفته در حوزه‌ی آب‌بندی بدون تماس مکانیکی، به‌دلیل مزایایی نظیر اصطکاک ناچیز، آب‌بندی نشت‌ناپذیر و عمر کاری طولانی، جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف یافته‌اند. این آب‌بندها با بهره‌گیری از خواص منحصر به فرد فروسیال‌ها (مایعات مغناطیسی) قادر به ایجاد سدهای فشارپذیر تحت میدان مغناطیسی است و در محیط‌های گازی و خلأ به‌طور گسترده استفاده می‌شوند. با این حال، کاربرد آن‌ها در آب‌بندی مایعات به‌دلیل چالش‌هایی مانند تخریب تدریجی فروسیال در تماس دینامیکی با مایع، افزایش دمای عملیاتی و ناپایداری هیدرودینامیکی در سرعت‌های بالا، محدود شده است. پژوهش‌های اخیر بر طراحی ساختارهای ترکیبی مانند ادغام آب‌بندهای مغناطیسی با آب‌بندهای گریز از مرکز و سیستم‌های تجدیدپذیری فروسیال متمرکز شده‌اند تا با جایگزینی مداوم فروسیال تخریب‌شده، عمر مفید آب‌بند را به‌صورت نظری بی‌نهایت افزایش دهند. همچنین، بهینه‌سازی پارامترهای ساختاری مانند ابعاد شکاف آب‌بند، جنس مواد مغناطیسی و پیکربندی میدان مغناطیسی، نقش کلیدی در بهبود فشارپذیری و پایداری این سیستم‌ها در محیط‌های مایع ایفا می‌کند. این پیشرفت‌ها زمینه‌ساز استفاده از آب‌بندهای مغناطیسی در کاربردهای حساسی مانند پمپ‌های خون مصنوعی، شفت‌های پروانه‌ی کشتی‌ها و سیستم‌های هیدرولیک فشار بالا شده است [۲-۴].

در بحث آب‌بندی نکته‌ی دیگر، توجه خاص به مواد هوشمند و استفاده از آن‌ها به‌عنوان آب‌بند است. هیدروژل‌ها نمونه‌ای از این مواد می‌باشد. هیدروژل‌ها به‌عنوان شبکه‌های پلیمری سه‌بعدی و جاذب آب،

¹ Seals

نشستی و هزینه‌های به‌مراتب پایین‌تر نسبت به آببندهای غیرتماسی می‌شوند.

۲- انواع آببندها

آببندها با توجه به کاربردشان دارای طرح‌های متفاوتی است. بر این اساس چندین طبقه‌بندی برای آببندها در منابع مختلف وجود دارد که خلاصه‌ای از آن در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۴]. به‌طور کلی، آببندها به دو دسته اصلی آببندهای استاتیکی^۲ و آببندهای دینامیکی^۳ تقسیم می‌شوند.

۲-۱- آببندهای استاتیکی

این آببندها در محل‌های آببندی ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرند. واشرها و اورینگ‌ها نمونه‌ای از این نوع آببندها است.

۲-۲- آببندهای دینامیکی

در صورتی که سطوح نسبت به یکدیگر در حال حرکت باشند، از این نوع آببند استفاده می‌شود. این آببندها زمانی به کار می‌روند که یک محور با حرکت رفت‌و برگشتی یا دورانی، نیرو را از میان دیواره‌ی پمپ، مخازن یا در کشتی‌ها از طریق دیواره بالکهد^۴ انتقال می‌دهد. آببندهای دینامیکی را می‌توان به دو دسته آببند تماسی و آببند غیرتماسی^۵ تقسیم نمود.

۲-۲-۱- آببند تماسی

در آببندهای تماسی، سطوحی که وظیفه‌ی آببندی را بر عهده دارند، تحت فشار مکانیکی با یکدیگر تماس مستقیم پیدا می‌کنند. بیشتر آببندهای دینامیکی مانند آببندهای مکانیکی از نوع تماسی است؛ باین‌حال، برای کاهش اصطکاک و سایش بین سطوح، یک لایه نازک از روغن یا سیال خنک‌کاری به‌صورت پیوسته بین آن‌ها تزریق می‌شود. این نوع آببندها را عموماً بر اساس مکانیزم عملکرد به دو دسته اصلی، فشاری^۶ و مکانیکی^۷ تقسیم می‌کنند. در آببندهای فشاری مانند پکینگ‌ها، آببندی در اثر فشار شعاعی بین محور و محفظه و از طریق بوش آببندی انجام می‌شود [۱۴].

۲-۲-۲- آببند غیرتماسی

سطوح آببندی در این نوع از آببندها به‌صورت مستقیم با یکدیگر تماس نیستند. آببندهای غیرتماسی عمدتاً در شرایط عملیاتی با

هیدرواستاتیک را بهینه‌سازی کردند. این آببند مکانیکی به‌طور همزمان در شرایط فشار پایین و فشار بالا عملکردی پایدار دارد و سایش سطوح را کاهش می‌دهد [۱۲]. مدجاهد و همکاران در پژوهشی دیگر با عنوان شبیه‌سازی ورود هوا در آببند شیاردار مارپیچی نشان دادند که در حین راه‌اندازی، افزایش سرعت چرخش یا کاهش اختلاف فشار، باعث مکش هوای بیشتر به داخل آببند شده و اصطکاک را تا ۵۰ درصد کم می‌کند. این یافته‌ها با ترکیب فناوری‌های نوین مانند چاپ سه‌بعدی و مدل‌سازی دینامیکی، راهکارهایی کاربردی برای طراحی آببندهای کارآمد در صنایع ارائه می‌دهند [۱۳].

با توجه به اهمیت کاهش هزینه‌ها در تولید آببندها، پکینگ‌ها به‌عنوان یکی از انواع آببندهای دینامیکی تماسی، جایگاه ویژه‌ای در صنعت دارند. این قطعات با قابلیت ساخت از مواد مختلف مانند گرافیت، تفلون و الیاف پلیمری، به‌طور گسترده در سیستم‌های تحت فشار و دماهای متنوع به کار می‌روند. الیاف مورد استفاده در پکینگ‌ها شامل کربن، گرافیت و ترکیباتی نظیر لاستیک‌های طبیعی، مصنوعی و تفلون و مواد نسوز است. در گذشته، از الیاف طبیعی قدیمی که به دور شفت پیچیده می‌شدند، برای پر کردن حفره‌ها و شکاف‌های داخلی استفاده می‌شد و تا حدی از خروج سیال جلوگیری می‌کرد؛ اما امروزه با پیشرفت‌های صنعتی، از مواد پیچیده‌تری استفاده شده است که اصطکاک بین پکینگ و شفت را کاهش می‌دهند و در برابر دمای بالا مقاومت بیشتری دارند. تنوع جنس الیاف و هزینه‌ی مقرون‌به‌صرفه‌ی ساخت پکینگ‌ها، باعث شده است تا این نوع آببندها در کاربردهای متنوع و محیط‌های سیالی گوناگون مورد توجه قرار گیرند.

در این تحقیق، عملکرد آببندهای تماسی^۱ نوع پکینگ مورد بررسی قرار گرفته شده است. بر اساس بررسی که توسط نویسندگان انجام گرفت تاکنون به‌صورت جامع و کاربردی معیارهای مهم در طراحی آببند پکینگ بررسی نشده است. در این مقاله سعی شده است که معیارهای طراحی به‌صورت عملیاتی ارائه شود. ساختار داخلی این آببندها، اعمال تغییرات در طراحی قطعات، استفاده از مواد پیشرفته در نوارهای پکینگ و به‌کارگیری ساختار آببندهای غیرتماسی در پکینگ‌ها، از جمله عواملی است که به بهینه‌سازی این تجهیزات کمک می‌کنند. این بهبودها منجر به افزایش کارایی، کاهش

⁵ Non-Contact Seals

⁶ Compression Seals

⁷ Pressure-Energized Seals

¹ Contact Seals

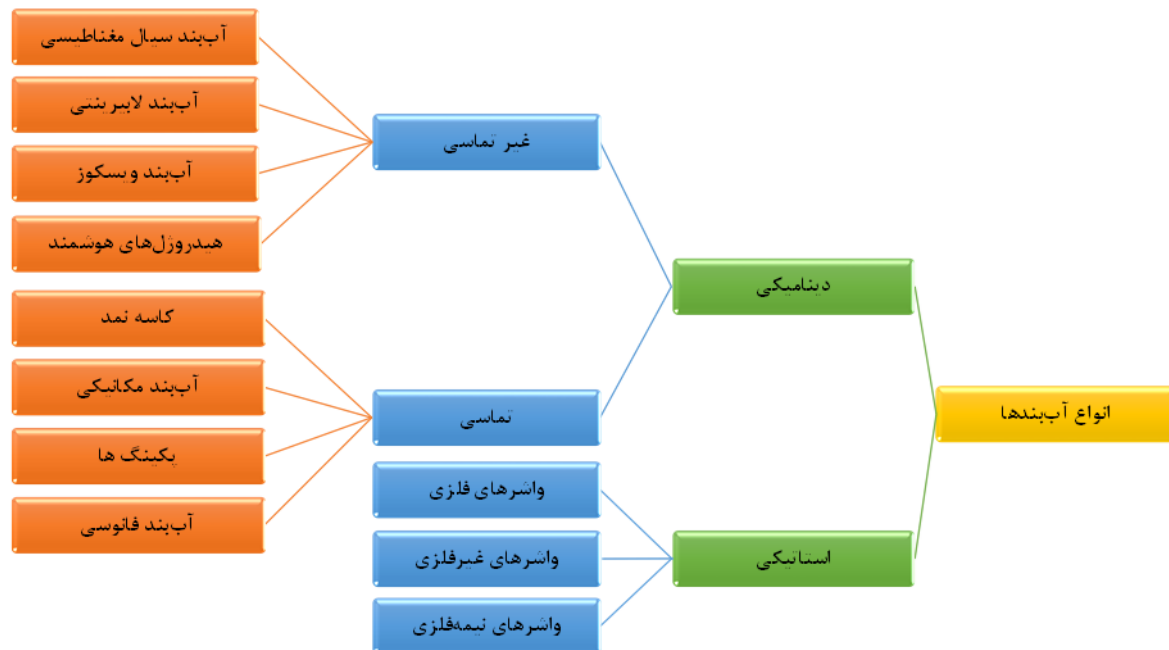
² Static Seal

³ Dynamic Seal

⁴ Bulkhead

استفاده می‌شود تا تماس مستقیم سطوح حذف شده و عملکرد سیستم بهبود یابد [۱۴].

سرعت‌های بالا و افزایش فشار مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌منظور کاهش نشت بین سطوح، از مایعات خنک‌کاری نظیر روغن یا آب



شکل ۱: تقسیم‌بندی آببندها بر اساس نوع عملکرد [۱۴]

• گلند^۲: محفظه‌ای استوانه‌ای شکل که از طریق اعمال فشار کنترل شده توسط پیچ‌های تنظیم‌کننده، باعث فشرده‌شدن لایه‌های آببند حول محور شفت می‌گردد. این مکانیزم موجب افزایش چگالی اتصال و در نتیجه بهبود عملکرد آببندی سیستم می‌شود.

• پکینگ: مجموعه‌ای از لایه‌های متراکم‌شونده متشکل از الیاف طبیعی نسوز یا پلیمرهای مصنوعی است که با اعمال فشار مناسب بر سطح شفت، یک سد نفوذناپذیر در برابر انتقال سیال ایجاد می‌نماید. هندسه و آرایش این لایه‌ها بسته به شرایط عملیاتی قابل تغییر است.

• حلقه فانوسی^۳: محفظه‌ای حلقوی که به‌عنوان کانال تزریق طراحی شده است و دو عملکرد اصلی دارد.
- تزریق روان‌ساز به‌منظور کاهش اصطکاک بین سطوح
- تزریق سیال خنک‌کننده برای کنترل دمای مجموعه پکینگ‌ها در شرایط کاری دشوار [۱۵].

در شکل ۲ اجزای تشکیل‌دهنده سیستم آببند پکینگ ارائه شده است.

۳- آببند پکینگ فشاری^۱

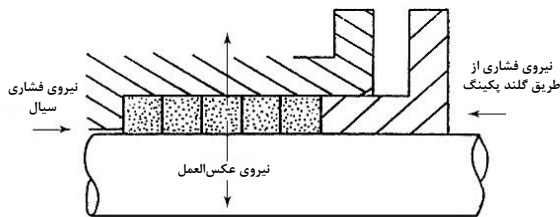
آببند مورد مطالعه در این پژوهش از نوع آببندهای تماسی فشاری است که با عنوان پکینگ شناخته شده است. سابقه استفاده از این فناوری به دوران آغازین انقلاب صنعتی باز می‌گردد. اگرچه بسیاری از متخصصان، پکینگ‌ها را فناوری‌هایی منسوخ تلقی می‌کنند، اما پیشرفت‌های مستمر در زمینه مواد مورد استفاده، کارایی این نوع آببندها را برای کاربردهای صنعتی مانند شیرآلات و پمپ‌ها به میزان قابل توجهی ارتقا داده است. این بهبودها باعث شده‌اند که پکینگ‌های فشاری هنوز هم به‌عنوان یکی از روش‌های متداول، مقرون‌به‌صرفه و قابل اعتماد در سیستم‌های آببندی مورد استفاده قرار گیرند. مکانیزم عملکرد این آببندها مبتنی بر استفاده از مجموعه‌ای از حلقه‌های ساخته‌شده از مواد انعطاف‌پذیر و نرم است. با توجه به این ویژگی ساختاری، اصطلاح پکینگ‌های فشاری توصیف دقیق‌تری برای این نوع آببندها محسوب می‌شود. سیستم آببندی پکینگ از چند جز اصلی به شرح زیر تشکیل شده است.

³ Lantern Ring

¹ Pressure Packing

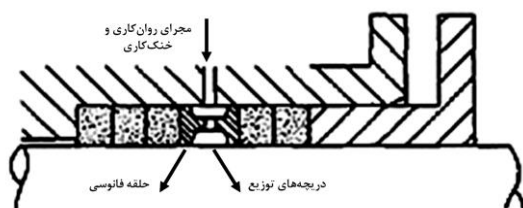
² Gland

پکینگ‌ها بسته به نوع کاربرد ممکن است تفاوت‌های اساسی داشته باشد. به‌عنوان مثال، در محورهای با سرعت دورانی بالا که کاهش سایش ناشی از اصطکاک از اولویت‌های طراحی محسوب می‌شود، با اعمال نیروی کنترل‌شده بر گلند پکینگ و کاهش فشار تماسی، آب‌بندی در بیشتر موارد از طریق ایجاد گرادیان فشار معکوس در سیال حاصل می‌گردد [۱۷].

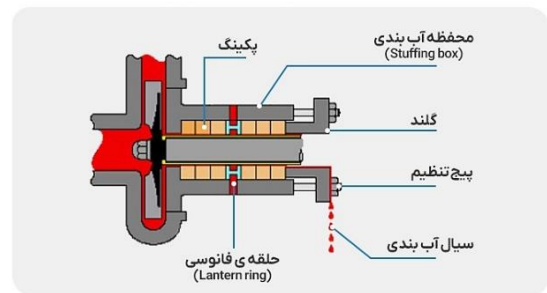


شکل ۳: مقاطع برش خورده یک آب‌بند تماسی پکینگ با پنج لایه [۱۷]

در سیستم‌های آب‌بندی پکینگی، برای افزایش چگالی و کنترل دمای عملیاتی، از پکینگ‌های آغشته به مواد روان‌کار ویژه استفاده می‌شود. این مواد تحت تأثیر دو عامل اصلی فشردگی مکانیکی ناشی از اعمال نیرو توسط گلند پکینگ و گرمایش حاصل از اصطکاک دینامیکی در حین چرخش شفت فعال می‌گردند. در صورت عدم کنترل دقیق این پارامترها، کاهش حجم مؤثر آب‌بند، افت کارایی سیستم آب‌بندی و افزایش نرخ نشت سیال مشاهده می‌شود. برای بهینه‌سازی عملکرد، اعمال نیروی فشاری محوری باید به دقت کنترل گردد به‌گونه‌ای که ضمن رسیدن به مقدار نشت مجاز، از اعمال بار بیش‌ازحد جلوگیری شود. هم‌زمان، روان‌کاری مناسب سطوح متحرک نیز باید مدنظر قرار گیرد. در شرایط خاصی مانند نیاز به خنک‌کاری فعال یا وجود محدودیت در روان‌کاری، استفاده از حلقه فانوسی در میان مجموعه پکینگ‌ها توصیه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود این حلقه قابلیت توزیع یکنواخت خنک‌کننده و روان‌کار را دارا بوده و بهتر است در مجاورت پکینگ‌های نزدیک به گلند نصب شود. چرا که این ناحیه تحت تنش‌ها و اصطکاک بیشتری قرار دارد.



شکل ۴: مقاطع برش خورده پکینگ به همراه حلقه فانوسی [۱۷]



شکل ۲: اجزای تشکیل‌دهنده سیستم آب‌بند پکینگ محور [۱۶]

در کاربردهای صنعتی با شرایط عملیاتی سایشی بالا نظیر خطوط انتقال مواد معدنی یا سیستم‌های هیدرولیک در واحدهای تولید لاستیک که پمپ‌ها مستلزم تعمیر و نگهداری دوره‌ای است، آب‌بندی به روش پکینگ همچنان به‌عنوان راهکاری اقتصادی و قابل‌اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرد. پکینگ‌های مورد استفاده در پمپ‌های آتش‌نشانی و تأسیسات صنعتی، از جمله در ساختمان‌ها، سازه‌های فراساحلی، واحدهای فرآوری شیمیایی و پالایشگاه‌های نفت، به دلیل مزایای قابل‌توجه خود مورد تأیید قرار گرفته‌اند. این سیستم‌های آب‌بندی نه تنها امکان تنظیم سریع و آسان را برای شرایط اضطراری فراهم می‌کنند، بلکه با طراحی خاص خود از بروز خرابی‌های ناگهانی جلوگیری می‌نمایند. یکی از برجسته‌ترین مزایای این سیستم در مقایسه با آب‌بندهای مکانیکی، سهولت تعویض آن‌ها بدون نیاز به جداسازی کامل تجهیزات است. در عمل، با شل کردن ساده گلند پکینگ می‌توان حلقه‌های فرسوده را خارج نموده و پکینگ‌های جدید را جایگزین کرد. این فرایند به‌طور چشمگیری زمان و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش می‌دهد. این ویژگی‌ها به همراه قابلیت اطمینان بالا، پکینگ‌ها را به گزینه‌ای مطلوب در بسیاری از کاربردهای صنعتی تبدیل کرده است [۱۵].

۳-۱- روش عملکرد

در سیستم‌های آب‌بندی مبتنی بر پکینگ، همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، از چیدمان چندین لایه که در بیشتر موارد چهار تا پنج لایه پکینگ به‌صورت فشرده در فضای اختصاص‌یافته برای آب‌بندی استفاده می‌شود. در حالت اولیه و پیش از اعمال فشار توسط گلند پکینگ، لایه‌ها به‌راحتی در محل خود قرار می‌گیرند. با اعمال نیروی مکانیکی از طریق سفت کردن گلند پکینگ، فشار محوری لازم برای فشردگی لایه‌ها ایجاد می‌شود که این امر موجب تشکیل سد نفوذناپذیر حول شفت می‌گردد. میزان بهینه این فشردگی تابعی از دو عامل اصلی شامل شرایط عملیاتی سیستم آب‌بندی و خواص فیزیکی و شیمیایی مواد تشکیل‌دهنده پکینگ‌ها است. مکانیسم عملکرد

در لامینه‌سازی لایه‌های مقاوم به سیال روی سطح آب‌بند ایجاد می‌شود تا از نفوذ سیال و رطوبت به داخل سازه یا سطح مورد نظر جلوگیری کند. لامینه‌سازی با ترکیب لایه‌های پارچه آغشته به لاستیک و فشرده‌سازی بین صفحات داغ، مواد کامپوزیتی انعطاف‌پذیر تولید می‌شوند. این لایه‌ها پس از برش به نوارهای مربعی یا مستطیلی تبدیل شده و با روان‌سازها پوشانده می‌شوند. اکستروژن نیز با ذوب موادی مانند پودر الیاف پلی‌تترافلوئورو اتیلن و گرافیت در دمای بالا و عبور از قالب، نوارهای متراکم و مقاوم در برابر نشت گاز ایجاد می‌نماید. هر روش با توجه به نوع مواد، فشار، دما و الزامات صنعتی، برای کاربردهای خاصی نظیر آب‌بندی شفت‌های فرسوده یا محیط‌های خورنده بهینه‌سازی می‌شود [۱۶].

۳-۳- فشار تماس در آب‌بند پکینگ

در این بخش، تغییرات استاتیکی پکینگ‌ها با جزئیات تحلیل گردیده است. در شرایطی که گلند پکینگ به صورت مناسب سفت و تنظیم شده باشد، توزیع مناسب نیروهای فشاری بر روی آب‌بند ایجاد می‌شود. با سفت شدن محفظه آب‌بند، یک نیروی محوری اعمال می‌گردد که منجر به ایجاد فشار گلندی^۱ می‌شود. در این بخش به تغییرات استاتیکی پکینگ‌ها با جزئیات پرداخته شده است. شکل ۷ نیروهای فشاری را در زمان سفت بودن گلند پکینگ بر روی آب‌بند نشان می‌دهد. در صورت سفت شدن محفظه آب‌بند نیروی محوری F_g اعمال می‌گردد که باعث ایجاد فشار گلند می‌شود [۱۸]. فشار گلندی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

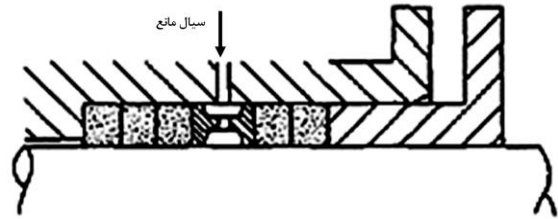
$$P_g = F_g / A \quad (1)$$

که در آن P_g فشار گلند، F_g نیروی محوری و A مساحت حلقه آب‌بند است. مساحت حلقه آب‌بند از رابطه (۲) به دست می‌آید

$$A = \pi(D^2 - d^2)/4 \quad (2)$$

که در آن D قطر محفظه آب‌بندی و d قطر شافت است. با فرض این‌که در ابتدا آب‌بند دقیقاً با محفظه‌ی آب‌بند هم‌خوانی دارد و در تماس است، اگر ماده آب‌بند غیرقابل فشرده در نظر گرفته شود، تنش محوری موضعی P_a بین آب‌بند و شفت برابر با تنش شعاعی موضعی P در ماده‌ی آب‌بند است. با این حال، یک حلقه‌ی آب‌بند واقعی دارای سطح زبر و قابلیت فشرده‌گی است؛ بنابراین، تنش شعاعی موضعی

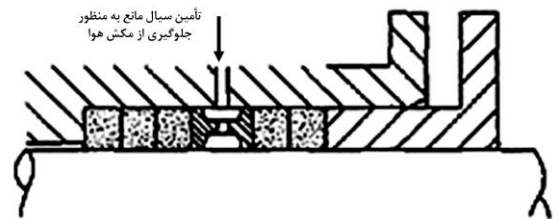
همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است در محیط‌های حساس نظیر فضاهای سمی که نیاز به آب‌بندی کامل وجود دارد، حلقه فانوسی می‌تواند با تزریق مایعی تحت فشار ۰/۵ تا یک بار بالاتر از فشار سیستم، عملکرد مطمئن‌تری ارائه نماید [۱۷].



شکل ۵: ورود مایع از حلقه فانوسی برای ایجاد مانع جهت ورود مایع سمی [۱۷]

همچنین در شرایط کارکرد تحت خلأ یا فشار منفی، با توجه به جزئیات شکل ۶ این حلقه قادر است با ایجاد سد سیالی مناسب از ورود هوا به ناحیه آب‌بند جلوگیری کند [۱۷].

نکته حائز اهمیت در طراحی و بهره‌برداری از این سیستم‌ها، پایش مستمر پارامترهای عملیاتی شامل دمای کارکرد، نرخ نشت و کیفیت توزیع روان‌کار بوده که با رعایت این اصول و کنترل دقیق پارامترهای مؤثر، می‌توان به عملکرد بهینه سیستم‌های آب‌بندی پکینگ دست یافت.



شکل ۶: ورود هوا از حلقه فانوسی آب‌بند در پمپ‌ها با وجود مکش [۱۷]

۳-۲- فرایند تولید و فرم دهی پکینگ‌ها

روش‌های اصلی تولید آب‌بندهای فشاری شامل بافت، قالب‌گیری ثابت، قالب‌گیری، لامینه‌سازی و اکستروژن است. در روش بافت، الیاف با استفاده از ماشین‌های ویژه و عبور بوبین‌ها از مسیرهای درهم‌تنیده، به اشکال مربعی، مستطیلی یا استوانه‌ای تبدیل می‌شوند. قالب‌گیری ثابت با بهره‌گیری از قالب‌های فولادی مقاوم (شامل هسته، هل‌دهنده، پوسته و پایه) و فشار هیدرولیکی، مواد را به چگالی و ابعاد دقیق می‌رساند. قالب‌گیری معمولی نیز مشابه قالب‌گیری ثابت عمل می‌کند، اما ممکن است از گرما یا خشک کردن به جای فشار استفاده شود.

¹ Gland Pressure

$$F = \mu_1 \cdot K \cdot P_a \quad (۴)$$

$$F = \mu_2 \cdot K \cdot P_a \quad (۵)$$

در روابط فوق، μ_1 ضریب اصطکاک شفت/آببند، K نسبت تنش جانبی و P_a تنش محوری موضعی و μ_2 ضریب اصطکاک محفظه آببند/آببند را نشان می‌دهد. شرط تعادل به وجود آمده را می‌توان به صورت رابطه ۶ نوشت.

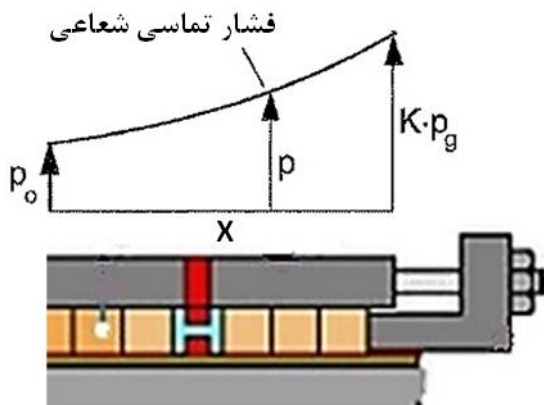
$$dp \cdot t = K \cdot P_a (\mu_1 + \mu_2) dx \quad (۶)$$

که t بیانگر ضخامت شعاعی آببند پکینگ است. با انتگرال‌گیری، میزان تغییرات تنش تماس در طول سطح آببند طبق رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$P = K \cdot P_g \cdot e^{\frac{-(\mu_1 + \mu_2) K x}{t}} \quad (۷)$$

همان‌طور که در نمودار شکل ۸ نمایش داده شده است، تنش تماسی در نزدیک گلند پکینگ به بیشترین مقدار خود رسیده و هر چه به سمت انتهای پایینی محفظه‌ی آببند نزدیک‌تر می‌شود، به صورت نمایی کاهش می‌یابد. در هنگام چرخش میل محور، اصطکاک تنها بین آببند و دیواره‌ی محفظه‌ی آببند اعمال می‌شود و در نتیجه اصطکاک محوری میل محور از بین می‌رود [۱۹]. با توجه به این حالت، تغییرات فشار تماسی به صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود.

$$P = K \cdot P_g \cdot e^{-\mu k x / t} \quad (۸)$$



شکل ۸: توزیع فشردگی و آببندی در طول پکینگ [۱۹]

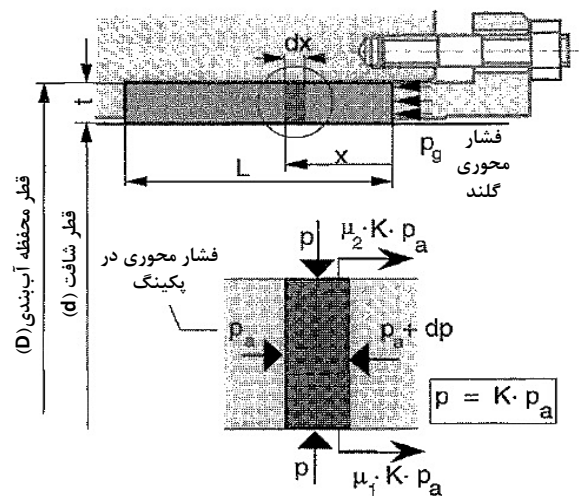
۳-۴- فشار تماسی در آببند پکینگ

در صورتی که میزان تنش گلند P_g بیشتر از فشار سیال P_f باشد، توزیع فشار سیال در طول آببندی به صورت خطی بوده و اثر فشار سیال بر

P در واقع کمتر از تنش محوری موضعی P_a است. این موضوع را با رابطه (۳) نمایش می‌دهند.

$$P = K \cdot P_a \quad (۳)$$

که در آن P_a تنش محوری موضعی، P تنش شعاعی موضعی و K نسبت تنش جانبی است. مقدار نسبت تنش جانبی کمتر از یک است و به روان‌کاری، بافت، نوع آببند و تا حدودی به میزان P_a بستگی دارد. نسبت تنش جانبی در پکینگ‌ها با الیاف مختلف متفاوت است که این نسبت در آزمایشگاه‌ها مورد بررسی و سنجش قرار می‌گیرد. به طور مثال در یک پکینگ بافته‌شده با الیاف پلی تترا فلورو اتیلن، نسبت تنش جانبی K برابر با ۰/۴ و همچنین ضریب اصطکاک برابر با ۰/۱۵ محاسبه شده است [۱۹]. زمانی که پیچ‌های گلند به صورت یکنواخت سفت شوند، آببند پکینگ به طور کامل فشرده می‌شود. میزان این فشردگی با وجود نیروی اصطکاک بین شفت و دیواره در راستای محور، متفاوت است. میزان فشردگی در دورترین نقطه از گلند، مقدار کمتری دارد که این حالت را با فرض یکسان بودن جنس پکینگ‌ها و مستقل بودن نسبت تنش جانبی K از میزان فشردگی، می‌توان مدل‌سازی نمود. با در نظر گرفتن این موضوع که تنش محوری P_a در آببند در فاصله X از گلند قرار دارد، با توجه به فرض مستقل بودن نسبت تنش جانبی K از میزان فشردگی، تنش تماس شعاعی P از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. هنگامی که گلند سفت می‌شود، یک المان از آببند پکینگ به اندازه dx در راستای محور جابه‌جا شده و اختلاف تنش محوری dp در سراسر این المان یکسان است [۱۹].



شکل ۷: فشار تماسی پس از سفت کردن گلند پکینگ [۱۹]

نیروهای اصطکاک سطحی با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۵ قابل محاسبه است.

در نمودار شکل ۱۰، محور عمودی درصد فشار گلند و محور افقی تعداد حلقه‌های پکینگ را نمایش می‌دهد که حلقه‌ی شماره ۱، نزدیک‌ترین حلقه به گلند است. از این نمودار دو نکته مهم می‌توان برداشت کرد. نکته اول این است که با افزایش مقدار نسبت تنش جانبی، درصد فشار گلند به حلقه‌های پکینگ نزدیک به گلند افزایش می‌یابد و میزان فرسایش در شافت نیز بیشتر می‌شود. علاوه بر این درصد فشار به حلقه‌هایی با فاصله بیشتر از گلند کمتر می‌شود که این موضوع بیانگر این است که میزان سایش در محل نزدیک به گلند بر روی شافت بیشتر است.

۳-۶- سهم فشار وارده به هر حلقه از پکینگ‌ها

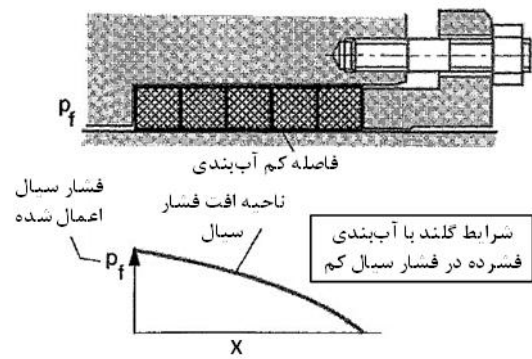
در این مرحله، تجزیه و تحلیل فشار وارده بر هر حلقه از پکینگ‌ها انجام شده است. در آببندهای پکینگی، هر چه توزیع فشار بین حلقه‌های ابتدایی و انتهایی یکنواخت‌تر باشد، نشان‌دهنده توزیع متعادل فشار در پکینگ‌ها است [۲۱]. در جدول ۱ درصد فشار وارد به هر حلقه پکینگ برای نسبت تنش ۰/۴ و ضریب اصطکاک ۰/۳ ارائه شده است.

بر اساس داده‌های جدول ۱، چهار نکته زیر را می‌توان گرفت. نتیجه اول این است که با افزایش تعداد حلقه‌های پکینگ، توزیع یکنواخت فشار قابل تحمل توسط پکینگ‌ها کاهش یافته و موجب افزایش هزینه و کاهش کارایی سیستم می‌شود. نکته دوم این‌که افزایش تعداد حلقه‌های پکینگ بیش از حد مجاز، تأثیر قابل توجهی بر بهبود آببندی ندارد. این موضوع در پکینگ‌های ۶، ۷ و ۸ حلقه‌ای مشاهده می‌شود که درصد فشار وارد شده بر حلقه‌ها تقریباً یکسان است؛ بنابراین، استفاده بیش از ۵ حلقه در عمل تأثیر معناداری بر کاهش فشار وارده به پکینگ‌ها ندارد. سومین مطلب این است که بیشترین فشار بر حلقه‌های ابتدایی وارد می‌شود. به‌عنوان مثال، حتی در صورت استفاده از ۸ حلقه پکینگ، حدود ۵۰ درصد فشار کل به حلقه‌های اول تا سوم وارد شده که نشان‌دهنده تمرکز عملکرد آببندی در حلقه‌های ابتدایی است. نکته انتهایی در این است که در سیستم‌های آببندی، همواره بیشترین سایش در حلقه‌های ابتدایی پکینگ رخ می‌دهد [۲۱].

آببندی ناچیز است. در این حالت، میزان نشت آببند متناسب با افزایش تنش گلند کاهش می‌یابد. این شرایط تنها زمانی قابل ایجاد است که فشار سیال در بازه‌ی ۱۵ تا ۲۵ بار قرار داشته باشد. این دامنه، محدوده‌ی عملکردی بیشتر آببندهای پمپ محسوب می‌شود. در شکل ۹ نحوه تغییرات فشار گلند در طول آببندی نشان داده شده است [۲۰].

۳-۵- درصد فشار وارده به حلقه‌های پکینگ

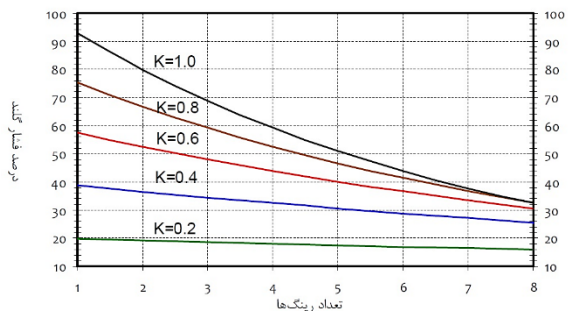
اگر در آببند پکینگ، ضریب اصطکاک برابر ۰/۱۵، نسبت تنش جانبی برابر با ۰/۴ و شکل هندسی پکینگ مربع ۱×۱ سانتی‌متر مربع فرض شود، با استفاده از رابطه ۸ می‌توان درصد فشار وارده بر اولین حلقه‌ی پکینگ را محاسبه کرد.



شکل ۹: شرایط گلند سفت شده و کاهش نشتی [۲۰]

$$P = K \cdot P_g \cdot e^{-\mu k x / t} \quad (8)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اولین حلقه پکینگ، فشار تماسی شعاعی برابر ۳۷/۷ درصد فشار گلند است. این مقدار در دومین حلقه پکینگ به ۳۵/۵ درصد فشار گلند کاهش می‌یابد. شکل ۱۰، درصد فشار وارده به پکینگ‌های مختلف با ضرایب سختی متفاوت و ضریب اصطکاک ثابت ۰/۱۵ را نشان می‌دهد [۲۱].



شکل ۱۰: درصد فشار وارده به پکینگ‌های مختلف با ضرایب نسبت تنش متفاوت و ضریب اصطکاک ثابت ۰/۱۵ [۲۱]

جدول ۱: درصد فشار وارده به هر حلقه پکینگ به ازای نسبت تنش جانبی ۰/۴ و ضریب اصطکاک ۰/۳ [۲۱]

درصد فشار مورد تحمل در هر یک از حلقه‌های پکینگ								
تعداد رینگ	حلقه اول	حلقه دوم	حلقه سوم	حلقه چهارم	حلقه پنجم	حلقه ششم	حلقه هفتم	حلقه هشتم
۱	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	-
۲	۵۲/۹۹	۴۷/۰۱	-	-	-	-	-	-
۳	۳۶/۶۷	۳۲/۵۳	۲۸/۸۵	-	-	-	-	-
۴	۲۹/۲۰	۲۵/۹۰	۲۲/۹۷	۲۰/۳۸	-	-	-	-
۵	۲۴/۷۳	۲۱/۹۴	۱۹/۴۶	۱۷/۲۶	۱۵/۳۰	-	-	-
۶	۲۱/۷۸	۱۹/۳۱	۱۷/۱۳	۱۵/۲۰	۱۳/۴۷	۱۱/۹۵	-	-
۷	۱۹/۶۹	۱۷/۴۶	۱۵/۴۹	۱۳/۷۴	۱۲/۱۸	۱۰/۸۱	۹/۵۷	-
۸	۱۸/۱۵	۱۶/۱۰	۱۴/۲۸	۱۲/۶۶	۱۱/۲۳	۹/۹۶	۸/۸۳	۷/۸۳

۳-۷- نرخ نشت آب‌بندهای پکینگ

نشت در آب‌بندهای پکینگ مستلزم تنظیمات دقیق مهندسی است. مطابق دستورالعمل‌های استاندارد نصب پکینگ در پمپ‌های آب، حداکثر نرخ نشتی مجاز به صورت دقیق تعیین شده است. به عنوان نمونه، در پمپ آبی با مشخصات فنی قطر شفت ۴۰ میلی‌متر، فشار کاری ۲۴ بار و سرعت خطی ۱/۷ متر بر ثانیه، سازندگان پکینگ توصیه می‌کنند بار گلند به گونه‌ای تنظیم شود که نرخ نشت به ۳۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت معادل ۲ قطره در ثانیه محدود گردد. باین حال، آزمایش‌های تجربی روی پکینگ‌های تک‌حلقه‌ای نشان داده است که با بهینه‌سازی پارامترهای نصب، می‌توان این مقدار را تا ۱۵ میلی‌لیتر بر ساعت معادل ۱ قطره در هر ۱۵ ثانیه کاهش داد. بر اساس الزامات فنی، کنترل انحراف شفت و همچنین هم‌محورسازی دقیق شفت نسبت به محل عبور آن، از عوامل کلیدی در کاهش نشت محسوب می‌شوند. از سوی دیگر، عواملی مانند یاتاقان‌های فرسوده، طراحی نامتعارف اجزای مکانیکی یا ناهم‌محوری شفت می‌توانند نرخ نشت را به میزان بالایی افزایش دهند. قابل توجه است که پدیده خودترمیمی پکینگ ناشی از توزیع مجدد تنش‌های محوری در طول زمان با سفت نمودن یکنواخت گلند در سرویس‌های دوره‌ای، به کاهش تدریجی نشت منجر می‌شود. افزایش دما، سایش غیریکنواخت پکینگ یا هرگونه خطای هندسی در شفت، چالش‌های جدی در حفظ آب‌بندی به وجود می‌آورد [۱۸].

۴- انتخاب نوع پکینگ بر اساس شرایط عملیاتی

پکینگ‌ها در گونه‌های مختلف و از مواد متفاوتی تولید می‌شوند. رایج‌ترین نوع پکینگ‌ها، نمونه‌های ساخته‌شده از الیاف به هم‌بافته شده است که با استفاده از ماشین‌های بافت ویژه به شکل مربعی تولید

می‌شوند. در این نوع پکینگ‌ها می‌توان از یک نوع الیاف استفاده کرد یا برای بهبود عملکرد آب‌بندی، ترکیبی از چندین الیاف مانند الیاف گرافیت-پلی‌تترافلورواتیلن (PTFE) برای کاهش اصطکاک و افزایش انعطاف‌پذیری و الیاف آرامید برای بهبود استحکام و مقاومت در برابر سایش و حتی نیروی‌های ضربه‌ای را به کار گرفت [۲۲-۲۳]. در شکل ۱۱، نمایی از انواع پکینگ‌های ساخته‌شده از الیاف‌های مورد استفاده در صنعت ارائه شده است [۱۶]. پکینگ‌های فشرده‌شده معمولاً از پلاستیک‌های بدون افزودنی ساخته می‌شوند که انعطاف کمی دارند و عموماً در تأسیسات ساده مانند شیرهای آب سرد استفاده می‌شوند. الیاف پیش از بافت، بسته به نوع کاربرد پکینگ (مانند مصارف غذایی یا آبی)، با روان‌کننده‌های متنوعی روغن‌کاری می‌شوند. نوع دیگری از پکینگ‌ها، پکینگ‌های گرافیتی هستند که با پیچاندن لایه‌های گرافیت در قالب و سپس فشرده‌سازی آن‌ها تولید می‌گردند. پکینگ‌های استاندارد معمولاً مقطع مربعی شکل دارند. برخی پکینگ‌ها نیز دارای هسته الاستومری سیلیکونی است که مقاومت آب‌بند در برابر ارتعاشات و سطح آب‌بندی را افزایش می‌دهند [۲۴].

مطالعات گسترده‌ای برای بهبود چگالی پکینگ‌های گرافیتی انجام شده است که نشان می‌دهد پارامترهایی مانند انعطاف‌پذیری، سازگاری با محیط و مقاومت در برابر نفوذ گازهای دما بالا ارتباط مستقیمی با چگالی پکینگ دارند. در برخی سیستم‌ها، حلقه‌های پکینگ با چگالی‌های متفاوت به صورت ترکیبی استفاده می‌شوند؛ به طوری که حلقه‌های پرچگال نزدیک به سیال قرار می‌گیرند تا مقاومت در برابر حرارت و فشار بالا را افزایش دهند. حلقه‌های کم‌چگال نزدیک به گلند نصب می‌شوند تا انعطاف‌پذیری و آب‌بندی بهتری فراهم کنند [۲۴].



پکینگ پلیمید با روکش PTFE



پکینگ کربن/گرافیت



پکینگ نسوز آرامید



پکینگ گرافیت پلی تترا فلورو اتیلن



پکینگ مونوفیلامنت با الیاف کربن



پکینگ پنبه نسوز



پکینگ نوولونید با روکش PTFE



پکینگ شیشه با روانساز گرافیت



پکینگ آکریلیک با روانساز گرافیت



پکینگ PTFE با روانساز معدنی



پکینگ فیلامنت با روانساز دولون



پکینگ کتان با روانساز دولون

شکل ۱۱: نمونه‌هایی از پکینگ‌های مورد استفاده در صنعت [۱۶]

۴-۲- پکینگ کتانی

این نوع پکینگ به دلیل تراکم بالا و قابلیت انعطاف‌پذیری مطلوب، عمدتاً در صنایع دریایی و سیستم‌های آب و فاضلاب به‌ویژه در محیط‌های حاوی ذرات معلق مورد استفاده قرار می‌گیرد. الیاف منعطف کتان امکان تنظیم کنترل‌شده محفظه آب‌بندی را نسبت به پکینگ‌های الیاف مصنوعی فراهم می‌کند. این نوع پکینگ از مواد تزریقی مانند میکا یا پلی‌تترافلورو اتیلن و روان‌سازهایی نظیر روغن‌های معدنی، گریس یا چربی حیوانی تشکیل شده‌اند که متناسب با شرایط عملیاتی انتخاب می‌شوند. ویژگی‌های منحصر به فرد این پکینگ، آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای چالش‌برانگیز در صنایع آبی تبدیل کرده است.

در ادامه این بخش، ساختار الیاف و عملکرد پکینگ‌های مورد استفاده در شافت‌های چرخشی مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به جنس الیاف و شرایط عملیاتی، می‌توان مناسب‌ترین نوع پکینگ را انتخاب و به کار گرفت.

۴-۱- پکینگ پنبه‌ای

پکینگ‌های پنبه‌ای عمدتاً در صنایع آبی و دریایی کاربرد دارند. این نوع پکینگ‌ها برای سیالاتی مانند آب سرد ایده‌آل است؛ اما در شرایط خاص برای مایعاتی نظیر روغن نیز قابل استفاده می‌باشند. نصب، تعویض و نگهداری این پکینگ‌ها به‌ویژه در مقایسه با انواع ساخته‌شده از الیاف مصنوعی ساده‌تر است.

۴-۳- پکینگ با الیاف رامیه

الیاف رامیه^۱ در پمپ‌های رفت و برگشتی و شافت‌هایی که نیروهای چرخشی را انتقال می‌دهند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاربرد اصلی آن‌ها در سیستم‌هایی مانند گردش آب شور، محیط‌های حاوی مایعات کریستالی، سیستم‌های دارای ذرات معلق و آب خنک‌کننده است. دلیل اصلی به‌کارگیری این الیاف، دوام بالا و مقاومت چشمگیر در برابر پوسیدگی است. با این حال، محدودیت اصلی این پکینگ‌ها در مقایسه با الیاف مصنوعی، محدوده دمایی و شیمیایی کمتر آن‌ها است که در شرایط عملیاتی خاص ممکن است چالش‌برانگیز باشد.

۴-۴- پکینگ از جنس الیاف آرماتیک-پلیمر

الیاف آرماتیک-پلیمر^۲ (زرد آرامید) از شناخته‌شده‌ترین الیاف مورد استفاده در این نوع پکینگ‌ها است که مهم‌ترین ویژگی آن‌ها مقاومت بالا در برابر سایش است. این ویژگی، باعث کاربرد گسترده‌ی آن‌ها در صنایع مختلفی مانند کاغذ، فرآوری شیمیایی، سیستم‌های فاضلاب و صنایع معدنی به‌ویژه در پمپ‌های رفت و برگشتی و محیط‌های حاوی مواد شیمیایی یا ذرات ساینده شده است. با توجه به سایش بالای این الیاف، استفاده از شافت‌های سخت‌کاری شده برای اکثر پکینگ‌های آرمیدی ضروری است. برای بهبود عملکرد و کاهش فرسایش شافت‌ها، راهکارهایی مانند بهره‌گیری از هسته‌های الاستومری منعطف، ترکیب الیاف آرامید با گرافیت و پلی‌تترافلورواتیلن منبسط‌شده و افزودن روان‌کننده‌ها به کار گرفته می‌شوند. این تغییرات نه تنها عملکرد آبدندی را بهینه می‌کنند، بلکه طول عمر تجهیزات را در محیط‌های چالش‌برانگیز صنعتی افزایش می‌دهند.

۴-۵- پکینگ از جنس الیاف شیشه

به‌منظور افزایش کارایی پکینگ‌های مبتنی بر الیاف شیشه، این نوع پکینگ‌ها با ترکیب الیاف دیگر بهینه‌سازی شده‌اند تا سطح کیفی روان‌کاری آن‌ها در محدوده‌های بالا تثبیت گردد. ترکیب الیاف شیشه با سایر الیاف، سازگاری خصوصیات مکانیکی [۲۵] و همچنین شیمیایی بالایی را در محیط‌های عملیاتی مختلف ایجاد می‌کند؛ هرچند این ویژگی در دماهای بالا (عموماً بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) با محدودیت‌های معناداری همراه است. از سوی دیگر، تنوع در ترکیب الیاف (مانند افزودن گرافیت، پلی‌تترافلورواتیلن یا الیاف آرامید) نه تنها دامنه کاربرد این پکینگ‌ها را در صنایع گوناگون گسترش داده، بلکه با ایجاد لایه‌ای محافظ بین شافت و پکینگ، میزان فرسایش شافت

را کاهش می‌دهد. این بهبود عملکرد، ناشی از توزیع یکنواخت تنش‌های مکانیکی و کاهش اصطکاک دینامیکی در اثر به‌کارگیری روان‌سازهای پیشرفته در ساختار کامپوزیتی پکینگ است [۱۶].

۴-۶- پکینگ از جنس نخ گرافیتی

این پکینگ با برخورداری از مقاومت شیمیایی بالا و تحمل دمایی مطلوب، عمدتاً از طریق فرایند تزریق پودر گرافیت و پلی‌تترافلورواتیلن در نخ‌های گرافیتی تولید می‌شود. با این حال، از جمله محدودیت‌های شاخص این پکینگ‌ها می‌توان به هزینه تولید بالا ناشی از مواد اولیه تخصصی و حساسیت به تنظیمات دقیق محفظه آبدندی اشاره کرد [۲۶].

۴-۷- پکینگ از جنس فویل فلزی

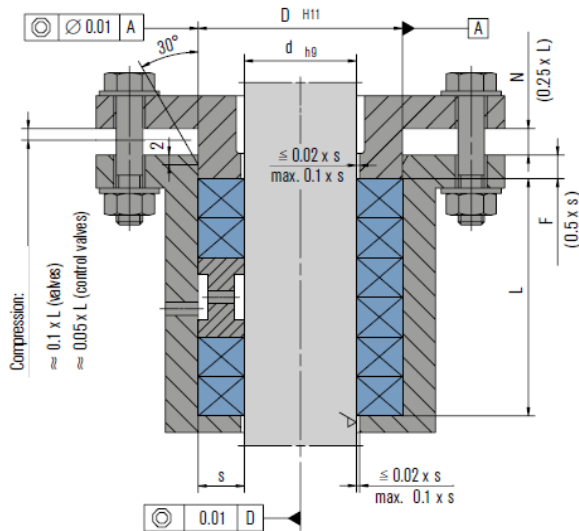
این نمونه از پکینگ‌ها از صفحات فلزی نظیر سرب یا آلومینیوم ساخته می‌شوند و جهت افزایش روان‌کاری، سطح آن‌ها با گرافیت پوشانده می‌شود. برای بهبود انعطاف‌پذیری، این پکینگ‌ها به‌صورت چین‌خورده (پلیسه‌دار) فرم‌دهی شده و حول یک هسته روان‌ساز قرار می‌گیرند. این نوع پکینگ‌ها پیش از رواج آبدن‌های مکانیکی به‌طور گسترده در صنعت نفت مورد استفاده قرار می‌گرفتند [۱].

۵- مراحل انتخاب و آماده‌سازی پکینگ

انتخاب پکینگ آبدندی مناسب به عوامل متعددی از جمله محدوده دمایی، فشار سیستم، نوع سیال (خورنده، ساینده یا خنثی) و سرعت چرخش شافت وابسته است. مواد اولیه با توجه به شرایط عملیاتی انتخاب می‌شوند؛ به‌عنوان نمونه، الیاف آرامید یا کربن در محیط‌های ساینده و گرافیت در دماهای بالا به کار می‌روند [۱۶]. افزودن روان‌سازهایی مانند گرافیت یا روغن سیلیکون به‌عنوان بخشی از فرآیند تولید، اصطکاک و سایش را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. بهینه‌سازی عملکرد این پکینگ‌ها شامل تنظیم گشتاور اولیه در نصب، خنک‌سازی در سرعت‌های بالا و پایش مداوم دما و ارتعاش برای پیشگیری از خرابی زودرس، دستیابی به تعادل میان مقاومت شیمیایی، استحکام مکانیکی و هزینه‌های عملیاتی، نه تنها قابلیت اطمینان سیستم‌های دوار را افزایش می‌دهد، بلکه طول عمر تجهیزات را در صنایع سنگین مانند نفت، گاز و پتروشیمی تضمین می‌کند. جدول ۲ به بررسی انواع پکینگ‌ها و نحوه کاربرد هر یک از آن‌ها می‌پردازد. با استفاده از این جدول می‌توان به اطلاعات مفیدی در راستای طراحی و به‌کارگیری پکینگ‌ها جهت آبدندی در شافت‌های چرخشی بر

² Aromatic-Polymer¹ Ramie

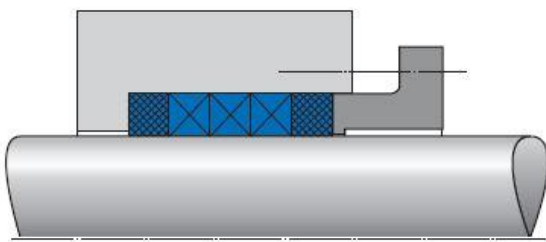
می‌کند، بلکه طول عمر سیستم را در محیط‌های عملیاتی چالش‌برانگیز به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۲۷].



شکل ۱۳: تolerانس گذاری و قیود هندسی مربوط به آب‌بند [۲۸]

۲-۵- طراحی آب‌بند پکینگ با حلقه‌های پکینگ متفاوت

محفظه آب‌بندی با استفاده از انواع مختلف پکینگ‌ها طراحی می‌شود که هر یک کاربرد خاصی دارند. برای مثال، پکینگ‌های بافته‌شده به‌عنوان حلقه ضد بیرون‌زدگی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا از تغییر شکل یا خروج پکینگ‌های نرم مانند پکینگ پلاستیکی تحت فشارهای بالا جلوگیری کنند. در مواردی که فاصله بین قطعات زیاد است، از حلقه‌های پیش‌فشرده شده استفاده می‌شود که به دلیل تراکم اولیه بالا، قادر به پرکردن این فواصل و ایجاد آب‌بندی مؤثرند. همچنین، حلقه‌های انتهایی پرچگال جایگزین مناسبی برای راهنماهای فلزی در محیط‌های خورنده با دمای بالا محسوب می‌شوند، چرا که این حلقه‌ها علاوه بر مقاومت شیمیایی بالا، وزن کم‌تری داشته و از سایش شافت جلوگیری می‌کنند. این موضوع در شکل ۱۴ نشان داده شده است [۱۶].

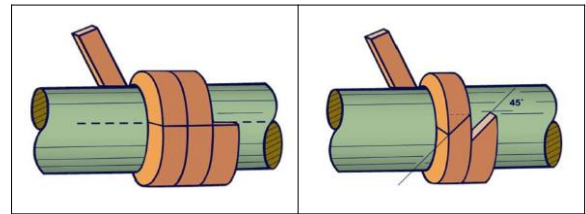


شکل ۱۴: استفاده از پکینگ‌های متفاوت در یک آب‌بند [۱۶]

اساس شرایط کاری محیط دست پیدا کرد و در نهایت انتخاب درستی داشت.

جهت آماده‌سازی مجموعه در صورتی که پکینگ‌ها از پیش ساخته نشده باشند، نصاب باید حلقه‌های پکینگ را روی شافت به اندازه مورد نیاز برش دهد تا هنگام نصب، اتصال با زاویه ۴۵ درجه و مقطع مربعی ایجاد شود. اتصال مربعی معمولاً در سرویس‌های دینامیک مانند پمپ‌های دوار، میکسرها و هم‌زن‌ها استفاده می‌شوند که در آن‌ها نشت کنترل‌شده مجاز است. اتصال ۴۵ درجه در سرویس‌های ایستا مانند شیرآلات به کار می‌روند که نیاز به نشت صفر تا حداقلی دارند. هنگام قرارگیری حلقه‌ها، دهانه‌های آن‌ها باید با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار گیرند تا آب‌بندی به‌درستی انجام شود.

نکته حائز اهمیت دقت در میزان برش الیاف و نحوه قطع آن است. در شکل ۱۲ طریقه قطع دهانه پکینگ‌ها به‌صورت مربعی یا ۴۵ درجه نشان داده شده است.



شکل ۱۲: طریقه قطع دهانه پکینگ‌ها به‌صورت مربعی یا ۴۵ درجه برای آب‌بندی مؤثرتر [۱۶]

۱-۵- معیارهای طراحی محفظه آب‌بند

تنظیم دقیق میزان سفتی گلند و موقعیت آن هنگام سفت‌کردن، برای دستیابی به کارایی مطلوب آب‌بندی ضروری است، چرا که این پارامترها تأثیر مستقیمی بر توزیع یکنواخت فشار روی پکینگ و جلوگیری از نشت دارند. از سوی دیگر، تغییر شکل پکینگ‌ها تحت تأثیر تنش‌های مکانیکی ناشی از خزش مواد و افزایش دما بر اثر اصطکاک داخلی و تماس شافت با دیواره محفظه از چالش‌های کلیدی طراحی سیستم‌های آب‌بندی محسوب می‌شوند که می‌توانند به کاهش یکنواختی فشار روی پکینگ، تسریع فرسایش شافت و محفظه و افزایش احتمال نشت در بلندمدت منجر گردند. برای کاهش این اثرات، پس از اعمال فشار اولیه گلند، لازم است زمان کافی برای رسیدن پکینگ به حالت پایدار تنشی در نظر گرفته شود. این فرآیند مستلزم اعمال تدریجی فشار و ایجاد فاصله‌های زمانی مشخص بین مراحل افزایش فشار است تا تنش‌های داخلی کاهش یافته و نشت به حداقل برسد. چنین رویکردی نه تنها از تخریب زودرس پکینگ جلوگیری

جدول ۲: انواع پکینگ‌ها و حوزه‌های کاربرد آن [۱۶]

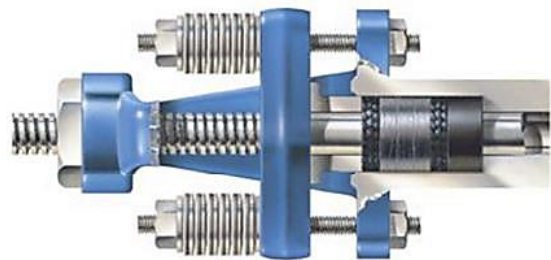
نوع کاربرد پکینگ‌ها در شرایط متفاوت																									
حلال	روغن‌ها	پایه سنتتیک	پایه نفتی	آب نمک	آب معمولی	بخار	اکسیژن	آمونیاک	برم / کلر	هوای خشک	قلیایی		اسید		نوع حرکت	دورانی	میزان PH	شرایط عملیاتی							
											خفیف	خورنده	خفیف	خورنده				سرعت شافت	دور شافت	فشار گلد پکینگ	فشار	°C	°F		
آروماتیک	آلیفاتیک	پایه سنتتیک	پایه نفتی	آب نمک	آب معمولی	بخار	اکسیژن	آمونیاک	برم / کلر	هوای خشک	خفیف	خورنده	خفیف	خورنده	آب‌بندی شیر	رفت و برگشتی	PH	سرعت شافت	دور شافت	فشار گلد پکینگ	فشار	°C	°F	جنس پکینگ	
																		m/s	RPM	BAR	PSI				
																		۵-۹	۵	۱۰۰۰	۱۰	۱۵۰	۹۸	۱۱۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۵-۹	۶	۱۲۰۰	۲۰	۳۰۰	۱۲۰	۲۵۰	
																		۴-۱۰	۷/۵	۱۵۰۰	۲۰	۳۰۰	۱۲۰	۲۵۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۴-۱۰	۷/۵	۱۵۰۰	۲۰	۳۰۰	۱۲۰	۲۵۰	
																		۲-۱۲	۱۱	۲۳۵۰	۳۴	۵۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۲-۱۲	۱۱	۲۳۵۰	۳۴	۵۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۴-۱۱	۷/۵	۱۵۰۰	۲۰	۳۰۰	۱۲۰	۲۵۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۴-۱۱	۷/۵	۱۵۰۰	۲۰	۳۰۰	۱۲۰	۲۵۰	
																		۲-۱۲	۹	۱۸۰۰	۲۰	۳۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۲-۱۲	۹	۱۸۰۰	۲۰	۳۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۴-۱۱	۷/۵	۱۵۰۰	۲۰	۳۰۰	۱۲۰	۲۵۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۴-۱۱	۷/۵	۱۵۰۰	۲۰	۳۰۰	۱۲۰	۲۵۰	
																		۲-۱۲	۱۱	۲۳۵۰	۳۴	۵۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۲-۱۲	۱۱	۲۳۵۰	۳۴	۵۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۴-۱۱	۷/۵	۱۵۰۰	۲۰	۳۰۰	۱۲۰	۲۵۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۴-۱۱	۷/۵	۱۵۰۰	۲۰	۳۰۰	۱۲۰	۲۵۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰	۵۰۰	پکینگ با روغن روغنازی
																		۰-۱۴	۲۰	۴۰۰۰	۲۷۲	۴۰۰	۲۶۰		

۳-۵- طراحی آببند پکینگ با پیش فشار داخلی

پکینگ مجهز به فنر داخلی، شامل یک فنر فشاری است که درون ساختار آببند جاسازی شده تا فشار اولیه لازم برای ایجاد آببندی اولیه را فراهم کند. فنر داخلی تنها برای مرحله پیش‌آببندی طراحی شده و نقش آن در آببندی نهایی محدود است، چرا که آببندی اصلی توسط فشار سیال و ساختار پکینگ تکمیل می‌شود. از مزایای کلیدی این سیستم می‌توان به جلوگیری از نشت اولیه در شروع به کار سیستم، کاهش سایش شافت در شرایط فشار دینامیک و سازگاری با سیالات داغ و خورنده اشاره کرد. این پکینگ‌ها با توزیع یکنواخت فشار و حفظ تماس اولیه با شافت، حتی در شرایط غیرفعال سیستم، قابلیت اطمینان را در محیط‌های عملیاتی چالش‌برانگیز افزایش می‌دهند.

۴-۵- طراحی آببند پکینگ با پیش فشار خارجی

طراحی آببند پکینگ با پیش‌فشار خارجی با هدف ایجاد یک سیستم آببندی خودکار و بدون نیاز به نگهداری است. در این سیستم، نیروی فنر باید همواره از حاصل‌ضرب فشار سیال در سطح مقطع حلقه بیشتر باشد تا از نشت سیال تحت هر شرایطی جلوگیری شود. فنرهای خارجی که در اطراف پکینگ نصب می‌شوند، فشار دائمی و یکنواختی را برای آببندی اعمال می‌کنند و جایگزین مناسبی برای سیستم‌های سنتی مبتنی بر تنظیم دستی پیچ گلند است. این طراحی به‌ویژه در صنایع حساسی مانند صنایع غذایی و دارویی که الزامات بهداشتی بالا و محدودیت دخالت انسانی وجود دارد و نیز در سیستم‌های تحت خلأ یا فشار متغیر که نیازمند آببندی پایدار در شرایط ناپایدار فشارند، کاربرد گسترده‌ای دارد. با حذف نیاز به تنظیمات دستی و توزیع یکنواخت فشار، این سیستم نه تنها قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه‌های عملیاتی و نگهداری را در بلندمدت کاهش می‌دهد. در شکل ۱۵ یک آببند پکینگ با پیش فشار خارجی را نمایش می‌دهد [۱۶].



شکل ۱۵: استفاده از پکینگ‌های با پیش‌فشار خارجی [۱۶]

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با بررسی سیستماتیک پارامترهای کلیدی مؤثر بر عملکرد آببند‌های پکینگ در محورهای چرخشی، نشان داد که ترکیب مواد پیشرفته و بهینه‌سازی طراحی مکانیکی نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود کارایی و دوام این سیستم‌ها دارد. استفاده از حلقه‌های فانوسی بهینه‌شده به‌عنوان راهکاری نوین، امکان تزریق هم‌زمان روان‌ساز و خنک‌کننده را در محیط‌های پر فشار فراهم کرده و عملکرد آببندی را در شرایط عملیاتی دشوار تا حد چشم‌گیری ارتقا می‌دهد. همچنین، پکینگ‌های کامپوزیتی با توزیع یکنواخت تنش و کاهش اصطکاک، نه تنها نشت سیال را محدود می‌کنند، بلکه طول عمر شفت و تجهیزات مرتبط را افزایش می‌دهند. با این حال، چالش‌هایی نظیر ناپایداری در محیط‌های با نوسانات فشار بالا و محدودیت در کاربرد صنعتی مواد نوین همچنان نیازمند توجه ویژه است. برای تحقیقات آینده، توسعه مواد هوشمند با قابلیت خودترمیمی یا حسگرهای تعبیه‌شده جهت پایش به‌روز وضعیت آببندی، بهینه‌سازی هندسی پکینگ‌ها با اشکال غیرمتعارف، ارزیابی عملکرد مواد پیشرفته مانند گرافن در محیط‌های کاری با شرایط ویژه و کاهش هزینه‌ها از طریق جایگزینی مواد گران‌قیمت با ترکیبات مقرون‌به‌صرفه پیشنهاد می‌شود. در نهایت، ادغام فناوری‌های نوین با دانش سنتی آببندی نه تنها قابلیت اطمینان سیستم‌های دوار صنعتی را افزایش می‌دهد، بلکه گامی اساسی به سوی صنایع پایدار و کم‌هزینه محسوب می‌شود.

این پژوهش با تحلیل جامع پارامترهای مؤثر بر طراحی پکینگ‌ها، استفاده از حلقه‌ی فانوسی بهینه‌شده را به‌عنوان راهکاری نوین برای تزریق هم‌زمان روان‌ساز و خنک‌کننده در محیط‌های فشار بالا معرفی کرده است که در مطالعات پیشین کمتر بررسی شده است. همچنین، ارائه الگوی ترکیبی مواد کامپوزیتی (مانند گرافیت-پلی‌ترافلورواتیلن با هسته‌های الاستومری) برای توزیع یکنواخت تنش و کاهش سایش شفت، تمایزی کلیدی نسبت به پژوهش‌های مرسوم محسوب می‌شود. به‌کارگیری پکینگ‌های مجهز به فنرهای خودتنظیم با قابلیت اعمال فشار اولیه پایدار بدون نیاز به تنظیمات دستی، به‌عنوان راهکاری انعطاف‌پذیر در سیستم‌های دوار پرسرعت، از دیگر نوآوری‌های این مطالعه است.

۷- منابع

[1] R. K. Flitney, *Seals and Sealing Handbook*, 6th ed. Butterworth-Heinemann, 2014.

- no. 6, p. 266, 2023, doi: [10.3390/lubricants11060266](https://doi.org/10.3390/lubricants11060266).
- [12] Y. Takigahira, Y. Maetani, M. Ito, N. Uemura, and K. Ohashi, "Study on Additively Manufactured Mechanical Seal (Part 1) Numerical Analysis and Experimental Study on Static Characteristics," *Tribol. Online*, vol. 17, no. 4, pp. 306–317, 2022, doi: [10.2474/trol.17.306](https://doi.org/10.2474/trol.17.306).
- [13] A. S. Medjahed, A. Blouin, B. Pap, and N. Brunetière, "Simulation of air ingestion in a mechanical seal with inward pumping spiral grooves," *J. Tribol.*, vol. 145, no. 11, 2023, doi: [10.1115/1.4062899](https://doi.org/10.1115/1.4062899).
- [14] V. Lamei, "Theoretical-Experimental Investigation of the Development of Mechanical Seal Manufacturing Technology," Iran Univ. Sci. Technol., Tehran, 1997. (in Persian)
- [15] J. L. Thomson, "Packed glands for high pressures: an analysis of fundamentals," *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vol. 172, no. 1, pp. 471–486, 1958, doi: [10.1243/PIME_PROC_1958_172_041_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1958_172_041_02).
- [16] Fluid Sealing Association & European Sealing Association, *Compression packing: Technical manual*, 4th ed., 2018.
- [17] B. D. Halligan, "Seals for Fluid Power Equipment Part Three Compression Packings," *Tribol. Ser.*, vol. 8, pp. 370–392, 1983, doi: [10.1016/S0167-8922\(08\)70706-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(08)70706-5).
- [18] H. Muller, *Fluid sealing technology: principles and applications*. Routledge, 2019.
- [19] J. L. Thomson, "A Theory of Sealing with Particular Reference to the Packed Stuffing Box," in *Int. Conf. on Fluid Sealing*, British Hydromechanics Research Association, Paper B1, 1961.
- [20] D. F. Denny and D. E. Turnbull, "Sealing characteristics of stuffing-box seals for rotating shafts," *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vol. 174, no. 1, pp. 271–291, 1960, doi: [10.1243/PIME_PROC_1960_174_027_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1960_174_027_02).
- [21] S. H. Yousefi, R. Ashrafi, and S. Golaei, "The effect of pressure and friction coefficient in gland packing design," in *Second National Conference on Manufacturing Engineering*, Islamic Azad Univ., [2] K. Van Der Wal, R. A. van Ostayen, and S. G. Lampaert, "Ferrofluid rotary seal with replenishment system for sealing liquids," *Tribol. Int.*, vol. 150, p. 106372, 2020, doi: [10.1016/j.triboint.2020.106372](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106372).
- [3] X. Li, Z. Li, B. Zhu, J. Cheng, W. Li, and J. Yuan, "Optimal design of large gap magnetic fluid sealing device in a liquid environment," *J. Magn. Magn. Mater.* vol. 540, p. 168472, 2021, doi: [10.1016/j.jmmm.2021.168472](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168472).
- [4] M. Szczech and K. Raj, "Design and analysis of combined standard ferrofluid and centrifugal seals," *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 75, no. 10, pp. 1229–1235, 2023, doi: [10.1108/ILT-07-2023-0221](https://doi.org/10.1108/ILT-07-2023-0221).
- [5] I. B. Djemaa, S. Auguste, W. Drenckhan-Andreatta, and S. Andrieux, "Hydrogel foams from liquid foam templates: Properties and optimisation," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 294, p. 102478, 2021, doi: [10.1016/j.cis.2021.102478](https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102478).
- [6] L. Hu, Y. Yang, W. Yu, and L. Xu, "Hydrogels for Lubrication: Synthesis, Properties, Mechanism, and Challenges," *Lubricants*, vol. 12, no. 6, p. 186, 2024, doi: [10.3390/lubricants12060186](https://doi.org/10.3390/lubricants12060186).
- [7] S. Bashir et al., "Fundamental concepts of hydrogels: Synthesis, properties, and their applications," *Polymers*, vol. 12, no. 11, p. 2702, 2020, doi: [10.3390/polym12112702](https://doi.org/10.3390/polym12112702).
- [8] M. Morshedzadeh and M. Sheikhi Azqandi, "Investigation and Analysis of Mechanical Properties and Response of Hydrogels in Smart Systems Based on the Type of Stimulus," in *1151-ICME2025*, 2025. (in Persian)
- [9] N. Reeh, G. Manthei, and P. J. Klar, "Soft sensor technology for the determination of mechanical seal friction power performance," *Appl. Syst. Innov.*, vol. 7, no. 3, p. 39, 2024, doi: [10.3390/asi7030039](https://doi.org/10.3390/asi7030039).
- [10] T. He, Q. Zhang, Y. Yan, J. Dong, and P. Zhou, "Numerical simulation of a new designed mechanical seals with spiral groove structures," *Lubricants*, vol. 11, no. 2, p. 70, 2023, doi: [10.3390/lubricants11020070](https://doi.org/10.3390/lubricants11020070).
- [11] M. Rahimpour, A. Samadani, and S. Akbarzadeh, "Application of Load-Sharing Concept to Mechanical Seals," *Lubricants*, vol. 11,

8th Int. Conf. on Fluid Sealing, Paper D1, BHRA, Sept. 1978.

[25] M. Sheikhi Azqandi, "A Novel Hybrid Genetic Modified Colliding Bodies Optimization for Designing of Composite Laminates," *Mech. Adv. Compos. Struct.*, vol. 8, pp. 203–212, 2021, doi: [10.22075/mac.2020.20281.1254](https://doi.org/10.22075/mac.2020.20281.1254).

[26] D. Harrison, B. Kirkman, E. Smith, and M. J. Billington, "Evaluation of graphite valve packings to reduce fugitive emissions on hydrocarbon duties," in *Valves and Actuators Int. Conf.*, ITC, Manchester, UK, Sept. 1994.

[27] C. M. Allen and W. G. Rieder, "Performance of a Modified Packed-Gland Seal," 1968.

[28] Eagle Burgmann, *Compression Packing, Product Catalog*. 2015. [Online]. Available: <https://www.eagleburgmann.com>

Najafabad Branch, Iran, Oct.–Nov. 2009. (in Persian)

[22] F. Azimpour-Shishevan, M. A. Mohtadi-Bonab, H. Akbulut, and B. Rahmatinejad, "Low velocity impact behavior of twill basalt/epoxy composites modified by graphene nanoparticles," *J. Compos. Mater.*, vol. 57, no. 8, pp. 1379–1394, 2023, doi: [10.1177/00219983231154484](https://doi.org/10.1177/00219983231154484).

[23] F. Azimpour-Shishevan, M. A. Mohtadi-Bonab, and B. Rahmatinejad, "The effects of graphene oxide addition on low velocity impact performance of aramid fiber reinforced epoxy composites," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 141, no. 3, e54832, 2024, doi: [10.1002/app.54832](https://doi.org/10.1002/app.54832).

[24] E. Staaf, "A review of the properties of expanded graphite and selected forms of PTFE as alternatives to asbestos in a sealing role," in *Proc.*