



Stress Analysis and Feasibility of Fabrication of Laminar Ring

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ghauori M.^{*1} MSc,
Rashvand M.¹ MSc

How to cite this article

Ghauori M R, Rashvand M. Stress Analysis and Feasibility of Fabrication of Laminar Ring. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8):2039-2046.

ABSTRACT

Due to the high demand of steel factories, the necessity of localization of mechanical laminar was introduced from Mobarakeh Steel Company of Isfahan. In this research, we first studied the working conditions and the extraction of the forces applied to the waterworks. The investigations showed that the forces are quasi-static and the pressure values are $P_H=225\text{Pa}$ and $P_{Gr}=220\text{Bar}$, and the torque $TS=306.07\text{N.m}$. The results of the tensile test showed that the final strength for the waterworks and belt was 620.3 and 594.1 MPa, respectively. In order to make the desired waterworks, the belt was prepared in 6 steps from the mold and formed a circular shape. Using the matrix pitch matrix, the staircase was created on the waterworks. The results of static analysis on the mechanical laminar and domestic laminar showed that the maximum stresses, based on Von Mises theory, were $1.39 \times 10^8\text{ Pa}$ and 3.2×10^8 and the confidence coefficient for each was 2.808 and 1.338, respectively.

Keywords Laminar Ring; Rolling; Stainless Steel; Stress Analysis

¹Biosystem Mechanical Engineering Department, Agriculture Engineering & Technology Faculty, University of Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Biosystem Mechanical Engineering Department, Agriculture Engineering & Technology Faculty, University of Tehran, Iran
Phone: -
Fax: +98 (26) 22808138
majid.ghauori@ut.acir

Article History

Received: January 05, 2019
Accepted: January 26, 2019
ePublished: August 12, 2019

CITATION LINKS

[1] New anti-jamming technique for GPS and GALILEO receivers using adaptive FADP filter [2] Effect of internal clearance on load distribution and life of radially loaded ball and roller bearings [3] Composite construction board with load bearing properties U.S. patent no. 6,177,180 [4] Direct numerical simulation of vortex ring evolution from the laminar to the early turbulent regime [5] Experimental study on the hydrodynamic lubrication characteristics of magnetofluid film in a spiral groove mechanical seal [6] Hydrodynamic effects of shaft surface finish on lip seal operation [7] The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions [8] Experimental and theoretical investigation on the sealing performance of the combined seals for reciprocating rod [9] Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures [10] Effect of strain-induced martensite on the formation of nanocrystalline 316L stainless steel after cold rolling and annealing [11] Redesign of a guide bearing for pneumatic actuators and life tests comparison [12] A shaft seals for dynamic applications [13] Investigating the Effect of Multi-stage Cold Rolling and Annealing on the Finite Structural Properties and Mechanical Properties of Sintering Steel 304

تحلیل تنش و امکان سنجی ساخت آببند مکانیکی (رینگ لامینار)

مجید غیوری* MSc

گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مهدی رشوند MSc

گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

با توجه به نیاز بالای شرکت های فولادسازی، ضرورت بومی سازی آببندهای مکانیکی لامینار از طرف مجتمع فولاد مبارکه اصفهان مطرح شد. در این تحقیق ابتدا اقدام به بررسی شرایط کاری و استخراج نیروهای وارده بر آببند شد. بررسی ها نشان دادند که نیروهای وارده، شبه استاتیک بوده و مقادیر فشار $PH_{225} = (پاسکال)$ و $PG_{220} = (بار)$ و گشتاور $TS_{306/7} = (نیوتون بر متر)$ هستند. نتایج آزمایش کشش نشان داد که استحکام نهایی برای آببند و تسمه به ترتیب $620/3$ و $594/1$ مگاپاسکال هستند. نتایج حاصل از تحلیل استاتیک روی آببند لامینار و آببند ساخته شده نشان داد که بیشترین تنش براساس تئوری وون میسز به ترتیب $1/39 \times 10^8$ (پاسکال) و $3/2 \times 10^8$ (پاسکال) و ضریب اطمینان نیز برای هرکدام به ترتیب $2/808$ و $1/338$ است. **کلیدواژه ها:** آببند مکانیکی، نورد، فولاد ضدزنگ، تحلیل تنش

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶

*نویسنده مسئول: majid.ghauri@ut.ac.ir

هیدرودینامیک با افزایش شدت میدان مغناطیسی افزایش می یابد. همچنین با استفاده از یک نیروی مناسب، کنترل ظرفیت آب بندی از طریق تنظیم شدت جریان در میدان مغناطیسی ژنراتور امکان پذیر است [6,7].

ماوو و همکاران [8]، عملکرد آب بندی آببندهای ترکیبی را در فشار روغن 40 مگاپاسکال به صورت تجربی و تئوری روی میله با حرکت رفت و برگشتی مورد بررسی قرار دادند. آنها برای مطالعه خود دو آببند C شکل و T شکل را مورد استفاده قرار دادند. آنها دریافتند که سرعت میله به طور قابل توجهی تحت تأثیر عملکرد آب بندی آببندهای مرکب است [9].

اسکندری و همکاران، تشکیل مارتنزیت در فولاد ضدزنگ L_{316} را با در نظر گرفتن پنج دما و کرنش مختلف نورد سرد بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که ریزترین ساختار با کرنش 30% و دمای نورد 523 کلونین تشکیل می شود [10].

آمبو و همکاران [11]، یاتاقان راهنمای سر یک سیستم محرک نیوماتیک (بادی) خطی را مجدداً طراحی کردند. دریافتند که می توان مدل های ارائه شده را اعتبارسنجی نمود [12]. به منظور امکان سنجی ساخت این قطعه، تحلیل عملکرد و شناخت روابط حاکم بر این قطعه و تحلیل تنش در شرایط کاری، امری ضروری به نظر می رسد که در این تحقیق به آن پرداخته می شود. همچنین بررسی نیروهای اعمالی روی آببند مکانیکی لامینار حین کار و تحلیل تنش روی آببند و انجام آزمایش های خواص فیزیکی و مکانیکی روی آببند ساخته شده و مقایسه نتایج حاصل از دو نمونه آببند از اهداف دیگر این تحقیق است.

۲- مواد و روش ها

در این بخش ابتدا نیروهای وارد بر آببند مکانیکی لامینار حین کار محاسبه می شود و پس از تعیین آلیاژ آن اقدامات لازم برای تهیه مفتول مورد نظر انجام می گیرد. سپس مفتول تهیه شده نورد و آزمایش های سختی، کشش و متالوگرافی تصویری روی مفتول تهیه شده و آببند مکانیکی لامینار به منظور مقایسه و ارزیابی مراحل تولید صورت خواهد گرفت. نهایتاً با توجه به نیروهای شبه استاتیک محاسبه شده و اعمال شرایط مرزی متناسب با استفاده از نرم افزار انسیس ورک بنچ، تحلیل استاتیک و خستگی روی آببند لامینار و آببند ساخته شده انجام می شود.

۲-۱- محاسبه نیروهای وارده بر غلتک نورد ماشین ریخته گری مداوم

محرک هر غلتک نورد خط ریخته گری مداوم یک موتور الکتریکی ۶ کیلووات با جریان $15/6$ آمپر سه فاز ستاره ای است. جریان موتور الکتریکی حین کار با استفاده از ولت متر دیجیتالی 2 آمپر اندازه گیری شد. با توجه به معادله ۱، توان موتور سه فاز ستاره ای و اطلاعاتی که از موتور محرک غلتک ها در دسترس است، می توان $V_L \cos(\varphi)$ را در حین کار و حالت توان اسمی موتور ثابت فرض کرد. در نتیجه برای توان اسمی:

$$V_L \cos(\varphi) = \frac{P}{\sqrt{3}I_L} = \frac{6}{\sqrt{3} \times 15.6} \quad (1)$$

بنابراین با توجه به جریان اندازه گیری شده حین کار موتور، توان حین کار برابر است با:

(۲)

$$P = \sqrt{3}V_L I_L \cos(\varphi) = \sqrt{3} \times 2 \times \frac{6}{\sqrt{3} \times 15.6} = 0.7692 \text{ Kw}$$

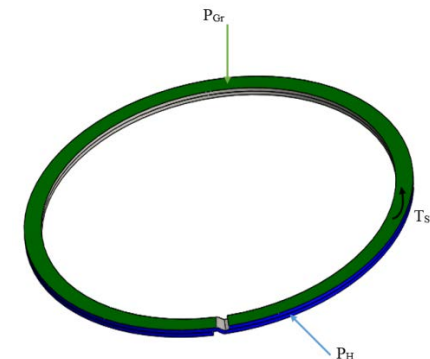
۱- مقدمه و شرح مساله

در اکثر فرآیندهای تولید از غلتک هایی برای انجام عملیات نورد استفاده می کنند [1]. یکی از عوامل محدودکننده عملکرد غلتک ها، نیروی اصطکاکی است. ممکن است غلتک ها در معرض رطوبت، دمای بالا و خوردگی باشند که این شرایط بر عملکرد و طول عمر یاتاقان ها تأثیرگذار خواهد بود [2].

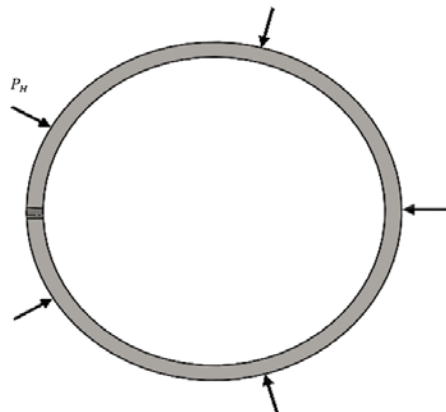
در ماشین های ریخته گری مداوم، غلتک هایی مورد استفاده قرار می گیرند که تختال را از قسمت اولیه ریخته شدن تا پایان شکل گیری، هدایت و نورد می کنند. شرایط کاری مذکور باعث کاهش عمر یاتاقان ها و افزایش هزینه تعمیر و نگهداری ماشین ریخته گری و همچنین کاهش تولید سالانه می شود [3]. راهکاری که برای جلوگیری از آسیب دیدگی این یاتاقان ها ارائه شده، استفاده از آببندهای مکانیکی در دو طرف یاتاقان است که بتواند علاوه بر تحمل شرایط فوق از نشستی آب به داخل یاتاقان جلوگیری کند [4]. آب بندی توسط رینگ هایی صورت می گیرد که تنها شرکت سازنده آن شرکت FEY آلمان است. شرکت FEY آلمان تنها شرکت سازنده رینگ های آببند فلزی است که اعتبار جهانی دارد. به همین دلیل تولیدات این شرکت با قیمت زیاد ارائه می شود و به فروش می رسد. این قطعه در عین سادگی، وظیفه بسیار مهمی بر عهده دارد که تنها شرکت فوق قابلیت ساخت آن را دارد. طبق کاتالوگ شرکت، جنس قطعه CrNi - DIN 1.4571 که همان SS 316 تیتانیوم دار بوده، یک فولاد ضدزنگ و مقاوم به سطوح حرارتی بالا است.

ژوو و همکاران [5]، یک مطالعه تجربی روی ویژگی های روانکاری آببند مکانیکی شیار مارپیچی را به منظور یافتن تأثیر میدان مغناطیسی روی هیدرودینامیک سیال مغناطیسی انجام دادند. با تجزیه و تحلیل عددی روی فیلم توزیع فشار دریافتند که فشار

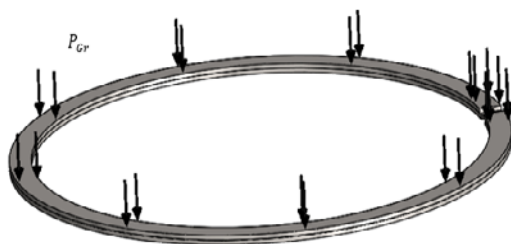
با توجه به وجود لایه گریس بین آب‌بند و شیار نگهدارنده آب‌بند روی غلتک نمی‌توان از استانداردهای موجود ضریب اصطکاک قابل قبولی جست‌وجو کرد. برای محاسبه ضریب اصطکاک دو نیروی نرمال (N) و مماسی (F) وارد بر آب‌بند که در شکل ۴ آمده است، باید محاسبه شوند.



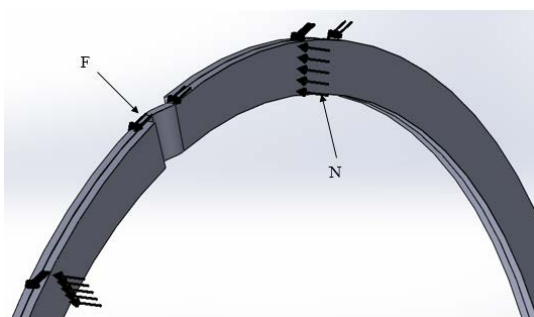
شکل (۱) مجموعه نیروهای وارده بر آب‌بند مکانیکی لامینار



شکل (۲) چگونگی اعمال فشار ناشی از سفت‌کردن پوسته یاتاقان روی آب‌بند مکانیکی لامینار P_H



شکل (۳) چگونگی اعمال فشار ناشی از مدار گریس روی آب‌بند مکانیکی لامینار P_{Gr}



شکل (۴) نیروهای نرمال (N) و مماسی (F) وارد بر آب‌بند مکانیکی

گشتاوری که به غلتک توسط موتور اعمال می‌شود از معادله زیر به دست می‌آید:

$$P_{(KW)} = \frac{T \times N}{9550} \quad (۳)$$

T گشتاور (نیوتون در متر) و N سرعت موتور (دور بر دقیقه) است. با توجه به اینکه غلتک‌های خط ریخته‌گری مداوم مجتمع فولاد مبارکه اصفهان روی سرعت یک دور بر دقیقه ثابت شده‌اند، داریم:

$$T = \frac{9550 \times P}{N} = \frac{9550 \times 0.7692}{1} = 7345.86 \text{ N.m} \quad (۴)$$

براساس داده‌های ارائه‌شده از طرف واحد تعمیر و نگهداری مجتمع فولاد مبارکه اصفهان، فشار کاری جک هیدرولیک ۲۱۰ بار است. برای محاسبه نیروی خروجی جک هیدرولیک:

$$F = P \cdot A \cdot \eta \quad (۵)$$

که در آن F نیروی خروجی جک هیدرولیک برحسب نیوتون، P فشار کاری جک برحسب پاسکال، مساحت پیستون جک هیدرولیک برحسب متر مربع و η بازده جک هیدرولیک که ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود و قطر پیستون جک هیدرولیک ۲۸۷ میلی‌متر است، بنابراین:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{3.1415}{4} \times 0.287^2 = 0.065 \text{ m}^2 \quad (۶)$$

$$F = 210 \times 10^5 \times 0.065 \times 0.85 = 1160.25 \text{ kN}$$

۲-۲ محاسبه نیروهای وارده بر آب‌بند مکانیکی لامینار

براساس داده‌های ارائه‌شده از طرف واحد تعمیر و نگهداری مجتمع فولاد مبارکه اصفهان، سرعت خط‌نورد و فشار سیستم گریس پشت غلتک‌های خط‌نورد همواره مقدار ثابتی است. بنابراین آب‌بند در هر لحظه تحت یک سری نیروهای ثابت قرار می‌گیرد که مجموعه نیروهای وارد بر آب‌بند مکانیکی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۳ محاسبه فشار ناشی از سفت‌کردن پوسته یاتاقان

با توجه به نقشه تهیه‌شده از آب‌بند مکانیکی لامینار، قطر خارجی آب‌بند هوزینگ ۲۰۱/۵۳ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. همچنین با توجه به نقشه غلتک‌نورد شکل، قطری که پوسته یاتاقان آب‌بند هوزینگ را در حالت بسته نگه می‌دارد ۱۹۹ میلی‌متر است. بنابراین اختلاف قطر آب‌بند هوزینگ در حالت آزاد و نصب‌شده ۲/۵۳ میلی‌متر است. این تغییر قطر و همچنین وجود حالت فنری این نوع آب‌بند باعث آب‌بندی هوزینگ یاتاقان می‌شود. چگونگی اعمال فشار روی آب‌بند در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۴ محاسبه فشار ناشی از مدار گریس

فشار مدار گریس خط‌نورد ریخته‌گری مداوم روی ۲۲۰ بار ثابت شده است. وظیفه مدار، تنظیم فاصله بین غلتک‌ها و همچنین روانکاری یاتاقان غلتک‌ها است. بنابراین فشار روی سطح آب‌بند همین مقدار خواهد بود که در شکل ۳ آمده است.

۲-۵ محاسبه گشتاور ناشی از اصطکاک

گشتاور T محاسبه‌شده برای غلتک بین ۲۴ آب‌بند مکانیکی لامینار موجود روی غلتک تقسیم می‌شود. برای گشتاور وارد بر آب‌بند مکانیکی لامینار (T_s) داریم:

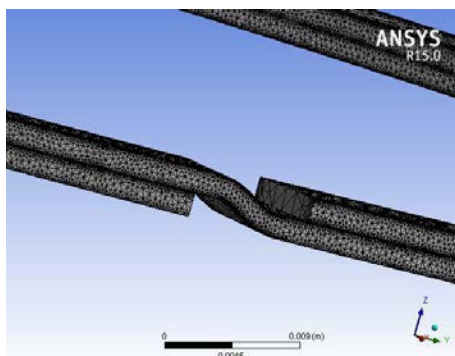
$$T_s = \frac{T}{24} = \frac{7345.86}{24} = 306.0775 \text{ N.m} \quad (۷)$$

M_s را همان‌طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، روی آب‌بند اعمال می‌کنیم. شکل ۷ مدل آب‌بند را پس از اعمال شرایط مرزی و بارگذاری استاتیک نشان می‌دهد.

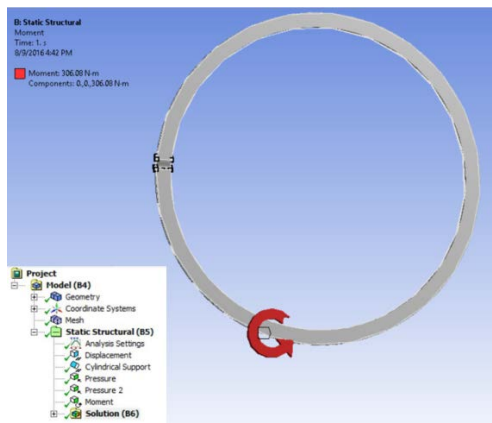
Contents of Engineering Data		Description
1	Material	
2	Structural Steel	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
3	sealing	
4		Click here to add a new material.

Properties of Outline Row 4: sealing			
A	B	C	D
Property	Value	Unit	
1 Density	8000	kg m ⁻³	
2 Isotropic Elasticity			
3 Derive from	Young's Mod...		
4 Young's Modulus	1.928E+05	MPa	
5 Poisson's Ratio	0.285		
6 Bulk Modulus	1.494E+11	Pa	
7 Shear Modulus	7.502E+10	Pa	
8 Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
9 Tensile Yield Strength	431.43	MPa	
10 Tensile Ultimate Strength	620.3	MPa	

شکل ۵) مشخصات فیزیکی و مکانیکی آب‌بند در نرم‌افزار



شکل ۶) مدل آب‌بند مکانیکی لامینار مش‌بندی شده



شکل ۷) مدل آب‌بند پس از اعمال شرایط مرزی و بارگذاری استاتیک

۳- نتایج و بحث

آزمون کشش دو نمونه در دمای محیط تا شکست نمونه‌ها ادامه داشت و نتایج در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است. برای آب‌بند اصلی، میزان استحکام نهایی (Uts) ۶۲۰/۲۹۷ مگاپاسکال، استحکام تسلیم ۴۳۱/۴۲۸ مگاپاسکال و کرنش ۱۳۴٪ در نیروی ۹۱۰/۵۱۴ نیوتون به دست آمد. برای مفتول نوردشده میزان استحکام نهایی (Uts) ۵۹۴/۱۰۵ مگاپاسکال، استحکام تسلیم ۳۹۲/۴۲۸ مگاپاسکال و کرنش ۱۸۲٪ در نیروی ۸۲۹/۸۴۲ نیوتون به دست آمد. بنابراین استحکام نهایی بالاتر و درصد ازدیاد طول کمتر نتایج کشش را به‌درستی تأیید می‌کند. نمونه آزمون کشش آب‌بند اصلی پس از شکست در نمودار ۲ نشان داده شده است.

همچنین نیروی نرمال از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P\left(\frac{N}{mm^2}\right) = \frac{N}{A} \quad (8)$$

فشار در اینجا همان فشار ناشی از گریس است که ۲۲۰ بار محاسبه شد. A نیز سطح یک طرف آب‌بند است که از روی مدل تهیه شده در نرم‌افزار سالدورکس به دست آمد، بنابراین داریم:

$$N = P \times A = 220 \times 10^{-1} \left(\frac{N}{mm^2}\right) \times 5288.35(mm^2) = 116343.7 N$$

نیروی مماسی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T = F \times r \quad (10)$$

T گشتاور محاسبه شده برای یک آب‌بند مکانیکی و r شعاع داخلی آب‌بند مکانیکی است. بنابراین داریم:

$$F = \frac{T}{r} = \frac{306.0775}{91.872 \times 10^{-3}} = 3331.56 N$$

برای محاسبه ضریب اصطکاک داریم:

$$F = \mu N \quad (11)$$

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{3331.56}{116343.7} = 0.02864$$

۲-۶- ساخت نمونه آب‌بند مکانیکی لامینار

پس از اتمام کلیه آزمایش‌ها روی آب‌بند اصلی و قطعه نوردشده و اینکه نتایج هم‌پوشانی بالایی داشت، مراحل ساخت تا تولید یک آب‌بند بومی ادامه یافت. پس از نورد، مفتول تهیه شده با ۶ مرحله کشیدن تسمه تولیدشده از قالب توسط دستگاه تراش فرم دایره‌ای آب‌بند به دست آمد.

۲-۷- تحلیل استاتیک و خستگی آب‌بند مکانیکی لامینار با استفاده از نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ

برای انجام تحلیل اجزای محدود لازم است که ابتدا مدل ایجادشده توسط نرم‌افزار سالدورکس به محیط نرم‌افزار ورک‌بنچ انسیس فراخوانی شود. در مرحله بعد از قسمت Analysis System، تحلیل استاتیک را به مدل فراخوانی شده اضافه می‌کنیم.

در مرحله بعد، جنس آب‌بند مکانیکی لامینار انتخاب می‌شود. برای این کار با کلیک روی گزینه Engineering Data، شکل ۵ ظاهر و مشخصات وارد شد.

با توجه به ساختار مدل و نوع تحلیل‌ها باید مش به‌گونه‌ای انجام گیرد که در لبه‌ها و نقاط مرزی بیشترین تعداد المان و گره ایجاد شود. به همین دلیل نوع مش‌بندی به‌صورت اتوماتیک تنظیم شد. سپس از منوی Sizing، سایزبندی پیشرفته روی Proximity and Curvature قرار گرفت. شکل ۶ مدل آب‌بند مکانیکی لامینار را بعد از اعمال مش‌بندی نشان می‌دهد که شامل ۱۷۳۷۱۱۳ المان و ۲۷۹۷۹۸۹ گره است.

در مرحله بعد، شرایط مرزی را اعمال می‌کنیم. به این صورت که ابتدا صفحه کناری آب‌بند را روی محور مختصات ثابت می‌کنیم و به‌دلیل وظیفه هوزینگ آب‌بند، قید Cylindrical Support را تنها در راستای تانژانتی آزاد می‌گذاریم. سپس بارهای استاتیک فشار گریس P_G ، فشار هوزینگ P_H و گشتاور ناشی از اصطکاک



شکل ۱۰) نمونه آب‌بند مکانیکی لامینار ساخته شده

۳-۱ نتایج حاصل از تحلیل تنش

آب‌بند مکانیکی لامینار و آب‌بند مکانیکی ساخته‌شده با توجه به شرایط مرزی، خواص فیزیکی و مکانیکی و نیروهای به‌دست‌آمده، تحلیل تنش شده که نتایج به‌ترتیب در زیر آمده است:

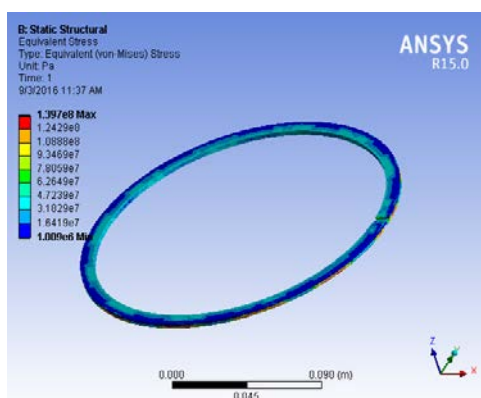
۳-۱-۱-۳ نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی آب‌بند مکانیکی لامینار

تنش بر مبنای تئوری وون‌میسز و تغییر شکل ایجادشده در آب‌بند مکانیکی لامینار از مهم‌ترین اطلاعاتی است که از تحلیل استاتیکی حاصل می‌شود. دیاگرام توزیع تنش بر مبنای تئوری وون‌میسز آب‌بند مکانیکی لامینار تحت بارگذاری و شرایط مرزی گفته‌شده، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. طبق این شکل، بیشترین تنش معادل $1/397 \times 10^8$ و کمترین آن $1/09 \times 10^8$ پاسکال است. در شکل ۱۲، تغییر شکل کلی آب‌بند مکانیکی نشان داده شده است. با توجه به شکل، مقدار تغییر شکل بیشینه $1/5492 \times 10^{-3}$ و مقدار کمینه آن صفر است.

مقادیر ماکزیمم و مینیمم ضریب اطمینان آب‌بند مکانیکی لامینار در شکل ۱۳ نشان داده شده است. ضریب اطمینان محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار با شرایط مرزی مشابه شرایط کاری قطعه، عدد $1/808$ را نشان می‌دهد.

۳-۲ نتایج حاصل از تحلیل خستگی آب‌بند مکانیکی لامینار

عمر آب‌بند مکانیکی لامینار در شرایط بارگذاری خستگی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به نوع بارگذاری و شرایط مرزی اعمالی، عمر ماکزیمم 10^7 سیکل و عمر مینیمم 10^{11} سیکل است. تأثیر تغییر بارگذاری از $0/5$ تا $1/5$ برابر بارگذاری فعلی روی عمر آب‌بند مکانیکی لامینار در نمودار ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که از نمودار ۳ استنتاج می‌شود، با تغییر بارگذاری تا حدود $1/4$ بارگذاری فعلی، عمر آب‌بند 10^7 سیکل و بعد از آن عمر به‌صورت نزولی کاهش می‌یابد.

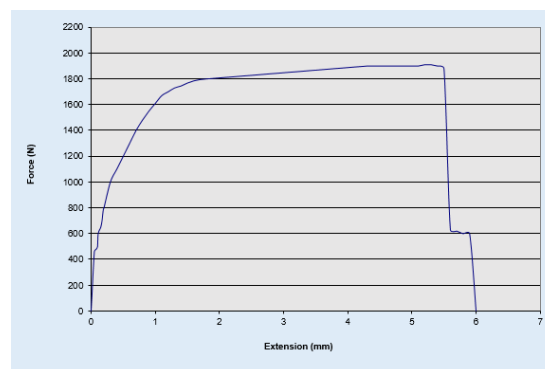


شکل ۱۱) توزیع تنش (وون‌میسز) آب‌بند مکانیکی لامینار در شرایط بارگذاری استاتیکی

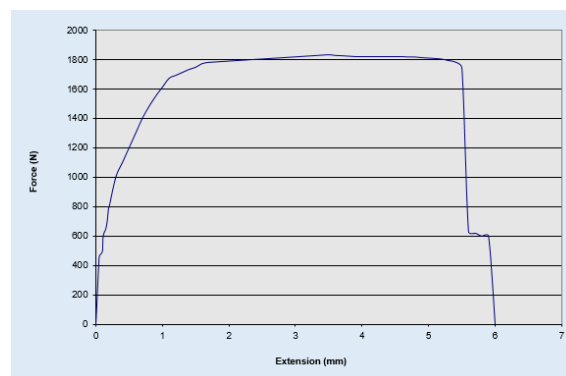
با توجه به شکل ۸، عرض ناحیه گلوبی تغییر چندانی نداشته و سطح شکست تقریباً صاف بوده، بنابراین شکست ترد در نمونه رخ داده است. نمونه آزمون کشش مفتول نوردشده پس از شکست در شکل ۹ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۹، عرض ناحیه گلوبی در اینجا نیز تغییر چندانی نداشته است، اما لبه مضرتری نسبت به نمونه قبلی دارد. بنابراین شکست نیز در اینجا شکست ترد بوده، با این تفاوت که نسبت به نمونه قبلی نرم‌تر و درصد ازدیاد طول از نمونه قبلی بیشتر است.

براساس آزمایش‌های صورت‌گرفته و تهیه مواد مورد نظر، عملیات مختلف از جمله نورد، شکل‌دهی و عملیات حرارتی تنش‌زدایی انجام گرفت و در نهایت نمونه اولیه‌ای از آب‌بند مکانیکی لامینار ساخته شد. با توجه به شرایط کاری، آب‌بند مکانیکی لامینار ساخته‌شده نیازمند عملیات حرارتی و پولیش نهایی است که با در نظر گرفتن هزینه‌های جانبی و زمان مورد نیاز برای ساخت قالب، تا این مرحله از کار اکتفا نموده و تصاویر مربوط به نمونه نهایی فعلی به‌صورت شکل ۱۰ ارائه می‌شود.



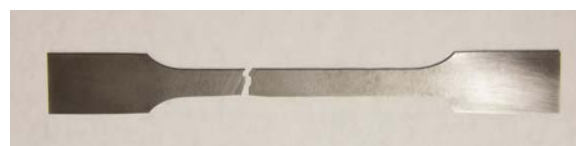
نمودار ۱) نمودار نیرو- جابه‌جایی آب‌بند مکانیکی لامینار



نمودار ۲) نمودار نیرو- جابه‌جایی مفتول نوردشده



شکل ۸) نمونه آزمون کشش آب‌بند مکانیکی لامینار پس از شکست



شکل ۹) نمونه آزمون کشش مفتول نوردشده پس از شکست

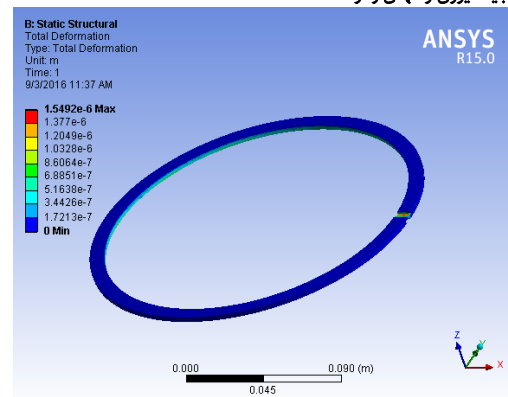
۳-۳- نتایج حاصل از تحلیل استاتیک آب‌بند مکانیکی ساخته‌شده شکل توزیع تنش بر مبنای تئوری وون‌میسز آب‌بند مکانیکی ساخته‌شده تحت بارگذاری و شرایط مرزی گفته‌شده، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. طبق این تصویر، بیشترین تنش $۳/۲۲۲۸ \times ۱۰^{-۸}$ و کمترین آن $۴۵۳/۸۳$ پاسکال است.

در شکل ۱۶، تغییر شکل کلی آب‌بند مکانیکی ساخته‌شده نشان داده شده است. با توجه به شکل، مقدار تغییر شکل بیشینه $۱/۴۸۵۴ \times ۱۰^{-۶}$ و مقدار کمینه آن صفر است.

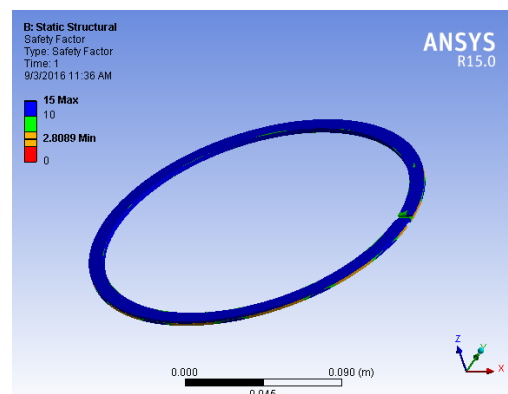
مقادیر ماکزیمم و مینیمم ضریب اطمینان آب‌بند مکانیکی ساخته‌شده در شکل ۱۷ نشان داده شده است. ضریب اطمینان محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار با شرایط مرزی مشابه شرایط کاری قطعه، عدد $۱/۳۴$ را نشان می‌دهد.

۳-۴- نتایج حاصل از تحلیل خستگی آب‌بند مکانیکی ساخته‌شده عمر آب‌بند مکانیکی ساخته‌شده در شرایط بارگذاری خستگی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. با توجه به نوع بارگذاری و شرایط مرزی اعمالی، عمر ماکزیمم ۱۰^7 سیکل و عمر مینیمم $۱/۸۳ \times ۱۰^6$ سیکل است. آب‌بندهای مکانیکی لامینار خط ریخته‌گری مداوم مجتمع فولاد مبارکه، هر شش ماه تعویض می‌شوند. مقادیر خرابی پس از اعمال عمر طراحی در شکل ۱۹ نشان می‌دهد که خرابی کمتر از یک بوده و آب‌بند از لحاظ خستگی ایمن است.

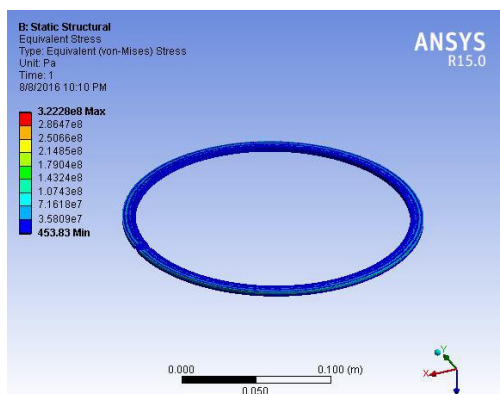
تأثیر تغییر بارگذاری از $۰/۵$ تا $۱/۵$ برابر بارگذاری فعلی روی عمر آب‌بند مکانیکی ساخته‌شده در نمودار ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که از نمودار ۴ استنتاج می‌شود، با تغییر بارگذاری تا حدود $۰/۶$ بارگذاری فعلی، عمر آب‌بند ۱۰^7 سیکل و بعد از آن عمر به‌صورت نزولی کاهش می‌یابد.



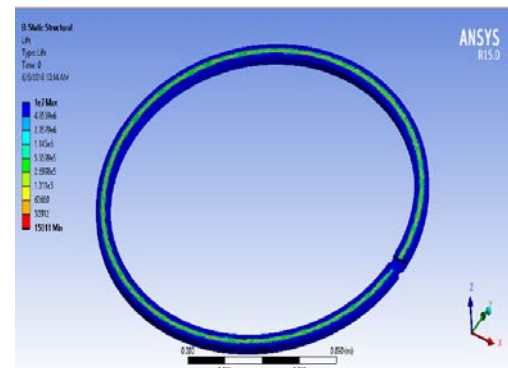
شکل ۱۲) تغییر شکل کلی آب‌بند مکانیکی لامینار در شرایط بارگذاری استاتیک



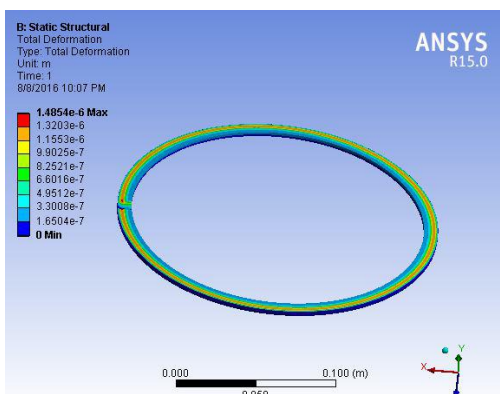
شکل ۱۳) ضریب اطمینان آب‌بند مکانیکی لامینار در شرایط بارگذاری استاتیک



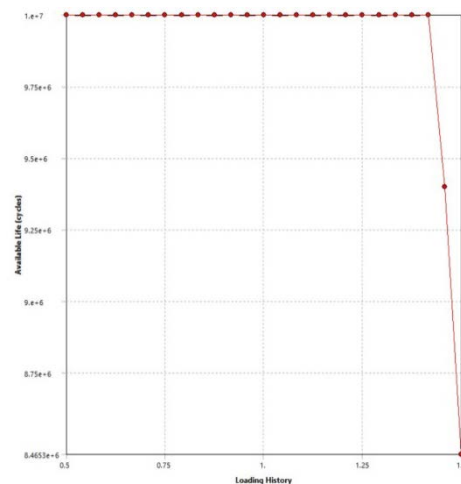
شکل ۱۵) توزیع تنش (وون‌میسز) آب‌بند مکانیکی ساخته‌شده در شرایط بارگذاری استاتیک



شکل ۱۴) عمر آب‌بند مکانیکی لامینار در شرایط بارگذاری خستگی



شکل ۱۶) تغییر شکل کلی آب‌بند مکانیکی ساخته‌شده در شرایط بارگذاری استاتیک



نمودار ۳) تأثیر تغییر بارگذاری روی عمر آب‌بند مکانیکی لامینار

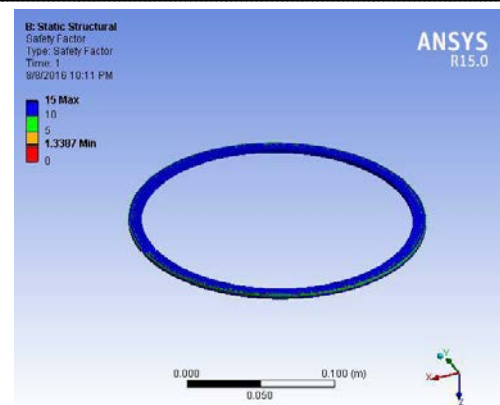
نتایج تحلیل خستگی، ماکزیمم عمر دو قطعه را 10^7 سیکل نشان می‌دهد. آببند مکانیکی ساخته شده با اعمال 0.6 بارگذاری اصلی و آببند مکانیکی لامینار با اعمال 0.4 بارگذاری اصلی، توانایی تحمل این تعداد سیکل را دارند.

بومی سازی آببند مکانیک لامینار براساس نتایج مکانیکی ذکر شده در این تحقیق با توجه به تحقیقات سایر محققان، دارای مشخصات مکانیکی قابل قبولی است. روش‌شناس و همکاران [13] در سال ۱۳۸۷ تأثیر نورد سرد چندمرحله‌ای و آنیل را بر ایجاد ساختار ریزدانه و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن 304 مورد بررسی قرار دادند. آنها به منظور دستیابی به دانه‌های بسیار ریز آستنیت در فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304 ، اثر اعمال دو فرآیند مختلف عملیات نورد سرد و آنیل را مورد بررسی دادند. در فرآیند اول، نمونه‌ها را تحت چهار مرحله نورد سرد و آنیل و در فرآیند دوم، نمونه‌ها را تحت دو مرحله نورد سرد و آنیل قرار دادند. سپس بررسی‌های ریزساختاری، سختی‌سنجی و همچنین آزمون کشش را روی نمونه‌ها انجام دادند. آنها دریافتند که تأثیر فرآیند دوم بر ریزکردن دانه‌های آستنیت بیشتر از فرآیند اول است، به طوری که دانه‌هایی با اندازه یک میکرومتر حاصل شد و سختی حاصل از فرآیند دوم را نیز بیشتر به دست آوردند. همچنین دریافتند که با حفظ داکتیلیته (شکل‌پذیری) مناسب در هر دو فرآیند، استحکام تسلیم و استحکام نهایی فولاد 304 پس از فرآیند دوم به مقدار 400 مگاپاسکال نسبت به حالت آنیل محلولی افزایش یافت، در حالی که این مقدار در فرآیند اول حدود 300 مگاپاسکال بوده است. همچنین رینگ ساخته شده در این تحقیق در مقایسه با خواص مکانیکی رینگ لامینار ساخت کشور آلمان از سطح تنش قابل قبولی برخوردار بود.

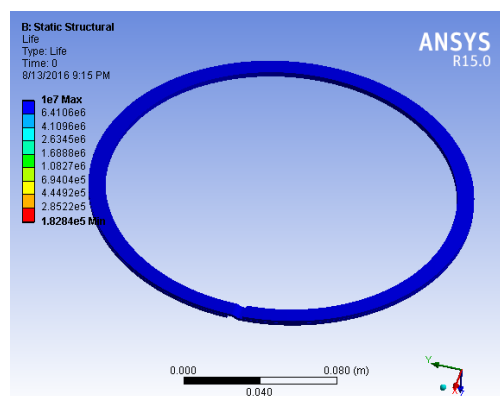
۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمون کوانتومتری فولاد به کاررفته در آببند مکانیکی لامینار، فولاد ضدزنگ آستنیتی شناسایی شد که نزدیک به استاندارد فولاد ضدزنگ DIN1.4571 بود. به همین منظور مفتولی به قطر 5 میلی‌متر با این استاندارد از ایتالیا تهیه شد و پس از آزمون کوانتومتری روی مفتول نشان داده شد که دو فولاد از نظر آلیاژ هم‌پوشانی نسبتاً مناسبی دارند. سپس روی مفتول تهیه شده، چهار مرحله نورد سرد صورت گرفت تا تسمه با مقطع $8/94$ در $1/57$ میلی‌متر به دست آید. نتایج آزمون کشش روی آببند مکانیکی لامینار و مفتول نورد شده به ترتیب استحکام نهایی $620/3$ و $594/1$ مگاپاسکال را گزارش کرد. بررسی ظاهری نمونه‌ای کشش نشان داد که شکست در دو نمونه شکست ترد بوده، با این تفاوت که مفتول نورد شده نسبت به آببند مکانیکی لامینار نرم‌تر بوده و درصد ازدیاد طول بیشتری داشته است.

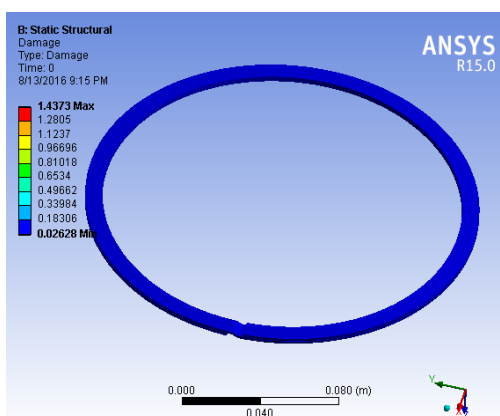
با توجه به هم‌پوشانی نتایج آزمون‌ها، مراحل ساخت تا تولید یک آببند بومی ادامه یافت. به همین منظور، طی شش مرحله مفتول نورد شده توسط دستگاه تراش از قالب ساخته شده کشیده شد تا شکل دایره‌ای آببند را بگیرد. سپس با استفاده از قالب سنبه ماتریس ساخته شده، پله مورد نظر روی آببند ایجاد شد. به منظور تحلیل تنش روی آببند مکانیکی لامینار و آببند مکانیکی ساخته شده، شرایط کاری و نیروهای اعمالی روی آببند مورد بررسی قرار گرفت. غلتک‌نورد ماشین ریخته‌گری مداوم تحت گشتاور $7345/86$ نیوتون در متر اعمالی از موتور سه فاز محرک آن و بار گسترده $73772/06$ نیوتون در متر ناشی از وزن مذاب در محل یاتاقان‌ها، شیب 0.19 درجه را نشان داد. به دلیل ناچیز بودن شیب



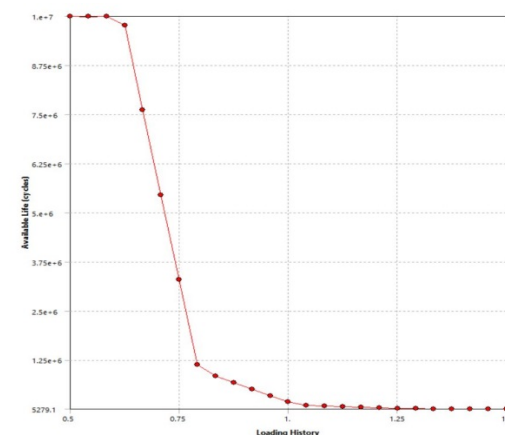
شکل ۱۷) ضریب اطمینان آببند مکانیکی لامینار در شرایط بارگذاری استاتیکی



شکل ۱۸) عمر آببند مکانیکی ساخته شده در شرایط بارگذاری خستگی



شکل ۱۹) خرابی آببند مکانیکی ساخته شده در شرایط بارگذاری خستگی



نمودار ۴) تأثیر تغییر بارگذاری روی عمر آببند مکانیکی ساخته شده

- 4- Archer PJ, Thomas TG, Coleman GN. Direct numerical simulation of vortex ring evolution from the laminar to the early turbulent regime. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008;598:201-226.
- 5- Zhou J, Fan H, Shao C. Experimental study on the hydrodynamic lubrication characteristics of magnetofluid film in a spiral groove mechanical seal. *Tribology International*. 2016;95:192-198.
- 6- Salant RF, Shen D. Hydrodynamic effects of shaft surface finish on lip seal operation. *Tribology Transactions*. 2002;45(3):404-410.
- 7- Nathan GK, Jones WJD. The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions. *Wear*. 1966;9(4):300-309.
- 8- Mao J, Wang W, Liu Y. Experimental and theoretical investigation on the sealing performance of the combined seals for reciprocating rod. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012;26(6):1765-1772.
- 9- Chen J, Young B. Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures. *Engineering Structures*. 2006;28(2):229-239.
- 10- Eskandari M, Najafizadeh A, Kermanpur A. Effect of strain-induced martensite on the formation of nanocrystalline 316L stainless steel after cold rolling and annealing. *Materials Science and Engineering A*. 2009;519(1-2):46-50.
- 11- Ambu R, Bertetto AM, Mazza L. Re-design of a guide bearing for pneumatic actuators and life tests comparison. *Tribology International*. 2016;96:317-325.
- 12- Horve L. Shaft seals for dynamic applications. New York: Marcel Dekker; 1996.
- 13- Raveshnas M, S Abbasi, K Zanganeh. Investigating the Effect of Multi-stage Cold Rolling and Annealing on the Finite Structural Properties and Mechanical Properties of Sintering Steel 304. Second Conference of the Association of Metallurgy Engineers and Iranian Casting Society. Karaj: Islamic Azad University; 2008. [Persian]

محاسبه شده، تنها گشتاور اعمالی به غلتک روی ۲۴ آببند مکانیکی لامینار وارد می شود. نیروهای شبه استاتیک وارده بر آببند، فشار $P_H=225$ (پاسکال) و $P_{Gr}=220$ (بار) و گشتاور $TS=306/07$ (نیوتون در متر) هستند. نتایج حاصل از تحلیل استاتیک روی آببند مکانیکی لامینار و آببند مکانیکی ساخته شده نشان داد که بیشترین تنش براساس تئوری وون میسر به ترتیب $1/39 \times 10^8$ پاسکال و $3/2 \times 10^8$ پاسکال و ضریب اطمینان نیز برای هر کدام به ترتیب $2/808$ و $1/338$ است. نهایتاً با انجام تحلیل خستگی، بیشترین عمر دو قطعه 10^6 سیکل محاسبه شد.

تشکر و قدردانی: از شرکت صنعتی فولاد مبارکه اصفهان تشکر و قدردانی می شود.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: مجید غیوری (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ مهدی رشوند (نویسنده دوم)، تحلیلگر آماری (۵۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

منابع

- 1- Liu H, Han M. A fault diagnosis method based on local mean decomposition and multi-scale entropy for roller bearings. *Mechanism and Machine Theory*. 2014;75:67-78.
- 2- Oswald FB, Zaretsky EV, Poplawski JV. Effect of internal clearance on load distribution and life of radially loaded ball and roller bearings. *Tribology Transactions*. 2012;55(2):245-265.
- 3- Bodine DC, Dorsey WC. Composite construction board with load bearing properties U.S. patent no. 6,177,180 [Internet]. Washington DC: U.S. Patent and Trademark Office; 2001 [cited 2019 Jan 01]. Available from: <https://patents.google.com/patent/US6177180>.