



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir



Society of
Manufacturing
Engineering of
Iran

Study the Effect of Speed, Pressure, and Friction Coefficient on the Distribution of Contact Stresses

Research Article

Farshad Nazari¹ , Hossein Hosseini Nik²

 [10.22067/jacsm.2025.90513.1294](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.90513.1294)

Abstract-Contact stresses in moving systems have a significant effect on the contact areas. Various factors affect contact stresses, and fatigue, wear and failure are the results of these stresses. In this research, the effects of speed, pressure, and friction coefficient parameters on contact stresses in a linear sliding system have been investigated. In this regard, a cylinder-piston set was simulated and the results were validated using experimental data. The parameters were selected at three different levels and the experiments were designed using the response surface method. The results of the simulations were evaluated using the analysis of variance method. The investigations revealed that the parameters of speed, friction coefficient and pressure have a significant effect on contact stresses, and speed has the greatest effect, while pressure has the least effect on surface stresses. The evaluations also showed that surface stresses are formed from the interaction of thermal and mechanical stresses, and the contribution of thermal stresses is higher than mechanical stresses

Keywords: Contact Stresses, Linear Sliding Motion, Finite Element Method, Response Surface Method, ANOVA.

1. Introduction

In linear motion systems, contact stresses are among the most influential factors affecting wear, fatigue, and failure [1-4]. These stresses develop through both thermal and mechanical mechanisms in the contact zone, and cause mechanical damage and decrease system performance and efficiency [5,6]. In this study examines the three parameters - speed, pressure, and friction coefficient - from the dual perspective of mechanical and thermal stresses. The research methodology employed finite element method (FEM), and the results validated with experimental data. Results were investigated using ANOVA analysis to evaluate the effect of the studied parameters on the maximum contact stresses.

2. Materials and Methods

To investigate the effects of speed, pressure, and friction

coefficient on contact stresses, a cylinder-piston assembly was simulated. The various components of this assembly along with their material specifications are illustrated in Figure 1.

To evaluate parameter effects, three operational levels were considered for each parameter. The design of experiments was configured using Response Surface Method (RSM), with results subsequently analyzed through Analysis of Variance (ANOVA). The numerical simulation was performed using ABAQUS software employing coupled thermo-mechanical analysis. The finite element model utilized CAX4RT elements. A refined mesh density of 0.5 mm was implemented in sensitive contact regions. Figure 2 illustrates both the meshing configuration and applied boundary conditions.

3. Results and Discussion

To validate the finite element analysis results, the model was evaluated based on two critical parameters, The generated temperature in the contact zone and induced contact stresses. The temperature obtained in the simulation is 64.1°C, which represents an 8.7% deviation from the experimental measurement of 70.2°C. This is indicated that the model has an acceptable accuracy. Also, Based on the technical documentation and material strength of PTFE 25% carbon, it can be concluded that the failure of the pressure ring is not due to surface stresses or mechanical yielding, as the maximum stress (5.34 MPa) remains below the material's tensile strength (18 MPa). Investigation of results shows the simulation results have a positive agreements with the field observation and performance data. The analysis of variance (ANOVA) results indicated that speed, with the smallest p-value, has the most significant influence on contact stresses. Due to the sinusoidal motion of the piston, increasing speed leads to higher acceleration, which, according to Newton's second law, increases force and consequently stress. Additionally, higher speed results in more work being

* Manuscript received 2024 October 28, Revised 2025 April 15, Accepted 2025 May 6

¹ Corresponding author. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: F.nazari@scu.ac.ir

² BSc. Student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

performed in the same time period, leading to greater energy dissipation. This energy dissipation affects the system by generating heat and thermal stresses [7].

The friction coefficient represents the second most significant parameter affecting surface stresses. An increase in friction coefficient leads to higher frictional forces, which subsequently elevate both shear and surface

stresses at the contact interface. Furthermore, increased friction results in greater energy dissipation, causing temperature rise in components. This temperature increase, according to the thermal expansion coefficients and engineering principles, induces additional thermal stresses [8].

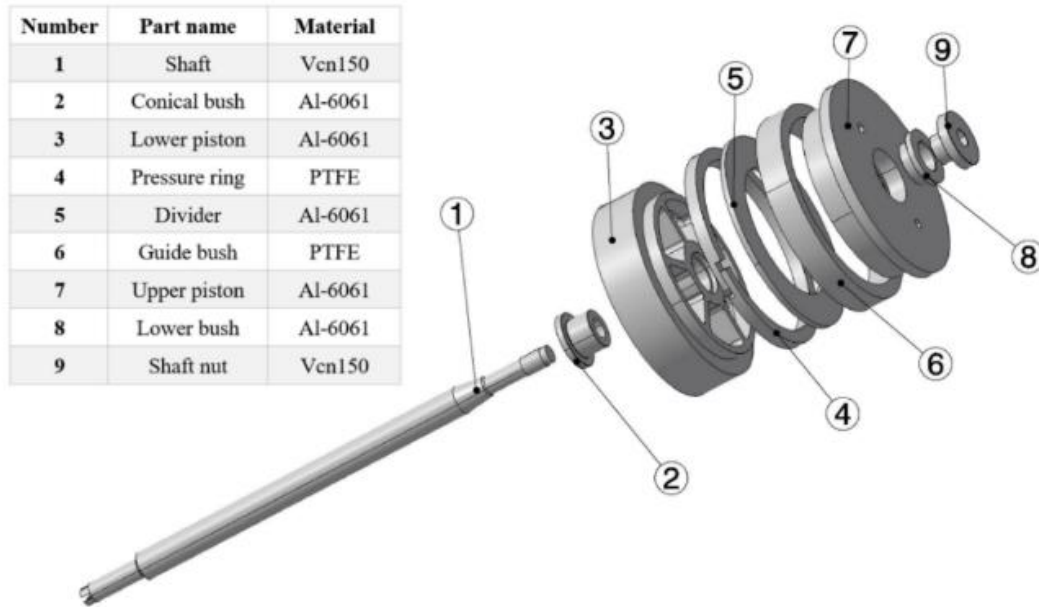


Figure 1- The exploded view and components of the piston assembly

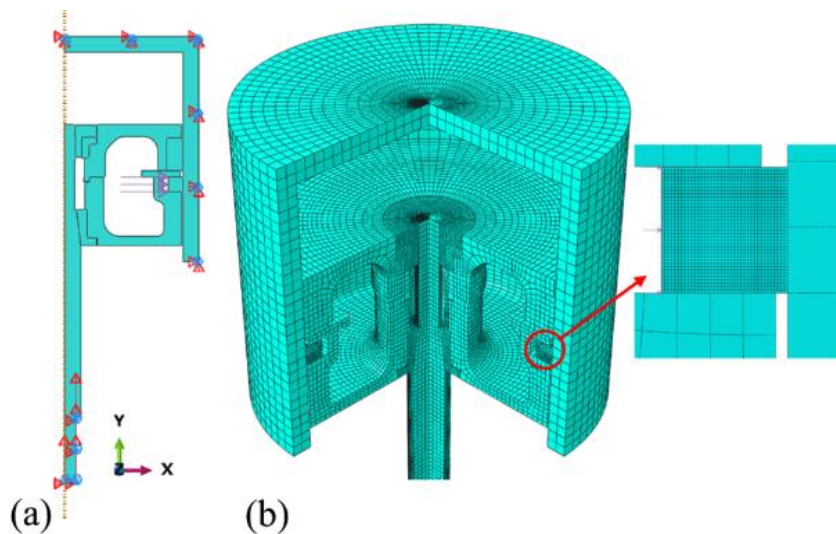


Figure 2- (a) Boundary conditions and position of loads, (b) Meshing of the cylinder-piston assembly

Pressure constitutes the third influential factor on contact stresses. Elevated pressure increases normal surface forces, thereby raising the normal stress applied to the assembly. This increased normal force simultaneously enhances frictional forces, which in turn intensifies thermal stresses. The increasing pressure improves the quality of the cylinder-piston interface contact, and promotes heat transfer efficiency. Consequently, this effect results in a comparatively lower temperature rise gradient relative to other operational parameters.

Analysis of temperature and stress distributions reveals that under continuous high-speed operation, thermal stresses have significantly greater influence on contact stresses compared to normal and shear stresses. Figure 3 shows the comparison of contact stress contours and temperature distribution in the compression ring.

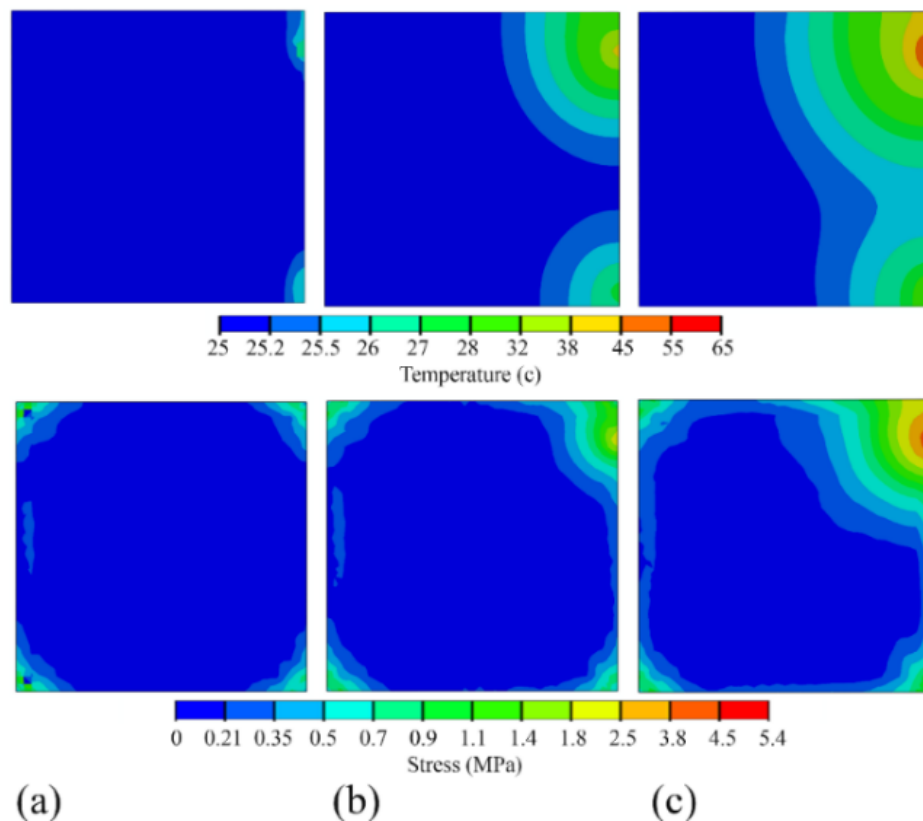


Figure 3- The trend of changes in contact stress to temperature on compression ring in test no. 2 at (a) 1 second, (b) 30 seconds, and (c) 60 seconds

5. Conclusions

This study investigated the effects of speed, pressure, and friction coefficient on contact stresses in a reciprocating system. The results are summarized as follows:

- Study the effect of speed showed that speed has the most influence on contact stresses. A 22% increase in speed resulted in over 80% growth in contact stresses.
- The friction coefficient was identified as the second most influential parameter. Higher friction coefficients increased shear stresses and energy dissipation, leading to elevated mechanical and thermal stresses in the contact zone.
- Increasing pressure enhances normal and shear stresses, it also improving contact quality and heat transfer, so thermal stresses reduces. Consequently, pressure exhibited the least effect compared to other parameters.
- Investigating the results showed, thermal stresses have a greater effect on contact stresses than stresses induced by normal and shear forces.

Reference

- [1] F. Hosseini, A. H. Meghdadi, M. Davazdah Emami, E. Mohseni, and N. Najari, "Umerical Simulation of Elbow Erosion with Circumferential Welding in Two-Phase Gas Flow," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 31, no. 2, pp. 141-156, 2020. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/fum-mech.v31i2.84757>
- [2] S. J. Lorenz, F. Sadeghi, H. K. Trivedi, L. Rosado, M. S. Kirsch, and C. Wang, "A continuum damage mechanics finite element model for investigating effects of surface roughness on rolling contact fatigue," *International Journal of Fatigue*, vol. 143, p. 105986, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105986>
- [3] R. Guan, D. Wang, W. Yu, C. Chen, and S. Yang, "An analysis of gear wear and micro-pitting evolution during contact fatigue," *Journal of Physics: Conference Series: IOP Publishing*, vol. 2825, no. 1, p. 012030, 2024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2825/1/012030>
- [4] M. Keshtgar, M. Shariati, and k. farhang dost, "Prediction of High Cycle Fatigue Life with Variable Loading Amplitude using Thermography Method," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 2, pp. 59-76, 2024. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.83002.1189>
- [5] W. D. Marscher, "Thermal versus mechanical effects in high speed sliding," *Wear*, vol. 79, no. 1, pp. 129-143, 1982. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(82\)90209-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(82)90209-5)
- [6] F. Nazari and H. Hosseini Nik, "Investigating the effect of speed, pressure, and friction coefficient on temperature in a linear sliding system," *Journal of Mechanical Engineering, University of Tabriz*, vol. 54, no. 2, pp. 109-115, 2024. (In Persian)

-
- [7] J. L. Meriam, L. G. Kraige, and J. N. Bolton, *Engineering mechanics: dynamics*. John Wiley & Sons, 2020.
 - [8] S.-M. Bae, K.-J. Seo, and D.-E. Kim, "Effect of friction on the contact stress of a coated polymer gear," *Friction*, vol. 8, pp. 1169-1177, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0363-6>
-



مطالعه تأثیر سرعت، فشار و ضریب اصطکاک بر توزیع تنش‌های تماسی*

مقاله پژوهشی

حسین حسینی نیک^(۱)فرشاد نظری^(۱)  10.22067/jacsm.2025.90513.1294

چکیده تنش‌های تماسی در سیستم‌های دارای حرکت تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نواحی تماس دارند. عوامل مختلفی بر تنش‌های سطحی اثرگذار هستند و خستگی، سایش و شکست از پیامدهای این تنش‌ها است. در این پژوهش بررسی تأثیر پارامترهای سرعت، فشار و ضریب اصطکاک بر تنش‌های تماسی در یک سیستم لغزشی خطی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا یک مجموعه سیلندر - پیستون شبیه‌سازی شد و نتایج با استفاده از داده‌های تجربی اعتبارسنجی گردید. پارامترها در سه سطح انتخاب شد و آزمایش‌ها با استفاده از روش پاسخ سطح طراحی شد. نتایج مدل‌سازی‌ها با روش تحلیل واریانس مورد ارزیابی قرار گرفت و بررسی‌ها نشان داد پارامترهای سرعت، ضریب اصطکاک و فشار تأثیر قابل توجهی بر تنش‌های سطحی دارند و از این میان سرعت بیشترین اثر را دارد و فشار کمترین تأثیر را می‌گذارد. همچنین ارزیابی‌ها نشان داد تنش‌های سطحی از تعامل تنش‌های حرارتی و مکانیکی شکل می‌گیرد و سهم تنش‌های حرارتی از تنش‌های مکانیکی بیشتر است.

واژه‌های کلیدی تنش‌های تماسی، حرکت لغزشی خطی، روش المان محدود، روش پاسخ سطح، آنالیز ANOVA.

مقدمه

بررسی تنش‌های زیر سطحی در جامدات الاستیک تراکم‌پذیر پرداختند و بیان کردند که در تماس بدون اصطکاک دو جسم، گرچه در سطح تماس فقط جابه‌جایی نرمال دیده می‌شود اما تانسور تنش القا شده در جسم می‌تواند مقادیر غیر صفر داشته باشد.

Zhang و همکارانش [8] به مطالعه تأثیر نسبت لغزش و تنش تماسی بر تغییرات ساختار مواد در ناحیه سطحی تماس مکانیزم چرخ - ریل پرداختند و نشان دادند که با افزایش تنش تماسی تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای از بین بردن نقص‌های سطحی کاهش می‌یابد. Hølemberg و همکارانش [9] به بررسی تأثیر ساختار سطحی مواد بر اصطکاک و سایش در تماس میان DLC (Diamond-like carbon) و فولاد پرداختند و نشان دادند در تماس‌های دارای دوران، ضریب اصطکاک نسبت به حرکت رفت

تنش‌های تماسی در سیستم‌های دارای حرکت تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نواحی تماس دارند. خستگی، سایش و شکست از جمله نتایجی هستند که حاصل از این تنش‌ها می‌باشند [4-1]. این امر به صورت تنش‌های حرارتی و مکانیکی در سیستم به وجود می‌آید و می‌تواند بر عملکرد، نگهداری و بازده مکانیزم‌ها تأثیرگذار باشند [5].

Deng و همکارانش [6] به بررسی تأثیر سرعت و نیرو بر رفتار تماسی ماده $\text{CoCrFeNiMo}_{0.2}$ در حرکت لغزشی در شرایط خشک پرداختند و نشان دادند در بارهای کم ($20 \text{ N} <$) سرعت و بار تأثیر معکوس بر ضریب اصطکاک دارند. همچنین نشان دادند پارامترهای حرکت تأثیر بسیار زیادی بر نرخ سایش ماده $\text{CoCrFeNiMo}_{0.2}$ دارند. Murugesan و همکارانش [7] به

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۸/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۲/۱۶ می‌باشد.

Email: F.nazari@scu.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

(۲) گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

ساینده به سایش اکسید شونده تبدیل می‌شود. Gomes و همکارانش [20] به بررسی تأثیر سرعت و دما بر رفتار تماسی در کامپوزیت کربن - کربن پرداختند و نشان دادند که با افزایش سرعت، مقاومت در برابر سایش بسیار کاهش می‌یابد. Nazari و Hosseini Nik [21] به بررسی تأثیر سرعت، فشار و ضریب اصطکاک بر دما در یک سیستم لغزشی خطی پرداختند و نشان دادند سرعت بیشترین تأثیر را بر تولید دما در سطوح تماس دارد. Sharifi Yalameh و Torabi [22] تأثیر سرعت و بار را بر لغزش سیال در روانکاری الاستوهیدرودینامیک مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که سرعت و بار تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر لغزش و ضریب اصطکاک دارد. Kouhbanani و Shafei [23] به مدل‌سازی و شبیه‌سازی نیروهای تماسی و اصطکاکی در بازوهای رباتیکی انعطاف‌پذیر پرداختند و رفتار دینامیکی سیستم، ارتعاشات عرضی، برخورد ها و شکل مودها بر روی تغییر شکل الاستیک لینک‌ها را ارزیابی کردند.

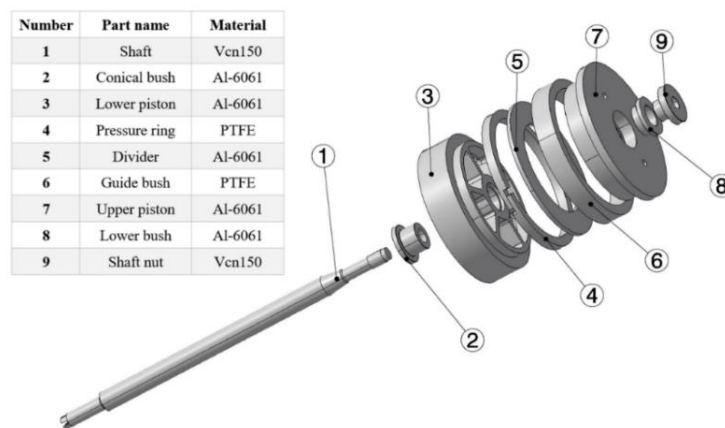
با توجه به پیشینه پژوهش بیان شده مشاهده می‌شود که در بررسی سطوح تماس، توزیع دما، سایش و ضریب اصطکاک بیشتر مورد توجه قرار گرفته و پارامترهای مؤثر بر ایجاد تنش در سطوح تماس نیاز به مطالعه بیشتر دارد. با توجه به اینکه مکانیزم لغزشی خطی در بسیاری از تجهیزات صنعتی مانند پمپ‌ها و کمپرسورهای پیستونی کاربرد دارد، در این پژوهش تأثیر پارامترهای سرعت، فشار و ضریب اصطکاک بر تنش‌های سطحی در یک کمپرسور پیستونی خطی مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل اینکه بارگذاری‌های مکانیکی و حرارتی دو عامل اصلی در شکل‌گیری تنش‌های سطحی می‌باشند، تأثیر هر سه پارامتر سرعت، فشار و ضریب اصطکاک از دو جنبه مکانیکی و حرارتی بر تنش‌های سطحی ارزیابی گردید. بدین منظور از روش المان محدود جهت شبیه‌سازی آزمایش‌ها استفاده شد و نتایج با استفاده از داده‌های تجربی اعتبارسنجی گردید. نتایج با استفاده از آنالیز ANOVA بررسی شد و تأثیر پارامترهای مورد مطالعه بر پیشینه تنش‌های تماسی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش تحقیق

به منظور بررسی میزان تأثیر پارامترهای سرعت، فشار و ضریب اصطکاک بر توزیع تنش روی سطوح تماس از شبیه‌سازی مجموعه سیلندر - پیستون یک کمپرسور خطی استفاده گردید.

و برگشتی خطی ۱۰٪ کمتر است. BAE و همکارانش [10] به بررسی اثر اصطکاک بر تنش تماسی چرخ‌دنده‌های پوشش داده شده با پلیمر پرداختند و نشان دادند که اصطکاک تأثیر قابل توجهی بر تنش‌های ایجاد شده دارد. Civarella و Decuzzi [11] به بررسی تنش ناشی از تماس صفحه‌ای دو عضو استوانه‌ای در شرایط بدون اصطکاک پرداختند و مدلی برای محاسبه توزیع تنش، ناحیه تنش و پیشینه پارامترهای تسلیم به عنوان تابعی از داده‌های ورودی ارائه دادند. He و همکارانش [12] به بررسی تنش برشی سطحی و تنش تماسی در مقیاس میکرو و ماکرو پرداختند و نشان دادند که در نتایج آزمون مقیاس ماکرو، تنش برشی ناشی از اصطکاک با متوسط فشار ناحیه تماس به صورت خطی افزایش می‌یابد. Abdullah و همکارانش [13] به بررسی تأثیر سرعت بر تنش‌های حرارتی سیستم تک‌صفحه‌ای کلاچ اصطکاکی پرداختند و بدین نتیجه رسیدند که در سیستم‌های اصطکاکی لغزشی مانند سیستم کلاچ و ترمز، سرعت تأثیر چشمگیری بر تنش‌های حرارتی دارد. Hussaini و Kennedy [14] به بررسی آنالیز مکانیکی - حرارتی سیستم‌های لغزشی پرداختند و نشان دادند که تنش‌های ایجاد شده در سطوح پوشش داده شده با کاهش بار و سرعت به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابند. Lin و همکارانش [15] به تحلیل لحظه‌ای دمای حاصل از تماس اصطکاکی دو صفحه پرداختند و نشان دادند هرچه مدول یانگ و سختی ماده بیشتر باشد، افزایش دما به ضریب اصطکاک (T/f) افزایش می‌یابد. Vijaywargiya و Green [16] به شبیه‌سازی و مطالعه المان محدود تنش تماسی میان دو استوانه پرداختند و نشان دادند که شکست در ناحیه تماس با اعمال ضریب اصطکاک تسریع می‌شود. Savaskan و Hakimoglu [17] به بررسی اثر سرعت لغزشی و فشار در تماس بدون روانکاری آلیاژ Zn-15Al-3Cu-1Si پرداختند و بیان کردند که افزایش فشار ناحیه تماس و سرعت سبب افزایش دمای کاری می‌گردد. همچنین بیان کردند که افزایش سرعت تأثیر چشمگیری بر افزایش اصطکاک ندارد. Li و Chen [18] به مطالعه تبدیل انرژی در حرکت‌های لغزشی پرداختند و نشان دادند که سرعت و بارهای اعمال شده تأثیر زیادی بر توزیع انرژی دارند. Li و همکارانش [19] به بررسی تأثیر دما بر سایش در آلیاژهای کم‌کربن و مقاوم به سایش پرداختند و نشان دادند سایش در آلیاژهای HTP و NM400 در بازه ۵۰۰ - ۳۰۰ از نوع سایش

شبهه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه شد. شبهه‌سازی‌ها در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شد و از یک مدل دینامیکی - حرارتی با تقارن محوری استفاده گردید. مدل مورد نظر با المان CAX4RT مش‌بندی شد و آنالیز حساسیت به منظور ارزیابی استقلال نتایج از مش روی مدل انجام گرفت. بر این اساس کوچک‌ترین مش در محل تماس رینگ فشاری با سیلندر با اندازه المان 0.5 mm در نظر گرفته شد تا بیشترین دقت را در محاسبه نتایج در پی داشته باشد. شکل (۲) مدل المان محدود، شرایط مرزی و ساختار مش‌بندی مجموعه پیستون اسمبلی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ نمای انفجاری و اجزای مجموعه پیستون

جدول ۱ خواص مکانیکی مواد استفاده شده در مجموعه پیستون

نام ماده/خواص	VCN 150	PFTE (25% carbon)	Al 6061	GJL 350
مدول الاستیک (GPa)	۲۰۰	۱/۳	۷۰	۱۴۰
ضریب پواسون	۰/۳۲	۰/۴	۰/۳۲۵	۰/۲۵۵
استحکام کششی (MPa)	۱۶۵۰	۱۸	۱۰۸	۲۶۰
چگالی (Kg/m^3)	۷۷۹۰	۲۰۸۰	۲۷۱۰	۷۲۵۰
انبساط حرارتی ($1/\text{K}$)	$1/27\text{E}-5$	$10/7\text{E}-5$	$2/4\text{E}-5$	$1/2\text{E}-5$
رسانایی حرارتی (W/m.K)	۳۷	۰/۷	۱۶۵	۴۲

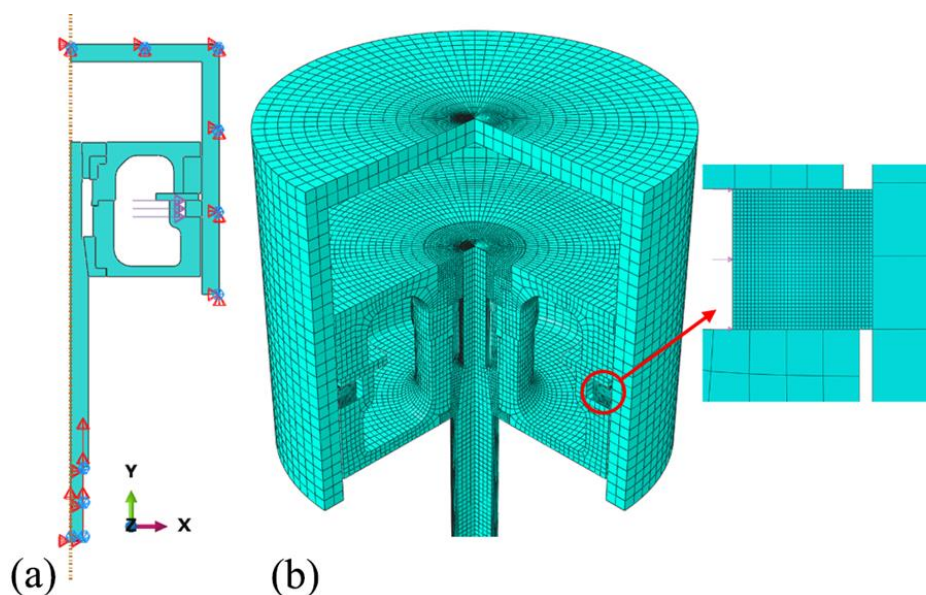
جدول ۲ مقادیر پارامترهای مورد مطالعه و شرایط کاری کمپرسور

پارامتر	کمینه	شرایط کاری	بیشینه
سرعت (rpm)	۵۳۰	۵۹۰	۶۵۰
فشار (kPa)	۲/۴۵۷	۲/۷۳۰	۳/۰۰۳
ضریب اصطکاک	۰/۰۳۱۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۸

بخش‌های مختلف مجموعه سیلندر - پیستون در شکل (۱) و خواص فیزیکی و مکانیکی مواد مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

برای بررسی تأثیر عامل‌های سرعت، ضریب اصطکاک، و فشار بر توزیع تنش، برای هر عامل سه سطح مختلف در نظر گرفته شد. از روش پاسخ سطح برای طراحی جدول آزمایش‌ها استفاده شد و نتایج با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۲) شرایط کاری کمپرسور و بازه مورد مطالعه برای هر پارامتر را نشان می‌دهد.

جهت بررسی تأثیر پارامترهای بیان شده بر توزیع تنش، از مدل‌سازی عددی بهره گرفته شد و به منظور اعتبارسنجی، نتایج



شکل ۲ (a) شرایط مرزی و محل قرارگیری نیروها و تکیه‌گاه، (b) مش‌بندی مجموعه سیلندر - پیستون

می‌باشد.

نتایج و بحث

جدول ۳ جدول طراحی آزمایش و نتایج به دست آمده از مدل المان محدود

شماره	ضریب اصطکاک (u)	فشار (kPa)	سرعت (rpm)	تنش (MPa)
۱	۰/۰۳۵	۳/۰۰۳	۵۹۰	۴/۷۴
۲	۰/۰۳۵	۳/۰۰۳	۶۵۰	۵/۳۱
۳	۰/۰۳۱۵	۲/۷۳۰	۶۵۰	۳/۹۵
۴	۰/۰۳۵	۲/۴۵۷	۶۵۰	۳/۳۵
۵	۰/۰۳۵	۳/۰۰۳	۵۳۰	۲/۸۸
۶	۰/۰۳۵	۲/۷۳۰	۵۹۰	۵/۳۴
۷	۰/۰۳۱۵	۲/۴۵۷	۵۹۰	۱/۴۸
۸	۰/۰۳۱۵	۳/۰۰۳	۵۹۰	۲/۷۴
۹	۰/۰۳۸۵	۲/۷۳۰	۵۳۰	۳/۲۵
۱۰	۰/۰۳۸۵	۲/۷۳۰	۶۵۰	۵/۸۷
۱۱	۰/۰۳۱۵	۲/۷۳۰	۵۳۰	۱/۸۲
۱۲	۰/۰۳۸۵	۲/۴۵۷	۵۹۰	۴/۱۵
۱۳	۰/۰۳۵	۲/۴۵۷	۵۳۰	۱/۲۰

ارزیابی داده‌های حاصل از مدل‌سازی‌های المان محدود و تحلیل نتایج به روش ANOVA نشان داد با توجه به اینکه مقدار P-value هر پارامتر کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، هر سه پارامتر سرعت، فشار و ضریب اصطکاک تأثیر قابل توجهی بر تنش‌های ناشی از

در این مطالعه مدل ابتدا مورد اعتبارسنجی قرار گرفت و بدین منظور از ارزیابی دما و مقایسه تنش با داده‌های تجربی بهره گرفته شد. در این راستا، شبیه‌سازی با استفاده از پارامترهای کاری مجموعه انجام گرفت و دمای به دست آمده و بیشینه تنش در قطعه رینگ فشاری با مقادیر تجربی مقایسه شد. مطالعه تغییرات دما نشان داد در شرایط کاری بیشینه دمای رینگ فشاری ۶۴/۱ درجه سانتی‌گراد بوده در حالی که در بررسی‌های میدانی مقدار ۷۰/۲ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. مقایسه مقادیر دما میزان خطای ۸/۷٪ را نشان می‌دهد که بیانگر آن است که مدل دارای دقت قابل قبولی است. همچنین با توجه به استحکام ۲۵٪ PTFE و carbon و ارزیابی مدارک فنی می‌توان دریافت که عامل خرابی رینگ فشاری، در نتیجه تنش‌های سطحی و تسلیم مکانیکی نیست و همواره بیشینه تنش آن از استحکام کششی ماده کمتر است. بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد بیشینه تنش در رینگ فشاری ۵/۳۴ MPa است که از استحکام کششی ماده (۱۸ MPa) کمتر است و با داده‌ها و شواهد میدانی از عملکرد دستگاه مطابقت دارد. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در جدول (۳) نمایش داده شده است. وجود عواملی از جمله خطاهای اندازه‌گیری، خطاهای ناشی از مدل‌سازی المان محدود و ساده‌سازی‌های انجام شده، علت وجود اختلاف میان نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی

اصطکاک از دو جنبه مکانیکی و حرارتی بر تنش‌های سطحی مورد بررسی قرار گرفتند.

با توجه به آنچه بیان شد مؤثرترین پارامتر بر توزیع تنش سطحی، سرعت است. از نظر سینماتیک، حرکت پیستون سینوسی است و حرکتی شتاب‌دار دارد. هرچه سرعت دستگاه بیشتر باشد شتاب در نقاط مرگ بالا و پایین پیستون نیز بیشتر است. با در نظر گرفتن قانون دوم نیوتون می‌توان بیان کرد با ثابت بودن جرم در این سیستم هرچه شتاب وارد به جسم بیشتر باشد نیروی وارد شده به مجموعه نیز بیشتر است. بنابراین، افزایش سرعت سبب افزایش نیرو و تنش وارد شده به مجموعه پیستون و رینگ فشاری خواهد شد [27]. معادله (۲) روابط قانون دوم نیوتن و ارتباط آن با سرعت را نشان می‌دهد که در آن F نیرو، m جرم، a شتاب، dv/dt نرخ تغییرات سرعت را نشان می‌دهد. همچنین با در نظر گرفتن خواص سطح و وجود اصطکاک بخشی از انرژی به گرما تبدیل می‌شود و سبب افزایش دما در قطعات می‌گردد. با توجه به ضریب انبساط حرارتی، قطعات با افزایش دما تمایل به افزایش حجم دارند که با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی این امر سبب ایجاد تنش در آن‌ها می‌گردد. لذا در مجموعه سیلندر - پیستون، افزایش سرعت سبب افزایش دما و در نتیجه افزایش تنش‌های حرارتی خواهد شد. شکل (۳) نمودار خطی و کانتور بیشینه تنش ناشی از تأثیر عوامل مکانیکی و حرارتی سرعت حرکت بر تنش‌های سطحی را نشان می‌دهد.

$$\left. \begin{matrix} F = ma \\ a = \frac{dv}{dt} \end{matrix} \right\} F = m \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

تماس دارند. میزان تأثیر پارامترها بر توزیع تنش ناحیه تماس در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج، سرعت با مقدار $P\text{-value}$ ۰/۰۰۱۶ بیشترین تأثیر را بر تنش دارد و ضریب اصطکاک و فشار به ترتیب با $P\text{-value}$ های ۰/۰۰۴۱ و ۰/۰۲۸۲ دارای اثرگذاری کمتری می‌باشند.

بررسی مدل‌های مختلف عددی نشان داد مدل خطی منطبق‌ترین رابطه برای پیش‌بینی و محاسبه تنش تماسی است و معادله (۱) ارتباط میان پارامترهای سرعت، فشار و ضریب اصطکاک با تنش ناشی از تماس را نشان می‌دهد. در این معادله، A ضریب اصطکاک، B فشار و C سرعت است که با توجه به نتایج ارزیابی ارائه شده در جدول (۵)، این معادله از دقت قابل قبولی برخوردار است. با توجه به جدول (۵)، $P\text{-value}$ رابطه (۱) ۰/۰۰۱۱ است که از مقدار مرجع کمتر است و نشان می‌دهد که این معادله مؤثر می‌باشد. همچنین بزرگ‌تر بودن مقدار سیگنال به نویز (۱۰/۵۲) از مقدار مرجع (۴) و کمتر بودن اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی (۰/۰۳۶) از مقدار مرجع (۰/۲) قابل قبول بودن معادله (۱) را تأیید می‌کند.

$$\text{Stress} = 2.86321\text{E}08(A) + 2512.82051(B) + 19439.58333(C) - 2.48061\text{E}07 \quad (1)$$

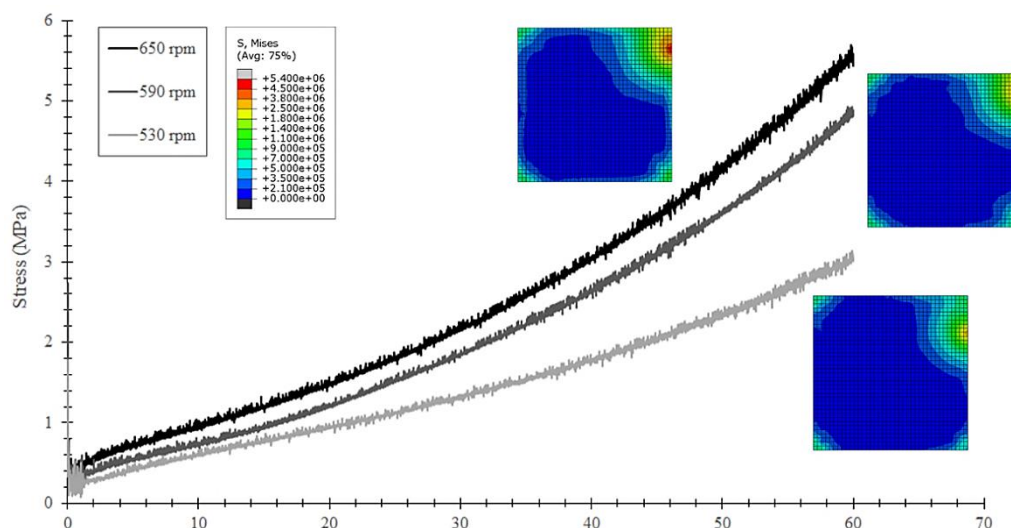
مطالعه نتایج شبیه‌سازی‌های المان محدود و پژوهش‌های مرتبط نشان می‌دهد تنش‌های ناشی از بارگذاری‌های مکانیکی و حرارتی دو عامل اصلی در شکل‌گیری تنش‌های سطحی می‌باشند [24-26]. از این رو تأثیر هر سه عامل سرعت، فشار و ضریب

جدول ۴ میزان تأثیر پارامترها بر توزیع تنش در سطح

source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value	
Model	۲/۲۶۸E۱۳	۳	۷/۵۶۱E۱۲	۱۳/۶۹	۰/۰۰۱۱	Significant
A-friction	۸/۰۳۴E۱۲	۱	۸/۰۳۴E۱۲	۱۴/۵۵	۰/۰۰۴۱	
B-pressure	۳/۷۶۵E۱۲	۱	۳/۷۶۵E۱۲	۶/۸۲	۰/۰۲۸۲	
C-speed	۱/۰۸۸E۱۳	۱	۱/۰۸۸E۱۳	۱۹/۷۱	۰/۰۰۱۶	

جدول ۵ نتایج ارزیابی معادله ۱

	مقدار واقعی	مقدار مرجع	
P-value	۰/۰۰۱۱	≥ 0.05	significant
سیگنال به نویز	۱۰/۵۲	≤ 4	significant
اختلاف Adj.R2 و Pre.R2	۰/۰۳۶۶	≥ 0.2	significant
میانگین خطای رابطه ۱ نسبت به مقادیر المان محدود	۱۵/۴ %		



شکل ۳ نمودار خطی و کانتور بیشینه تنش تماسی ناشی از اثر سرعت در فشار ۳/۰۰۳ kPa و ضریب اصطکاک ۰/۰۳۵

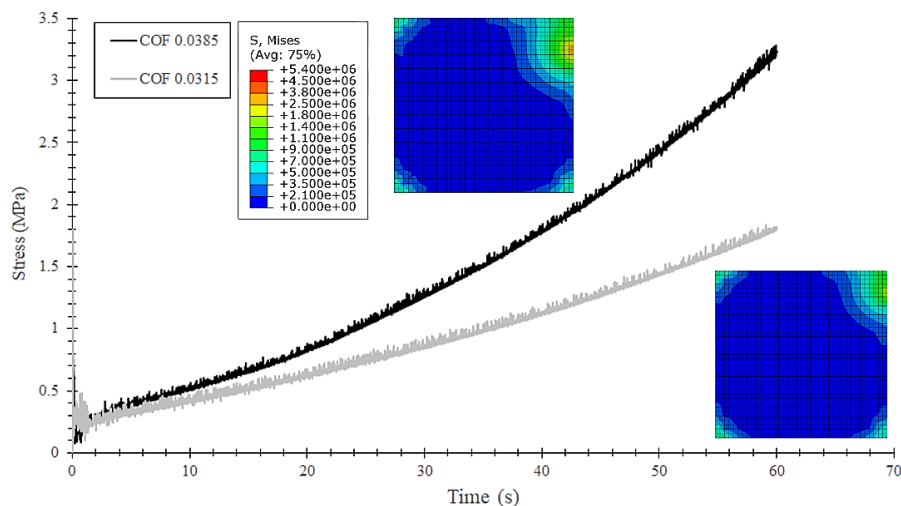
بر سطح افزایش می‌یابد که سبب افزایش تنش‌های نرمال می‌گردد. با توجه به رابطه (۳) افزایش فشار سبب افزایش نیروی اصطکاک می‌شود که در نتیجه آن تنش‌های برشی در سطح تماس افزایش می‌یابد. همچنین افزایش نیروی اصطکاک سبب افزایش گرمای تولید شده و در نتیجه آن ایجاد تنش‌های حرارتی در سطوح تماس می‌گردد. اما از لحاظ رسانایی گرمایی، افزایش فشار در ناحیه تماس سبب بهبود کیفیت تماس و انتقال حرارت می‌شود که این امر شیب رشد تنش‌های حرارتی را کاهش می‌دهد. شکل (۵) تأثیر فشار بر تنش سطحی را به صورت نمودار خطی و کانتور بیشینه تنش نمایش می‌دهد.

در شرایط وجود حرکت پیوسته به خصوص با سرعت‌های بالا می‌توان بیان کرد تنش‌های حرارتی نسبت به تنش‌های ناشی از نیروهای نرمال و برشی تأثیر بسیار بیشتری بر تنش‌های سطحی دارند. این موضوع با توجه به شیب نمودارها در تصاویر ۳ - ۵ قابل مشاهده است زیرا تنش سطحی اولیه همواره ناشی از بارگذاری نیرویی است اما تداوم روند حرکت پیستون و افزایش دما سبب رشد قابل توجه تنش‌های سطحی می‌گردد که نشان دهنده اهمیت و تأثیر بسیار تنش‌های ناشی از افزایش دما می‌باشد. شکل (۶) روند تغییرات تنش سطحی نسبت به دما را بر روی رینگ فشاری نمایش می‌دهد.

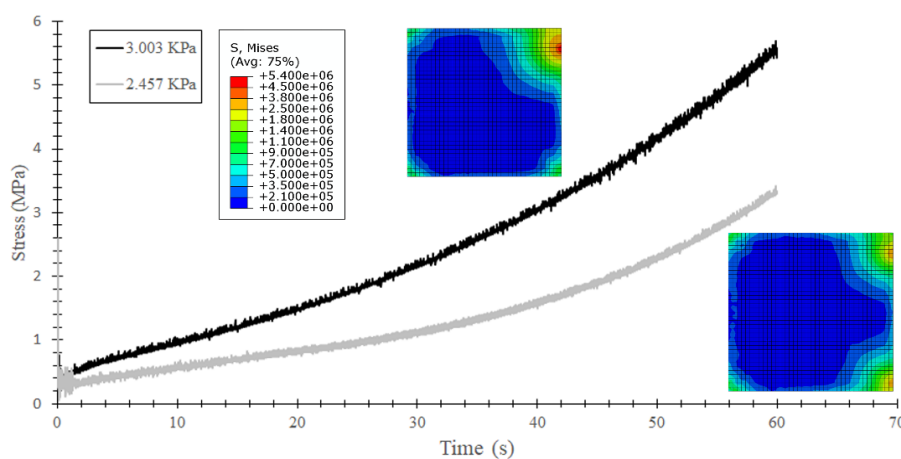
ضریب اصطکاک دومین عامل اثرگذار بر تنش‌های سطحی است. افزایش ضریب اصطکاک با توجه به رابطه (۳) سبب افزایش نیروی اصطکاک می‌گردد که این عامل با تأثیر بر سطح تماس سبب افزایش تنش‌های برشی و سطحی خواهد شد. در طرف دیگر، افزایش اصطکاک با افزایش اتلاف انرژی سبب افزایش دمای قطعات می‌شود که با توجه به ضریب انبساط حرارتی و روابط مهندسی سبب افزایش تنش‌های حرارتی می‌گردد. این موضوع در سایر مطالعات انجام شده نیز اشاره شده است [10]. در رابطه (۳) تأثیر ضریب اصطکاک بر افزایش تنش‌های سطحی نشان داده شده که در آن N نیروی عمود بر سطح حاصل از آب‌بندی، μ ضریب اصطکاک، F_f نیروی اصطکاک، A مساحت تماس و τ تنش برشی است. تأثیر عوامل مکانیکی و حرارتی ناشی از اصطکاک بر تنش‌های سطحی در شکل (۴) به صورت نمودار و کانتور بیشینه تنش نمایش داده شده است.

$$\left. \begin{aligned} F_f &= \mu N \\ \tau &= \frac{F_f}{A} \end{aligned} \right\} \tau = \frac{\mu N}{A} \quad (3)$$

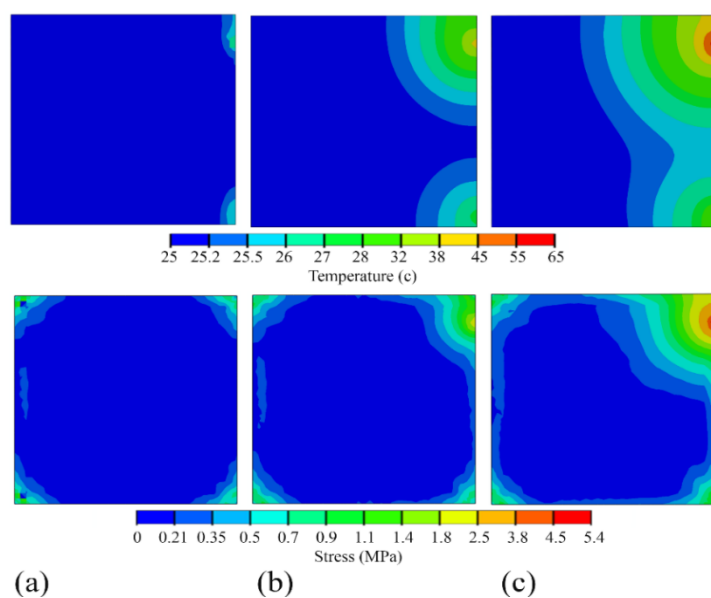
همان طور که بیان شد، فشار تأثیر کمتری نسبت به سرعت و ضریب اصطکاک دارد. فشار به صورت مستقیم تنش‌های برشی و نرمال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش فشار، نیروی عمود



شکل ۴ نمودار خطی و کانتور بیشینه تنش سطحی ناشی از اثر اصطکاک در فشار ۲/۷۳ kPa و سرعت ۶۵۰ rpm



شکل ۵ نمودار خطی و کانتور بیشینه تنش تماسی ناشی از اثر فشار در ضریب اصطکاک ۰/۰۳۵ و سرعت ۶۵۰ rpm



شکل ۶ روند تغییرات تنش سطحی نسبت به دما روی رینگ فشاری در آزمون شماره دو و زمان‌های (a) ۱ ثانیه، (b) ۳۰ ثانیه و (c) ۶۰ ثانیه

محور	shaft	
بوش مخروطی	conical bush	
پیستون پایین	lower piston	
رینگ فشاری	pressure ring	
جداکننده	divider	
بوش راهنما	guide bush	
پیستون بالا	upper piston	
بوش پایین	lower bush	
مهره انتهای محور	shaft nut	

نتیجه‌گیری

تنش‌های تماسی از فاکتورهای تأثیرگذار بر سایش، شکست و کیفیت پوشش‌های مختلف فلزی و پلیمری می‌باشند و پارامترهای مختلفی بر تنش‌های تماسی اثرگذارند. در این پژوهش تأثیر پارامترهای سرعت، فشار و ضریب اصطکاک بر تنش‌های تماسی در یک سیستم با حرکت رفت و برگشتی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به طور خلاصه به شرح زیر است:

۱. مطالعه تأثیر سرعت نشان داد که سرعت بیشترین تأثیر را بر تنش‌های تماسی دارد به گونه‌ای که افزایش ۲۲٪ آن سبب رشد بیش از ۸۰٪ در تنش‌های تماسی می‌گردد.
۲. دومین عامل تأثیرگذار بر تنش‌های تماسی، ضریب اصطکاک می‌باشد. با افزایش ضریب اصطکاک تنش‌های برشی و اتلاف انرژی افزایش می‌یابد که این امر سبب می‌شود تنش‌های مکانیکی و حرارتی در نواحی تماسی افزایش یابد.
۳. افزایش فشار در ناحیه تماس سبب افزایش تنش‌های نرمال و برشی می‌شود. از طرف دیگر، افزایش فشار سبب بهبود کیفیت تماس و انتقال حرارت و در نتیجه کاهش رشد تنش‌های حرارتی می‌شود. بنابراین، عامل فشار نسبت به سایر عوامل تأثیر کمتری دارد.
۴. بررسی نتایج نشان داد که تنش‌های حرارتی نسبت به تنش‌های ناشی از نیروهای نرمال و برشی تأثیر بسیار بیشتری بر تنش‌های تماسی دارند.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از شرکت تجهیزات فناوریان سیمن تک برای همکاری و ارائه داده‌های تجربی تشکر و قدردانی می‌شود و از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.EM1402.73332) در انجام این تحقیق سپاسگزاری می‌گردد.

واژه‌نامه

پیشنهادی نویسنده	واژه لاتین	پیشنهادی ویراستار
تنش‌های تماسی	contact stress	تنش تماسی

مراجع

- [1] F. Hosseini, A. H. Meghdadi, M. Davazdah Emami, E. Mohseni, and N. Najari, "Umerical Simulation of Elbow Erosion with Circumferential Welding in Two-Phase Gas Flow," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 31, no. 2, pp. 141-156, 2020. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/fum-mech.v31i2.84757>
- [2] S. J. Lorenz, F. Sadeghi, H. K. Trivedi, L. Rosado, M. S. Kirsch, and C. Wang, "A continuum damage mechanics

- finite element model for investigating effects of surface roughness on rolling contact fatigue," *International Journal of Fatigue*, vol. 143, p. 105986, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105986>
- [3] R. Guan, D. Wang, W. Yu, C. Chen, and S. Yang, "An analysis of gear wear and micro-pitting evolution during contact fatigue," *Journal of Physics: Conference Series: IOP Publishing*, vol. 2825, no. 1, p. 012030, 2024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2825/1/012030>
- [4] M. Keshtgar, M. Shariati, and k. farhang dost, "Prediction of High Cycle Fatigue Life with Variable Loading Amplitude using Thermography Method," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 2, pp. 59-76, 2024. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.83002.1189>
- [5] W. D. Marscher, "Thermal versus mechanical effects in high speed sliding," *Wear*, vol. 79, no. 1, pp. 129-143, 1982. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(82\)90209-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(82)90209-5)
- [6] G. Deng *et al.*, "Effects of normal load and velocity on the dry sliding tribological behaviour of CoCrFeNiMo0.2 high entropy alloy," *Tribology International*, vol. 144, p. 106116, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106116>
- [7] Y. Murugesan, S. P. Venugopalan, and L. Nicola, "On sub-surface stress caused by contact roughness in compressible elastic solids," *Tribology International*, vol. 159, p. 106867, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106867>
- [8] S.-y. Zhang *et al.*, "Study on wear and rolling contact fatigue behaviours of defective rail under different slip ratio and contact stress conditions," *Tribology International*, vol. 169, p. 107491, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107491>
- [9] K. Holmberg *et al.*, "Topography orientation effects on friction and wear in sliding DLC and steel contacts, part 3: Experiments under dry and lubricated conditions," *Wear*, vol. 486, p. 204093, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204093>
- [10] S.-M. Bae, K.-J. Seo, and D.-E. Kim, "Effect of friction on the contact stress of a coated polymer gear," *Friction*, vol. 8, pp. 1169-1177, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0363-6>
- [11] M. Ciavarella and P. Decuzzi, "The state of stress induced by the plane frictionless cylindrical contact. II. The general case (elastic dissimilarity)," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38, no. 26-27, pp. 4525-4533, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(00\)00290-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00290-0)
- [12] X. He *et al.*, "Empirical relationship between interfacial shear stress and contact pressure in micro-and macro-scale friction," *Tribology International*, vol. 155, p. 106780, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106780>
- [13] O. I. Abdullah, J. Schlattmann, A. Senatore, L. A. Sabri, and W. S. A. Al-Sahb, "Effect of sliding speed on the thermal stresses of single-disk friction clutches," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 20, pp. 1534-1540, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00945-3>
- [14] F. Kennedy and S. Hussaini, "Thermo-mechanical analysis of dry sliding systems," *Computers & Structures*, vol. 26, no. 1-2, pp. 345-355, 1987. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(87\)90264-1](https://doi.org/10.1016/0045-7949(87)90264-1)
- [15] J. F. Lin, J. C. Chung, J. W. Chen, and T. C. Liu, "Thermal analysis of the transient temperatures arising at the contact spots of two sliding surfaces," *Journal of Tribology*, vol. 127, no. 4, 2005. <https://doi.org/10.1115/1.2000983>

- [16] R. Vijaywargiya and I. Green, "A finite element study of the deformations, forces, stress formations, and energy losses in sliding cylindrical contacts," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 42, no. 7, pp. 914-927, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2007.03.017>
- [17] A. P. Hekimoğlu and T. Savaşkan, "Effects of contact pressure and sliding speed on the unlubricated friction and wear properties of Zn-15Al-3Cu-1Si alloy," *Tribology Transactions*, vol. 59, no. 6, pp. 1114-1121, 2016. <https://doi.org/10.1080/10402004.2016.1141443>
- [18] Q. Chen and D. Li, "A computational study of frictional heating and energy conversion during sliding processes," *Wear*, vol. 259, no. 7-12, pp. 1382-1391, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.025>
- [19] C. Li, X. Deng, L. Huang, Y. Jia, and Z. Wang, "Effect of temperature on microstructure, properties and sliding wear behavior of low alloy wear-resistant martensitic steel," *Wear*, vol. 442, p. 203125, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203125>
- [20] J. Gomes, O. Silva, C. Silva, L. Pardini, and R. Silva, "The effect of sliding speed and temperature on the tribological behaviour of carbon-carbon composites," *Wear*, vol. 249, no. 3-4, pp. 240-245, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00554-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00554-3)
- [21] F. Nazari and H. Hosseini Nik, "Investigating the effect of speed, pressure, and friction coefficient on temperature in a linear sliding system," *Journal of Mechanical Engineering, University of Tabriz*, vol. 54, no. 2, pp. 109-115, 2024. (In Persian)
- [22] J. Sharifi Yalameh and A. Torabi, "Investigation of Slip Condition in the Elastohydrodynamic Lubrication," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 2, pp. 129-144, 2024. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.84427.1203>
- [23] M. E. Yousefzadeh Kouhbanani and A. M. Shafei, "Modeling and simulation of contact and friction forces in flexible robotic arms," *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 4, pp. 111-138, 2024. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.88007.1256>
- [24] K. Chawla, "Grain boundary cavitation and sliding in copper/tungsten composites due to thermal stresses," *Philosophical Magazine*, vol. 28, no. 2, pp. 401-413, 1973. <https://doi.org/10.1080/14786437308217462>
- [25] F. E. Kennedy Jr, "Thermal and thermomechanical effects in dry sliding," *Wear*, vol. 100, no. 1-3, pp. 453-476, 1984. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(84\)90026-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90026-7)
- [26] I. Jasiuk, T. Mura, and E. Tsuchida, "Thermal stresses and thermal expansion coefficients of short fiber composites with sliding interfaces," *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 110, no. 2, 1988. <https://doi.org/10.1115/1.3226036>
- [27] J. L. Meriam, L. G. Kraige, and J. N. Bolton, *Engineering Mechanics: Dynamics*. John Wiley & Sons, 2020.