



## Design, Evaluation and Construction of a Test Rig For Predicting the Remaining Usefull Life of a Gearbox with a Spur Gear

Mahdi Zamani<sup>1</sup>, Mohammad Aboonajmi <sup>\*2</sup>, Seyed Reza Hassan-Beygi<sup>3</sup>, Ashkan Moosavian<sup>4</sup>

1. Ph.D Student, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

2 Associate professor, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. Professor, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

4. Assistant professor, Department of Agricultural Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

### Abstract

Health monitoring of rotating machinery, particularly gearboxes, is crucial for ensuring operational efficiency and preventing unexpected failures. Gearboxes are among the most critical components in rotating machinery, with gears playing an essential role in transmitting torque and maintaining appropriate speeds. Due to the importance of fault diagnosis and predicting the remaining useful life (RUL) of gearboxes, numerous studies have recently been conducted in this area. One widely used method for predicting the RUL of equipment is accelerated life testing. To achieve this, a test bench was designed using CATIA software to estimate the RUL of spur gears, which are key components of gearboxes. Subsequently, dynamic and vibrational analyses were conducted using ADAMS software. These analyses included investigating the impact of vibration interference caused by the operation of the crank and spring mechanism—a load applicator on the gear teeth. Simulation results were compared with experimental data, confirming the model's accuracy. Additionally, vibrations from the crank and spring mechanism did not affect data related to gear faults. Experimental data collected from the system showed that the engagement frequency range of the gear increased from 44.5 dB to 66.87 dB, and the presence of sidebands around this frequency indicated wear-related faults. The findings of this research suggest that the collected data can be effectively used to estimate the remaining useful life of gearboxes.

### Keywords

Design  
Dynamic Analysis  
Gearbox  
Remaining Useful Life  
Vibration Analysis

Received: 11.04.2024

Revised: 01.25.2025

Accepted: 01.29.2025

\*Corresponding Author

Mohammad Aboonajmi

Email

[abonajmi@ut.ac.ir](mailto:abonajmi@ut.ac.ir)

### 1- Introduction

Fault detection and identification in mechanical systems during operation is one of the key challenges in maintenance and repair (MR) [1]. The predictive MR approach enables failure prediction and the implementation of appropriate solutions by monitoring the operational conditions of equipment. One effective method in this field is Condition-Based Monitoring (CBM), which detects changes in

the system's dynamic response through vibration and acoustic analysis [2].

Gearboxes, widely used in military and industrial applications, experience variations in load and speed, leading to various defects in their gears. These defects include gear scratches, chipping, overall wear, and cracks caused by bending fatigue, which are categorized into widespread and localized defects [3]. Studies show that 60% of gearbox issues



originate from gear tooth defects, while 24% result from inadequate maintenance practices, emphasizing the significance of gearbox condition monitoring [4].

A critical factor in gear performance is the involute profile of the teeth. Any deviation from this profile reduces accuracy and increases the likelihood of failure. Gear wear is classified into abrasive and adhesive types, typically caused by insufficient lubrication or excessive stress [5]. Proper monitoring of these changes can lower maintenance costs and improve system efficiency.

Modeling and simulating defects are effective tools for predicting failures and optimizing gear design. Software such as MATLAB for numerical analysis, ABAQUS and ANSYS for finite element methods, and ADAMS for multi-body dynamic analysis provide precise gear performance evaluations [6,7]. Among these, ADAMS is extensively used for modeling and analyzing multi-body mechanical systems, supporting design optimization [8].

Validating dynamic models is essential, as theoretical results without reliable experimental data cannot be applied to real-world scenarios. Combining modeling data with experimental tests enhances defect detection accuracy and reduces computational complexity in classification systems. Selecting relevant features to describe machine conditions improves defect identification and prediction accuracy [9].

Given the challenges in analyzing real-world systems, integrating dynamic and simulated methods for system condition assessment and applying findings to similar cases is necessary. In this study, a data acquisition system was designed and evaluated for a sample gearbox with simple gears. Initially, a 3D model of the system was developed in CATIA, followed by dynamic gear analysis using ADAMS software. The developed 3D model simulated the gears' dynamic response, and the results were compared with an experimental model to validate the analysis [10,11].

Ultimately, by monitoring gearbox conditions and analyzing tooth profile variations, maintenance

costs can be reduced, the operational lifespan of equipment can be extended, and mechanical system performance can be optimized. Simulation and data validation are powerful tools for defect prediction, design improvement, and enhancing industrial equipment efficiency [12,13].

## 2- Research Methods

Fault detection and the estimation of remaining useful life in mechanical systems, particularly gearboxes, present significant challenges in maintenance and repair. This study focuses on evaluating gear wear and its impact on gearbox performance using accelerated tests. A test system, comprising a gearbox, main chassis, electric motor, and a resistant load application mechanism (crank and spring system), was designed and built to analyze gear wear under controlled conditions and predict its failure timeline.

Gear wear is a common defect in mechanical power transmission systems, typically developing over time. To expedite wear formation for analysis, controlled resistant load tests were conducted on gear teeth. The crank and spring mechanism enabled precise load application, simulating real-world operational stress conditions. The selected gears had a module of 4, with a 20-tooth pinion of 80 mm diameter and a 50-tooth gear of 200 mm diameter. Bearings of type 6306 were selected according to DIN625-1 standards to withstand maximum operational speed and load.

Flexible couplings were used to connect the input and output shafts, ensuring smooth torque transmission while accommodating minor misalignments. This design prevents excessive axial or bending stresses, thereby reducing the risk of sudden mechanical failures.

To determine the required resistance load, the gearbox output torque was calculated using power and angular velocity relationships. The calculated torque of 57 Nm guided the design of the crank and spring mechanism. The crank arm length was set at 35 mm, and the spring was designed with a wire diameter of 7 mm, an outer diameter of 65 mm, a

height of 175 mm, and 14 active coils. The theoretical maximum force exerted by the spring at 75 mm compression was calculated to be 1100 N.

Dynamic simulations using ADAMS View analyzed the effects of gear displacement and vibrations on structural integrity. This software allows for defining essential gear parameters, such as module, tooth count, width, and thickness, ensuring precise system modeling. The gears used were made of St37 steel, with physical properties detailed in Table 1.

Table 1: parameters of the gears used

| <i>Parameter</i>      | <i>Symbol</i> | <i>Pinion</i> | <i>Gear</i> |
|-----------------------|---------------|---------------|-------------|
| Number of teeth       | Z             | 20            | 50          |
| Module                | M             | 4             | 4           |
| Pitch circle Diameter | P             | 80 mm         | 200 mm      |
| Gear thickness        | T             | 20 mm         | 20 mm       |

To validate the experimental results, boundary conditions were set, including fixing the gear centers while allowing only rotational motion around the Z-axis (DOF=1). The gearbox input speed was set at 1496 rpm, corresponding to the electric motor's maximum speed. Static and dynamic friction coefficients were assigned values of 0.15 and 0.11, respectively.

A flexible multi-body dynamic model was created in MSC ADAMS to assess defect-induced variations in gear dynamics. The model incorporated driving and driven shafts, pinions, gears, and bearings. Data from finite element analysis in CATIA were integrated to refine mass centers, moment distributions, and stiffness functions. Torsional and translational springs were included to simulate contact conditions and frictional effects. Rotational motion was applied to the gearbox input, while output torque constraints were established.

By analyzing gear wear progression and dynamic responses, this study enhances predictive

maintenance strategies. The combined experimental and simulation-based approach facilitates early fault detection, extends equipment lifespan, and optimizes mechanical system performance. The findings underscore the effectiveness of integrating accelerated testing with dynamic modeling for industrial gearbox reliability assessment.

### 3- Discussion and Results

To assess the impact of the crank and spring mechanism on gearbox performance, parameters such as speed, power, and vibration were simulated and analyzed. In this study, the mechanism was initially simulated in two states: before and after the application of spring force. The results indicated that connecting the mechanism did not significantly affect the amplitude of the gear meshing frequency.

For validation, system data was recorded before and after the mechanism was connected and subsequently analyzed. Fourier Transform and the SPL method were applied to transfer data into the frequency domain, revealing that the mechanism had no effect on the meshing frequency. Additionally, system data was collected over 60 hours, and using the FFT method, the impact of wear on the meshing frequency and sidebands was examined.

The findings demonstrated that, based on the collected data and the Weibull distribution, the remaining useful life of the gearbox could be estimated, providing a valuable framework for predicting the lifespan of similar mechanical systems.

### 4- Conclusion

A system was designed, evaluated, and built to estimate the remaining useful life of a gearbox. As wear was the primary defect studied, it was essential to analyze the impact of vibration generated by the resistant load mechanism on gear failure data. Before constructing the experimental system, simulations of the applied load mechanism were performed to gather vibration data.

The study examined the effect of the resistant load mechanism on system dynamics, considering forces generated by the crank and spring. Simulation results indicated that the vibrations caused by the mechanism did not significantly influence the overall system vibration. After constructing the system, a comparison between simulation and experimental data validated the findings.

Frequency analysis using the SPL method initially showed a frequency reduction due to manufacturing defects, followed by an increase to 66.87 dB as wear progressed. By applying the Weibull distribution and statistical methods, the gearbox's remaining useful life was estimated accurately.

## 5- References

- [1] X. Liang, M. J. Zuo, and Z. Feng, "Dynamic modeling of gearbox faults: A review," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 98, pp. 852–876, 2018. doi: [10.1016/j.ymsp.2017.05.024](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.05.024).
- [2] W. Caesarendra, A. Widodo, and B. S. Yang, "Combination of probability approach and support vector machine towards machine health prognostics," *Probabilistic Eng. Mech.*, vol. 26, no. 2, pp. 165–173, 2011. doi: [10.1016/j.proengmech.2010.09.008](https://doi.org/10.1016/j.proengmech.2010.09.008).
- [3] G. Dalpiaz, A. Rivola, and R. Rubini, "Effectiveness and sensitivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 14, no. 3, pp. 387–412, 2000. doi: [10.1006/mssp.1999.1294](https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1294).
- [4] K. Feng, W. A. Smith, R. B. Randall, H. Wu, and Z. Peng, "Vibration-based monitoring and prediction of surface profile change and pitting density in a spur gear wear process," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 165, p. 108319, 2022. doi: [10.1016/j.ymsp.2021.108319](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108319).
- [5] O. D. Mohammed and M. Rantatalo, "Gear fault models and dynamics-based modelling for gear fault detection—A review," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 117, p. 104798, 2020. doi: [10.1016/j.engfailanal.2020.104798](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104798).
- [6] J. Xia, R. Huang, Y. Liao, J. Li, Z. Chen, and W. Li, "Digital twin-assisted gearbox dynamic model updating toward fault diagnosis," *Front. Mech. Eng.*, vol. 18, no. 2, p. 32, 2023. doi: [10.1007/S11465-023-0748-0](https://doi.org/10.1007/S11465-023-0748-0).
- [7] Q. Chen, Y. Ma, S. Huang, and H. Zhai, "Research on gears' dynamic performance influenced by gear backlash based on fractal theory," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 313, pp. 325–332, 2014. doi: [10.1016/J.APSUSC.2014.05.210](https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2014.05.210).
- [8] A. Kahraman and R. Singh, "Non-linear dynamics of a spur gear pair," *J. Sound Vib.*, vol. 142, no. 1, pp. 49–75, 1990. doi: [10.1016/0022-460X\(90\)90582-K](https://doi.org/10.1016/0022-460X(90)90582-K).
- [9] S. Ebrahimi and P. Eberhard, "Rigid-elastic modeling of meshing gear wheels in multibody systems," *Multibody Syst. Dyn.*, vol. 16, pp. 55–71, 2006. doi: [10.1007/S11044-006-9021-7](https://doi.org/10.1007/S11044-006-9021-7).
- [10] Y. Wang, H. M. E. Cheung, and W. J. Zhang, "Finite element modelling of geared multi-body system," *Commun. Numer. Methods Eng.*, vol. 18, no. 11, pp. 765–778, 2002. doi: [10.1002/CNM.526](https://doi.org/10.1002/CNM.526).
- [11] G. Litak and M. I. Friswell, "Dynamics of a gear system with faults in meshing stiffness," *Nonlinear Dyn.*, vol. 41, pp. 415–421, 2005. doi: [10.1007/S11071-005-1398-Y](https://doi.org/10.1007/S11071-005-1398-Y).
- [12] G. A. Ambaye and H. G. Lemu, "Dynamic analysis of spur gear with backlash using ADAMS," *Mater. Today: Proc.*, vol. 38, pp. 2959–2967, 2021. doi: [10.1016/j.matpr.2020.09.309](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.309).
- [13] R. K. Y. Chang, C. K. Loo, and M. V. C. Rao, "Enhanced probabilistic neural network with data imputation capabilities for machine-fault classification," *Neural Comput. Appl.*, vol. 18, pp. 791–800, 2009. doi: [10.1007/s00521-008-0215-1](https://doi.org/10.1007/s00521-008-0215-1).



## طراحی، ساخت و ارزیابی میز آزمون پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده جعبه‌دنده با چرخ‌دنده ساده

مهدی زمانی<sup>۱</sup>، محمد ابونجمی<sup>۲\*</sup>، سیدرضا حسن بیگی بیدگلی<sup>۳</sup>، سیداشکان موسویان بالاباش<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه فنی کشاورزی، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

۲- دانشیار، گروه فنی کشاورزی، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

۳- استاد، گروه فنی کشاورزی، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

۴- استادیار، گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

### کلمات کلیدی

طراحی  
تحلیل دینامیکی  
جعبه‌دنده  
عمر مفید  
تحلیل ارتعاش

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

\*نویسنده مسئول

محمد ابونجمی

ایمیل

[abonajmi@ut.ac.ir](mailto:abonajmi@ut.ac.ir)

### چکیده

با توجه به افزایش استفاده از تجهیزات دوار در صنایع مختلف بررسی وضعیت سلامتی این تجهیزات به یکی از حوزه‌های مورد توجه محققین تبدیل شده است. جعبه‌دنده یکی از اجزاء مهم در ماشین‌های دوار می‌باشد و چرخ‌دنده نقش اساسی در جعبه‌دنده به‌منظور انتقال گشتاور و سرعت مناسب ایفا می‌کند. با توجه به اهمیت تشخیص عیب و پیش‌بینی عمر مفید جعبه‌دنده اخیراً مطالعات بسیاری در این حوزه انجام می‌پذیرد. یکی از رویکردهای متداول در پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده استفاده از روش آزمون‌های شتابدار می‌باشد. به همین منظور میز آزمون تخمین عمر مفید باقیمانده چرخ‌دنده ساده به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزاء جعبه‌دنده‌ها با استفاده از نرم‌افزار CATIA طراحی شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار ADAMS تحلیل‌های دینامیکی و ارتعاشی بر روی آن انجام شده است. یکی از تحلیل‌های انجام‌شده بررسی میزان و اثر تداخل ارتعاش ناشی از کارکرد مکانیزم لنگ و فنر به‌عنوان اعمال‌کننده بار مقاوم بر روی دنده‌های چرخ‌دنده می‌باشد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با داده‌ها تجربی، اعتبار مدل شبیه‌سازی را تأیید می‌کند و همچنین مشخص شد ارتعاش ناشی از مکانیزم لنگ و فنر تداخلی در داده‌های مرتبط با عیوب چرخ‌دنده نخواهد داشت. با اخذ داده‌های تجربی از سامانه ساخته‌شده و با بررسی دامنه فرکانس درگیری چرخ‌دنده از مقدار ۴۴/۵ دسی‌بل به ۶۶/۸۷ دسی‌بل و نیز افزایش باندهای جانبی در اطراف این فرکانس، عیب سایش مشخص گردید. نتایج پژوهش نشان می‌دهد با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده می‌توان، نسبت به تخمین عمر مفید باقیمانده جعبه‌دنده اقدام کرد.

### ۱- مقدمه

می‌آورد تا با توجه به شرایط عملکرد تجهیز، وضعیت سلامتی پایش شود تا در صورت نمایان‌شدن علائم یک عیب زمان وقوع خرابی پیش‌بینی و راهکار مناسب در مورد رفع عیب اتخاذ شود. یکی از راه‌های تشخیص و یافتن به‌موقع عیب، پایش وضعیت<sup>۵</sup> می‌باشد. به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات، کاهش هزینه‌های نگهداری

تشخیص و یافتن عیب در سیستم‌های مکانیکی در حین کار یکی از مهم‌ترین چالش‌های حوزه نگهداری و تعمیرات<sup>۱</sup> می‌باشد [۱]. نگهداری و تعمیرات (نت) دارای روش‌ها یا استراتژی‌های گوناگونی شامل استراتژی کار تا خرابی<sup>۲</sup>، استراتژی نگهداشت پیشگیرانه<sup>۳</sup> و استراتژی نگهداشت پیشگویانه<sup>۴</sup> می‌باشد. نت پیشگویانه این امکان را فراهم

<sup>4</sup> Predictive maintenance

<sup>5</sup> Condition monitoring

<sup>1</sup> Maintenance

<sup>2</sup> Run to failure (RTF)

<sup>3</sup> Preventive maintenance (PM)



حالت‌های خرابی<sup>۲</sup> مانند خراش دنده، لب‌پدگی<sup>۳</sup>، سایش کلی، ترک‌های ناشی از خستگی<sup>۴</sup> خمش و ... می‌شود. عیوب سطحی دندانه معمولاً به‌عنوان عیوب گسترده دنده شناخته می‌شوند و اکثراً به دلیل روغن‌کاری غیرکافی ایجاد می‌گردند. در مقابل عیوبی که تنها بر روی تعداد محدودی از دندانه‌ها تأثیر می‌گذارند، به‌عنوان عیوب موضعی شناخته می‌شوند و اکثراً به دلیل تنش خمشی اضافی در دندانه‌ها ایجاد می‌گردند. در جعبه‌دنده‌ها عیوب مربوط به دندانه ۶۰٪ و عیوب ناشی از عملیات نگهداری غیر صحیح ۲۴٪ از مشکلات جعبه‌دنده‌ها را تشکیل می‌دهند [۳]. به همین دلیل پایش وضعیت جعبه‌دنده‌ها یکی از مهم‌ترین موارد قابل‌اجرا برای کاهش خسارات و اطمینان از کارکرد مناسب و دائمی ماشین‌ها می‌باشد.

براساس قانون چرخ‌دنده‌ها حفظ نسبت سرعت ثابت در یک جفت چرخ‌دنده درگیر نیازمند وجود پروفیل خاصی برای دندانه‌های چرخ‌دنده می‌باشد، که یکی از این منحنی‌ها، منحنی اینولوت<sup>۵</sup> نام دارد. هرگونه انحراف از این منحنی، چه در زمان ساخت و چه بعد از آن و در حین کارکرد چرخ‌دنده موجب از بین رفتن دقت چرخ‌دنده شده و در مراحل بعدی موجب بروز خرابی می‌گردد. میزان انحراف سطح از پروفیل فعال دندانه‌ها سایش<sup>۶</sup> نامیده‌شده که دارای انواع گوناگونی می‌باشد. دو حالت مشخص از سایش، سایش خراشنده<sup>۷</sup> و سایش چسبنده<sup>۸</sup> می‌باشد. خراش بر روی یک سطح توسط یک جرم خارجی سخت هنگامی رخ می‌دهد که دو سطح بر روی یکدیگر حرکت لغزشی داشته باشند و چسبندگی زمانی اتفاق می‌افتد که سطوح لغزان تحت فشار تماسی کافی برای تغییر شکل پلاستیک و چسبندگی قرار داشته باشند. هرگاه تغییر شکل پلاستیک رخ دهد، انرژی به‌صورت گرمای ناشی از اصطکاک جذب می‌شود. اولین علامت سایش چسبنده، سطح صیقلی (لعاب‌دار) است که با پوسته‌شدن و سپس جدایش قسمتی از سطح همراه خواهد شد. این فرآیند اصطلاحاً میکرو جوش نامیده می‌شود در صورت ادامه‌دار بودن موجب بروز نوعی از سایش می‌گردد که به شکل ایجاد حفره در سطح جانبی دندانه دیده می‌شود. داشتن توانایی دقیق پایش و پیش‌بینی تغییرات پروفیل (مانند عمق سایش در راستای عمود بر سطح دندانه) و پیشرفت حفره‌های سطح می‌تواند مزایای بی‌شماری برای فعالیت‌های صنعتی داشته باشد [۴]. اخیراً یافتن خرابی در چرخ‌دنده این اجازه را می‌دهد که زمان‌بندی

و افزایش عمر تجهیز از رویکرد پایش براساس وضعیت (CBM<sup>۱</sup>) استفاده می‌شود، این رویکرد تضمین می‌کند که نگهداری براساس داده‌های حاصل از سیستم و تنها در صورت لزوم انجام شود. نقش پایش براساس وضعیت بر پایه ارتعاش یا صوت، یافتن هرگونه تغییر در پاسخ دینامیکی براساس تغییر در یکپارچگی ساختاری یا نیروهای تحریک کننده می‌باشد. این روش به‌عنوان مؤثرترین و به‌صرفه‌ترین راه برای جلوگیری از آسیب جدی به ماشین‌های صنعتی شناخته شده است. یافتن اطلاعات دقیق از شرایط دستگاه‌ها علاوه بر افزایش کیفیت و کمیت محصول باعث می‌شود که با برنامه‌ریزی دقیق برای تعمیرات، هزینه‌های نگهداری دستگاه کاهش یابد. پایش سلامت ماشین به معنی اندازه‌گیری یا ثبت وضعیت انحراف با شرایط عادی بوده و در ماشین‌های دوار، پایش و تشخیص عیوب به‌عنوان اولویت اول برای جلوگیری از خرابی‌های غیرمنتظره محسوب می‌شود. به‌طور کلی تشخیص سلامت ماشین می‌تواند به‌عنوان توانایی مشاهده وضعیت آینده یک بخش یا سیستم و پیش‌بینی زمان باقیمانده قبل از یک حادثه فاجعه‌آمیز تعریف شود [۲].

سیستم‌های مکانیکی دارای اجزاء مختلفی بوده و یکی از اجزاء مهم در سیستم‌های مکانیکی جعبه‌دنده می‌باشد. جعبه‌دنده‌ها به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای نظامی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده گسترده از جعبه‌دنده موجب ایجاد شرایط متنوع کاری تحت تغییرات ناگهانی بار و سرعت می‌شود. این تغییرات به اجزاء سازنده جعبه‌دنده منتقل و موجب ایجاد تغییراتی در این اجزاء می‌گردد. چرخ‌دنده به‌عنوان جزئی از جعبه‌دنده که انتقال حرکت و نیرو را انجام می‌دهد یکی از اجزائی می‌باشد که همواره در معرض عیوب متفاوتی قرار دارد. عدم تشخیص به‌موقع این عیوب منجر به افزایش هزینه، مخاطرات ایمنی و کاهش قابلیت اطمینان می‌گردد، همچنین تشخیص و یافتن به‌موقع عیوب، امکان زمان‌بندی مناسب برای انجام تعمیرات یا رفع عیوب را فراهم می‌کند و از این طریق مانع بروز خرابی‌های فاجعه‌بار و در نتیجه افزایش امنیت در محیط کاری می‌گردد [۱]. در یک سیستم جعبه‌دنده زمانی که عیبی در یک یا چند دندانه به وجود می‌آید، انتقال دلخواه و دقیق سرعت و توان در سیستم از بین می‌رود. اگر دندانه‌ای به هر دلیلی معیوب شود، بر روی همه یا تعدادی از چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده مذکور تأثیر می‌گذارد. این عیوب شامل

<sup>5</sup> Involute

<sup>6</sup> Wear

<sup>7</sup> Abrasive wear

<sup>8</sup> Adhesive wear

<sup>1</sup> Condition base monitoring

<sup>2</sup> Failure modes

<sup>3</sup> Chipped tooth

<sup>4</sup> Fatigue cracks

دینامیکی، اعتبارسنجی<sup>۴</sup> یک مرحله بسیار مهم می‌باشد. بدون اعتبارسنجی معتبر نتایج تئوری نمی‌توانند در کاربردهای واقعی بکار برده شوند [۱]. بنابراین داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل‌های دینامیکی یا مدل‌سازی شده به‌وسیله نرم‌افزار می‌بایست به‌وسیله داده‌های تجربی اعتبارسنجی شوند. همچنین در بحث پیش‌بینی و برای طبقه‌بندی داده‌ها استفاده از تمامی داده‌ها حجم محاسبات را افزایش خواهد داد و در برخی موارد موجب کاهش دقت و در نتیجه عدم طبقه‌بندی صحیح داده‌ها می‌شود. پس به‌منظور درک بهتر از وضعیت دستگاه و نیز افزایش دقت در تشخیص عیب و همچنین به‌منظور کاهش بار محاسباتی در سیستم طبقه‌بندی، ویژگی‌هایی که به بهترین شکل توان توصیف وضعیت دستگاه را داشته باشند، شناسایی و استخراج شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳].

با توجه به محدودیت‌های موجود در خصوص تحلیل سیستم‌های واقعی ضرورت دارد تا با ترکیبی از مدل‌های دینامیکی و یا شبیه‌سازی شده به بررسی وضعیت این سیستم‌ها پرداخت و با اعتبارسنجی، این روش‌ها را به سایر سیستم‌های مشابه تعمیم داد. بنابراین هدف از این مقاله طراحی و ارزیابی منجر به ساخت سامانه داده‌برداری از یک جعبه‌دنده نمونه با چرخ‌دنده‌های ساده می‌باشد که می‌توان از این سامانه به‌منظور انجام آزمون‌های شتابدار برای تخمین عمر مفید باقیمانده جعبه‌دنده استفاده نمود.

در این پژوهش ابتدا مدل سه‌بعدی سامانه در نرم‌افزار CATIA ایجاد و سپس دینامیک چرخ‌دنده ساده با مقادیر متفاوت عکس‌العمل با استفاده از نرم‌افزار آدامز تحلیل شده است. مدل سه‌بعدی توسعه‌یافته چرخ‌دنده ساده با حرکات و نیروهای اعمال‌شده بر دندانه‌های چرخ‌دنده شبیه‌سازی شده و پاسخ دینامیکی به‌دست‌آمده از این تغییرات مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. سپس براساس این مقادیر نسبت به طراحی و ساخت سامانه اقدام، و در نهایت نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل دینامیکی با یک مدل تجربی ساخته‌شده، مقایسه شده است.

## ۲- روش تحقیق

میز تخمین عمر مفید باقیمانده مطابق شکل ۱ شامل قسمت‌های (۱) جعبه‌دنده، (۲) شاسی اصلی دستگاه، (۳) الکتروموتور، (۴) سامانه اعمال بار مقاوم (مکانیزم لنگ و فنر) می‌باشد. این سامانه به‌منظور بررسی عمر مفید باقیمانده چرخ‌دنده ساده در یک جعبه‌دنده نمونه طراحی و

دقیقی از ایجاد عیب و خارج از دسترس بودن تجهیز را داشته باشیم [۵]. از روش‌هایی که به‌وفور در پایش وضعیت ماشین‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، آنالیز ارتعاش و صدا می‌باشد. ارتعاش صوتی، دارای مشخصاتی مشابه با ارتعاشات مکانیکی است و می‌توان از آن برای عیب‌یابی و پایش وضعیت دقیق ماشین‌ها استفاده کرد.

تشخیص یا پیش‌بینی عیوب در جعبه‌دنده‌ها با چالش‌هایی روبرو می‌باشد. یکی از روش‌های تشخیص و پیش‌بینی عیب استفاده از مدل‌سازی یا شبیه‌سازی عیوب با استفاده از مشخصه‌های دینامیکی چرخ‌دنده می‌باشد. علاوه بر این، استفاده از ابزارهای مدل‌سازی به مهندسان امکان می‌دهد تا طراحی چرخ‌دنده‌ها را بهینه کنند. با شبیه‌سازی، می‌توان عیوب محتمل را پیش‌بینی کرده و طراحی را به‌گونه‌ای تغییر داد که نیاز به آزمایش‌های گسترده کاهش یابد. این روش باعث کاهش هزینه و افزایش بهره‌وری می‌شود. همچنین با بهبود طراحی، خطرهای مرتبط با عیوب در محصول نهایی کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی عیوب چرخ‌دنده این امکان را فراهم می‌آورد تا به بحث پیش‌گیری از وقوع خرابی هم پرداخته شود. با تشخیص زود هنگام عیوب، می‌توان از توقف‌های ناگهانی جلوی‌گیری و هزینه‌های تعمیراتی را کاهش داد. این روش باعث افزایش عمر مفید چرخ‌دنده‌ها و بهبود کارایی سیستم‌های مکانیکی شده و در نتیجه شبیه‌سازی عیوب چرخ‌دنده، می‌تواند به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای بهبود طراحی، پیش‌بینی عیوب و افزایش کارایی مطرح گردد [۶].

در مواردی مانند پایش وضعیت، به دلیل دشواری ایجاد سیگنال‌های ارتعاشی در شرایط تجربی می‌توان برای شبیه‌سازی وضعیت‌های مختلف جعبه‌دنده، از مدل‌سازی دینامیکی استفاده کرد. امروزه مدل‌سازی درگیری چرخ‌دنده به دلیل مزایای فراوان برای ایجاد تغییر آسان در پارامترهای آزمایش‌های مجازی، ترجیح داده می‌شود. چندین روش برای شبیه‌سازی رفتار جفت چرخ‌دنده از طریق مدل‌های ریاضی مانند روش‌های عددی در نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> [۷]، روش‌های المان محدود در نرم‌افزارهای آباکوس یا انسیس<sup>۲</sup> [۹]، [۸] و روش‌های دینامیکی چند بدنه [۱۱]، [۱۰] در نرم‌افزار آدامز<sup>۳</sup>، استفاده می‌شود. نرم‌افزار آدامز یک نرم‌افزار محاسباتی قابل‌استفاده برای مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های مکانیکی چند بدنه می‌باشد [۱۲]. در مباحث مربوط به شبیه‌سازی و مدل‌سازی تشخیص عیب براساس مدل

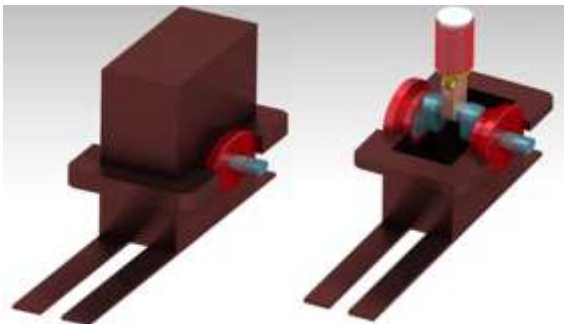
<sup>3</sup> Msc adams

<sup>4</sup> Validation

<sup>1</sup> Matlab

<sup>2</sup> Abaqus or ansys

به منظور اتصال محورهای ورودی و خروجی از کوپلینگ انعطاف پذیر استفاده شده است. کوپلینگ‌های انعطاف پذیر به منظور انتقال آرام گشتاور، در عین حال مجاز نمودن کمی ناهم-محوری، محوری، شعاعی و زاویه‌ای طراحی می‌شود. انعطاف پذیری طوری است که در موقع پدید آمدن ناهم‌محوری، قطعات کوپلینگ با کمی مقاومت یا بدون مقاومت حرکت می‌کنند. پس تنش‌های محوری یا خمشی جدی در محور به وجود نمی‌آید.



شکل ۲: مکانیزم لنگ و فنر به منظور اعمال بار مقاوم در جعبه دنده

به منظور اعمال بار مقاوم، متناسب با جعبه دنده ابتدا گشتاور خروجی جعبه دنده با استفاده از روابط (۱ تا ۳) محاسبه گردید:

$$P = \omega T \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi n / 60 \quad (2)$$

$$T = 60P / 2\pi n \quad (3)$$

در این روابط  $P$  نماینده توان،  $\omega$  نماینده سرعت زاویه‌ای،  $n$  نماینده تعداد دور بر دقیقه و  $T$  نماینده گشتاور می‌باشد. با جایگذاری مقادیر مربوطه، گشتاور خروجی جعبه دنده معادل ۵۷ نیوتن متر به دست می‌آید. بر اساس گشتاور محاسبه شده نسبت به طراحی مکانیزم لنگ و سپس طراحی فنر مناسب اقدام گردید. در خصوص مکانیزم لنگ با توجه به فضای موجود طول بازوی لنگ به اندازه ۳۵ میلی متر در نظر گرفته شد (شکل ۳).

با توجه به سایر پارامترها مانند طول لنگ، توان ورودی و میزان گشتاور خروجی جعبه دنده نسبت به طراحی و ساخت فنر اقدام شد.

ساخته شده است. به همین منظور نیاز به بررسی شرایط کار تا خرابی جعبه دنده نمونه تحت تأثیر یکی از انواع عیوب اصلی چرخ دنده خواهد بود. عیب سایش یکی از عیوب متداول در چرخ دنده و جعبه دنده‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه این عیب تحت شرایط کار عادی جعبه دنده طی مدت زمان نسبتاً طولانی ایجاد می‌شود، نیاز به انجام آزمون‌های شتابدار<sup>۱</sup> جهت ایجاد سایش در مدت زمان کم می‌باشد. یکی از مواردی که منجر به ایجاد سایش در چرخ دنده می‌گردد وجود بار مقاوم بر روی دندانه‌های چرخ دنده می‌باشد. در سامانه مذکور، انجام آزمون‌های شتابدار نیاز به تجهیزاتی به منظور اعمال بار مقاوم مورد نیاز دارد. به همین منظور از یک مکانیزم لنگ و فنر جهت ایجاد بار مناسب بر روی چرخ دنده‌ها استفاده خواهد شد. نمای شماتیک سامانه اعمال بار مقاوم، در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این تحقیق با توجه به بیشینه سرعت دورانی الکتروموتور و نیز بیشینه بار انتقالی، از چرخ دنده‌هایی با مدول ۴ استفاده شده است. تعداد دندانه‌های پینیون ۲۰ و قطر آن ۸۰ میلی متر و تعداد دندانه‌های چرخ دنده ۵۰ و قطر آن ۲۰۰ میلی متر انتخاب شده است. همچنین با توجه به حداکثر دور ایجاد شده در جعبه دنده و طبق استاندارد DIN625-1 از یاتاقان نوع ۶۳۰۶ استفاده شده است.



شکل ۱: اجزاء سامانه شامل الکتروموتور، جعبه دنده، مکانیزم بار مقاوم و شاسی، بالا: مدل طراحی شده و پایین: مدل ساخته شده

<sup>۱</sup> Accelerated tests

جدول ۱: پارامترهای چرخ‌دنده‌های مورد استفاده

| پارامتر        | نماد | پینیون | چرخ‌دنده |
|----------------|------|--------|----------|
| تعداد دندانه   | Z    | ۲۰     | ۵۰       |
| مدول           | m    | ۴      | ۴        |
| دایره گام      | P    | ۸۰     | ۲۰۰      |
| ضخامت چرخ‌دنده | t    | ۲۰     | ۲۰       |

در این پژوهش از چرخ‌دنده فولادی (St37) استفاده شده که دارای مشخصات فیزیکی مطابق با جدول ۲ می‌باشد.

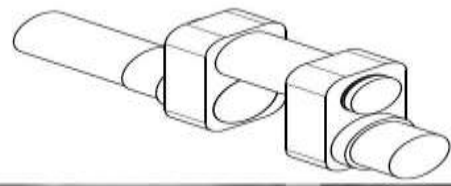
جدول ۲: مشخصات فولاد St37

| محدول الاستیسیته (pa) | ضریب زلزله | جرم حجمی (Kg/m <sup>3</sup> ) | استحکام کششی (Mpa) | استحکام تسلیم (Mpa) |
|-----------------------|------------|-------------------------------|--------------------|---------------------|
| ۲۰۰×۱۰ <sup>۹</sup>   | ۰/۳        | ۸۰۰۰                          | ۳۴۰ تا ۳۵۰         | ۲۳۵                 |

به منظور انجام تحلیل، شرایط مرزی به این شرح انتخاب گردید: اتصال نقطه مرکزی چرخ‌دنده و پینیون با زمین به نحوی که چرخ‌دنده‌ها به جز حرکت دورانی حول محورشان (در این مقاله محور Z) هیچ‌گونه حرکتی نداشته باشند یا به عبارت دیگر هر چرخ‌دنده فقط یک درجه آزادی خواهد داشت (DOF=1) نقطه مرکز هر دو چرخ‌دنده به ترتیب C1 برای پینیون و C2 برای چرخ‌دنده در نظر گرفته شد. سرعت ورودی به جعبه دنده معادل ۱۴۹۶ دور بر دقیقه و معادل بیشینه سرعت الکتروموتور در نظر گرفته شد، ضریب اصطکاک استاتیکی معادل ۰/۱۵ و ضریب اصطکاک دینامیکی معادل ۰/۱۱ تعیین گردید.

#### ۲-۲- مدل دینامیکی چند بدنه‌ای

به منظور بررسی اثر عیب بر روی مشخصات دینامیکی چرخ‌دنده، مدلی انعطاف‌پذیر از سیستم چرخ‌دنده‌ای در نرم‌افزار MSC ADAMS ایجاد گردید. براساس مدل توسعه سایش بر روی پروفیل دندانه‌ها، پاسخ دینامیکی سیستم چرخ‌دنده‌ای شبیه‌سازی گردید. به همین منظور ابتدا محور محرک و محور متحرک به همراه پینیون و چرخ‌دنده و نیز یاتاق‌های مربوطه در نرم‌افزار CATIA مدل شدند. سپس با توجه به تحلیل‌های انجام شده بر روی مدل ایجاد شده در نرم‌افزار CATIA و نتایج به دست آمده از این تحلیل‌ها بابت مشخص شدن نقاط مرکز جرم، توزیع ممان‌ها و ... مدل انعطاف‌پذیر در نرم‌افزار MSC ADAMS توسعه داده شد. به منظور مدل کردن توابع سختی در



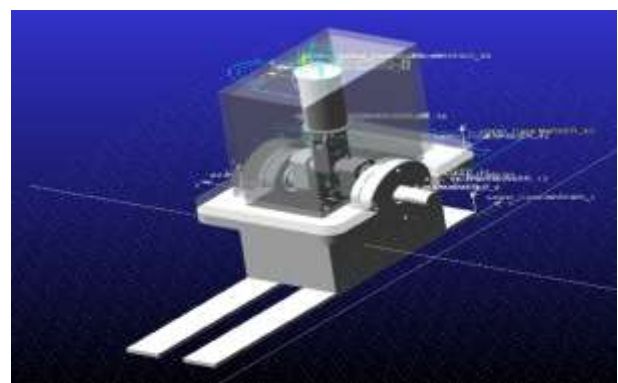
شکل ۳: لنگ طراحی شده در نرم‌افزار CATIA (بالا) و مدل ساخته شده (پائین)

برهمن اساس قطر مفتول ۷ میلی‌متر، قطر خارجی فنر ۶۵ میلی‌متر، ارتفاع فنر با احتساب قلاب‌های انتهایی ۱۷۵ میلی‌متر و تعداد حلقه‌های فعال ۱۴ حلقه به دست آمد. به صورت تئوری، بیشینه نیروی اعمال شده از جانب فنر در هنگام فشرده شدن به اندازه ۷۵ میلی‌متر (جابجایی بازوی لنگ از پائین‌ترین نقطه تا بالاترین نقطه) معادل ۱۱۰۰ نیوتن به دست آمد.

#### ۲-۱- شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار ADAMS View

از نرم‌افزار ADAMS View به منظور شبیه‌سازی دینامیکی، بررسی اثر ارتعاش حاصل از جابجایی فنر بر روی سازه و تحلیل نتایج استفاده گردید (شکل ۴).

نرم‌افزار آدامز در ماژول Machinery و در قسمت Gear با تعریف پارامترهای عمومی مانند مدول، تعداد دندانه، عرض چرخ‌دنده و ضخامت دندانه امکان ایجاد انواع سیستم‌های چرخ‌دنده‌ای را ارائه می‌دهد. پارامترهای طراحی چرخ‌دنده ساده که در این پژوهش استفاده شده است طبق جدول ۱ می‌باشد.



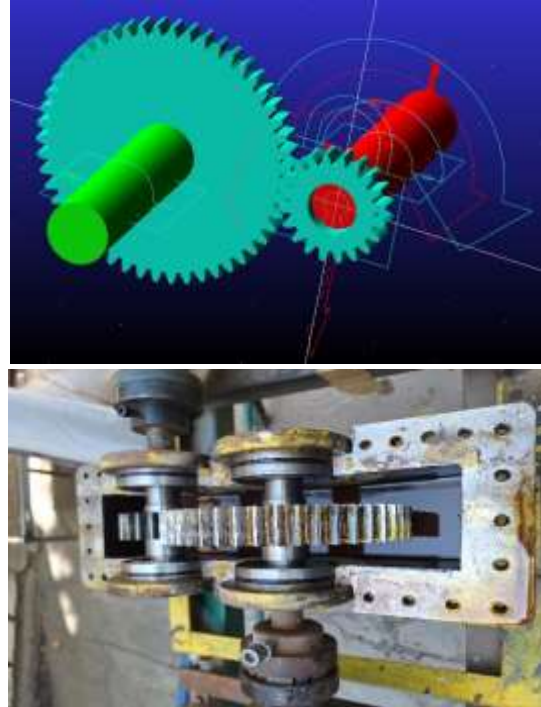
شکل ۴: تحلیل مکانیزم لنگ و فنر در محیط نرم‌افزار ADAMS View

پذیرفت. به منظور تحلیل سیگنال‌های صوتی، داده‌های صوتی به دست آمده از سامانه در شرایط سالم، پس از اتصال مکانیزم لنگ و فنر، بعد از مدت ۳۰ ساعت کار و در نهایت پس از مدت ۶۰ ساعت کار اخذ شده و تفاوت این سیگنال‌ها که در اثر ایجاد عیب سایش به وجود آمده بود به عنوان ویژگی انتخاب گردید. این تغییر در فرکانسی برابر با فرکانس درگیری چرخ‌دنده<sup>۱</sup> (GMF) به وجود می‌آید. فرکانس درگیری از حاصل ضرب تعداد دندانه‌ها در سرعت دورانی چرخ‌دنده (N) بر حسب دور بر ثانیه<sup>۲</sup> که با عنوان هرتز معروف می‌باشد، محاسبه می‌شود. در این پژوهش با توجه به منبع توان محور ورودی که با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه (۲۵ هرتز یا دور بر ثانیه) دوران می‌کند، و همچنین با توجه به تعداد دندانه‌های پینیون فرکانس درگیری معادل ۵۰۰ هرتز به دست می‌آید. در خصوص عیب سایش، تغییر به صورت افزایش دامنه فرکانس درگیری و نیز ایجاد باندهای جانبی در اطراف این فرکانس و هارمونیک‌های آن می‌باشد. تراز فشار صدا (SPL<sup>۳</sup>) که یکی از کمیت‌های لگاریتمی (تراز) صدا بوده و بیانگر کمیت فیزیکی (مطلق) فشار صوت به صورت تراز از آستانه شنوایی انسان می‌باشد و با رابطه (۴) محاسبه می‌شود، به عنوان روش تحلیل سیگنال‌های صوتی استفاده شد:

$$SPL = 10 \log \frac{SP^2}{SP_0^2} = 20 \log \frac{SP}{SP_0} \quad (4)$$

در این رابطه که با واحد db<sup>۴</sup> شناخته می‌شود، SP<sup>۵</sup> نماینده فشار صوت<sup>۶</sup> و اندیس صفر نشان‌دهنده کمیت مبنا است که مقدار این کمیت در حد آستانه شنوایی انسان یعنی  $P_0 = 2 \times 10^{-5}$  است. برای ضبط سیگنال‌های صوتی در این پژوهش از دستگاه صداسنج مدل HT-157 کلاس ۱ ساخت کشور ایتالیا استفاده شد (شکل ۶). میکروفن این صداسنج دارای حساسیتی معادل ۵۰ میلی‌ولت بر پاسکال بوده که برای استفاده در کارهای تحقیقاتی مناسب می‌باشد. داده‌های صوتی با نرخ ۱۹۲۰۰۰ نمونه بر ثانیه ضبط شده است که نرخ مناسبی جهت مشاهده ضربه‌های بسیار کوچک نیز می‌باشد.

چرخ‌دنده و یاتاقان‌ها از فنرهای پیچشی و رفت و برگشتی در محل‌های مناسب استفاده شده است، در همین حال از مفاصل چرخشی در محل اتصال اجزاء دوار به بدنه یا به یکدیگر استفاده گردید. تماس در محل دندانه‌های پینیون و چرخ‌دنده به همراه پارامترهای اصطکاک که پیش از این مقادیر آنها ذکر شده است ایجاد گردید. میزان حرکت دورانی بر روی مفصل ورودی به جعبه‌دنده و میزان گشتاور بر روی خروجی چرخ‌دنده تنظیم گردید.



شکل ۵: بالا: مدل ایجاد شده در نرم‌افزار MSC ADAMS، پایین: نمونه چرخ‌دنده‌های واقعی

### ۳- آزمون تجربی

پس از انجام تحلیل‌های مربوط به مکانیزم لنگ و فنر نسبت به ساخت نمونه واقعی سامانه مذکور اقدام گردید و داده‌های حاصل از کار نمونه ساخته شده اخذ و تحلیل این داده‌ها به منظور تخمین عمر مفید باقیمانده چرخ‌دنده انجام پذیرفت. در این بخش داده‌های جعبه‌دنده از شروع کار سامانه تا زمان ایجاد سایش جمع‌آوری گردید. با توجه به حجم داده‌های اخذ شده و نیز با توجه به مشخصات دستگاه اخذ داده‌های صوتی، قطعات ۰/۵ ثانیه‌ای برای پردازش و به دست آوردن مشخصات مدنظر جدا و پردازش نهایی بر روی این داده‌ها انجام

<sup>۶</sup> در رابطه مربوط به سطح فشار صدا (SPL) برای نشان دادن فشار صوت همواره از متغیر P استفاده می‌شود، اما در این مقاله به دلیل تشابه با سایر روابط از متغیر SP برای نشان دادن فشار صوت استفاده شده است.

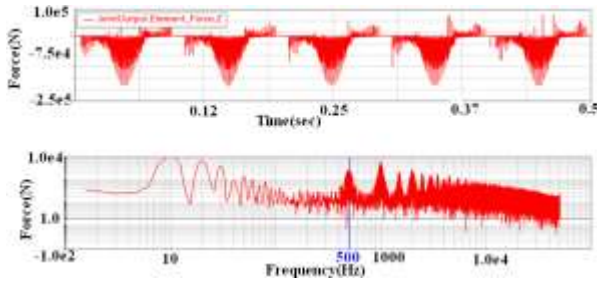
<sup>۱</sup> Gear mesh frequency

<sup>۲</sup> Cycle per second

<sup>۳</sup> Sound pressure level

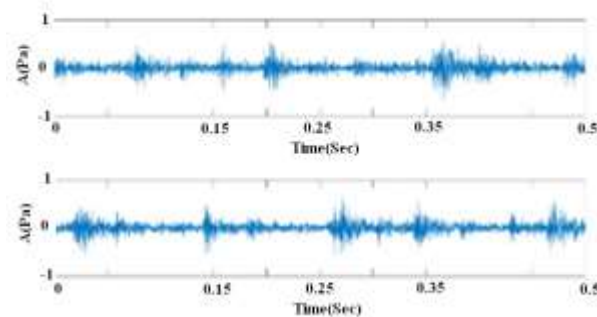
<sup>۴</sup> Deci bell

<sup>۵</sup> Sound pressure



شکل ۸: نتایج تغییرات نیرو حاصل از شبیه‌سازی بعد از اتصال مکانیزم (بالا): حوزه زمان (پائین): حوزه فرکانس

به منظور اعتبارسنجی داده‌های به دست آمده از نرم افزار MSC ADAMS نیاز به تحلیل سیگنال‌های اخذ شده از سامانه، قبل از اتصال مکانیزم لنگ و فنر و بعد از اتصال مکانیزم به جعبه‌دنده می‌باشد. به همین منظور چرخ‌دنده نمونه که در این پژوهش، پینیون جعبه‌دنده مدنظر می‌باشد، بدون هیچ‌گونه تیماری بر روی سامانه نصب و نسبت به داده‌برداری از سامانه اقدام گردید. به منظور بررسی تأثیر مکانیزم لنگ و فنر داده‌برداری با اتصال مکانیزم به سامانه و بدون هیچ‌گونه تغییری در سایر پارامترها تکرار گردید، و داده‌های حاصل از این مرحله جمع‌آوری گردید. نمایش حوزه زمان این داده‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: نمایش حوزه زمان سیگنال به دست آمده از سامانه (بالا قبل از اتصال مکانیزم، پایین بعد از اتصال مکانیزم)

تحلیل حوزه زمان معمولاً به جز مشخصات آماری، اطلاعات چندانی در خصوص وجود یا عدم وجود عیب به دست نمی‌دهد. باین حال میزان تأخیر زمانی ایجاد شده در سیگنال زمانی بعد از اتصال مکانیزم لنگ و فنر که در شکل ۹ (پایین) مشخص است می‌تواند نشان‌دهنده اثر مکانیزم بر روی سیگنال در حوزه زمان باشد. با توجه به اینکه ایجاد و پیشرفت عیب در حوزه فرکانس قابل مشاهده می‌باشد، با استفاده از تبدیل فوریه و روش SPL داده‌ها به حوزه فرکانس منتقل گردید.

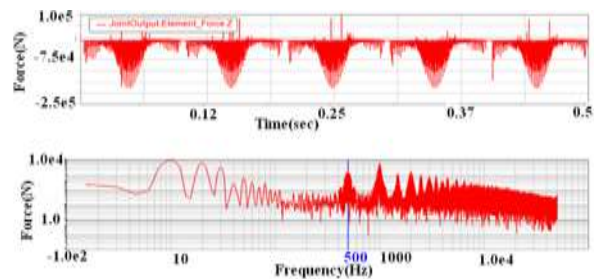


شکل ۶: صدا سنج مدل HT-157

یکی از مزایای استفاده از تحلیل صوتی عدم نیاز به نصب تجهیز داده‌برداری بر روی سامانه و امکان داده‌برداری با فاصله از سامانه می‌باشد. این تجهیز بر روی یک چهارپایه و در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از جعبه‌دنده نسبت به ضبط داده‌ها اقدام گردید.

#### ۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی شرایط مکانیزم لنگ و فنر و تأثیر آن بر روی جعبه‌دنده پارامترهایی نظیر سرعت، توان و ارتعاش انتقال یافته شبیه‌سازی و نتایج حاصله در ادامه توضیح داده می‌شود. در شبیه‌سازی مکانیزم لنگ، شرایط در دو حالت قبل از اعمال نیروی فنر و بعد از اعمال نیروی فنر بررسی گردید. مقادیر مربوط به تغییرات نیرو در حوزه زمان و حوزه فرکانس قبل از اتصال مکانیزم لنگ و فنر در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل فرکانس درگیری و هارمونیک‌های این فرکانس قابل مشاهده می‌باشد.

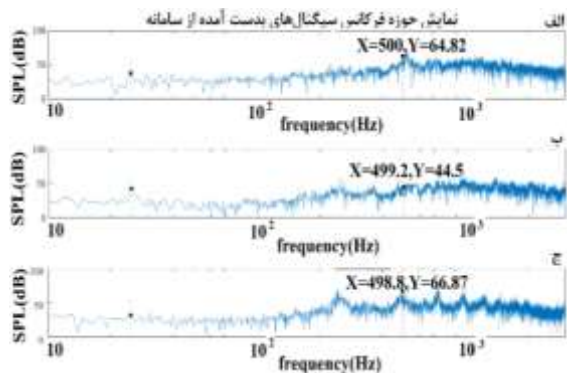


شکل ۷: نتایج تغییرات نیرو حاصل از شبیه‌سازی قبل از اتصال مکانیزم (بالا): حوزه زمان (پائین): حوزه فرکانس

شبیه‌سازی با اتصال مکانیزم لنگ و فنر به خروجی جعبه‌دنده مجدد انجام و نتایج مربوط به تغییرات نیرو در حوزه زمان و فرکانس در شکل ۸ نشان داده شده است.

طبق آنچه در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است اتصال مکانیزم لنگ و فنر تغییر معناداری در دامنه فرکانس درگیری و هارمونیک‌های آن ایجاد نکرده است و به عبارت دیگر مشخص گردید که میزان ارتعاش منتقل شده به پوسته و به تبع آن به جعبه‌دنده تأثیری در داده‌های به دست آمده از جعبه‌دنده به منظور پایش وضعیت چرخ‌دنده نخواهد داشت.

است. میزان تغییر در فرکانس درگیری و هارمونیک‌های آن و نیز ایجاد باندهای جانبی نشان‌دهنده ایجاد و پیشرفت عیب سایش می‌باشد.



شکل ۱۰: نمایش حوزه SPL (فرکانس) سیگنال به‌دست‌آمده از سامانه (بالا) قبل از اتصال مکانیزم، پایین بعد از اتصال مکانیزم

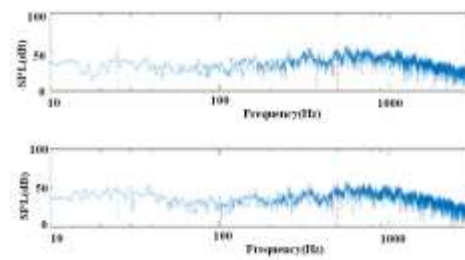
شکل ۱۲: نمایش سطح فشار صدا (SPL)، (الف) ابتدای داده‌برداری، (ب) پس از اتصال مکانیزم لنگ و (ج) پس از ایجاد سایش بعد از مدت ۶۰ ساعت کارکرد سامانه

شکل ۱۲ مربوط به نمایش سطح فشار صدا از سه زمان متفاوت سامانه (به شرح الف) ابتدای داده‌برداری (ب) پس از اتصال مکانیزم لنگ و فتر با هدف انجام آزمون‌های شتابدار پس از ۳۰ ساعت کارکرد سامانه و به‌منظور تسریع در فرآیند سایش و درنهایت (ج) پس از ایجاد سایش بعد از مدت ۶۰ ساعت کارکرد سامانه، می‌باشد. فرکانس درگیری در ابتدای کار سامانه مقداری معادل ۶۴/۸۲ دسی‌بل را نشان می‌دهد که بعد از اتصال مکانیزم لنگ و مدت ۳۰ ساعت کارکرد این مقدار به عدد ۴۴/۵ دسی‌بل می‌رسد. این میزان کاهش به دلیل وجود عیوب اولیه از جمله عیوب حین ساخت در پروفیل چرخ‌دنده بوده که به مرور و بعد از مدتی کارکرد از بین می‌روند. اما در مرحله سوم میزان فرکانس درگیری به عدد ۶۶/۸۷ دسی‌بل می‌رسد که این افزایش در فرکانس درگیری به همراه به وجود آمدن باندهای جانبی نشان‌دهنده وجود عیب سایش در پینیون می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از سامانه و مدت زمان ایجاد عیب سایش برای یک چرخ‌دنده و نیز به کمک روش‌های آماری مخصوصاً روش توزیع وایبل<sup>۲</sup> می‌توان عمر مفید جعبه‌دنده را تخمین زده و از این الگو برای تخمین عمر مفید سایر ماشین‌های مشابه استفاده نمود.

## ۵- نتیجه‌گیری

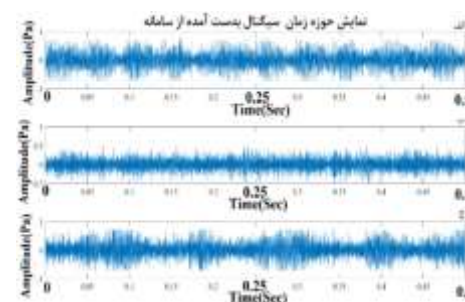
در این پژوهش به‌منظور بررسی عمر مفید باقیمانده جعبه‌دنده نسبت به طراحی، ارزیابی و ساخت سامانه‌ای اقدام گردید. با توجه به عیب



شکل ۱۱: نمایش حوزه زمان داده‌های به‌دست‌آمده از سامانه، (الف) ابتدای داده‌برداری، (ب) بعد از اتصال مکانیزم لنگ و فتر و پس از ۳۰ ساعت کارکرد، (ج) پس از ایجاد سایش بعد از مدت ۶۰ ساعت کارکرد سامانه

از مقایسه حوزه فرکانس (شکل ۱۰) سیگنال‌های قبل و بعد از اتصال مکانیزم لنگ و فتر، با توجه به عدم تغییر در فرکانس درگیری چرخ‌دنده (۵۰۰ هرتز) مشخص گردید که مکانیزم تأثیری بر روی داده‌های ایجادشده نخواهد داشت، این موضوع قبلاً توسط تحلیل آدامز هم مشخص شده بود. مقایسه بین سیگنال‌های به‌دست‌آمده از سامانه و نیز مدل شبیه‌سازی شده مشخص می‌کند که داده حاصل از شبیه‌سازی دقت کافی را داشته و به این ترتیب صحت اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی نیز تأیید می‌گردد.

به‌منظور تخمین عمر چرخ‌دنده داده‌های سامانه حین کارکرد دستگاه طی مدت زمان ۶۰ ساعت اخذ گردید. بررسی این سیگنال‌ها با هدف به دست آوردن ویژگی‌های برتر انجام شد. همان‌طور که پیش از این نیز آورده شده است، داده‌های به‌دست‌آمده در حوزه زمان (شکل ۱۱) برای تشخیص عیوب مناسب نبوده و به‌جز چند ویژگی آماری، نمی‌توان مشخصه منحصر به فردی در این حوزه تعریف کرد.



شکل ۱۱: نمایش حوزه زمان داده‌های به‌دست‌آمده از سامانه، (الف) ابتدای داده‌برداری، (ب) بعد از اتصال مکانیزم لنگ و فتر و پس از ۳۰ ساعت کارکرد، (ج) پس از ایجاد سایش بعد از مدت ۶۰ ساعت کارکرد سامانه

به همین منظور داده‌ها از حوزه زمان به‌وسیله تبدیل سریع فوریه<sup>۱</sup> (FFT) به حوزه فرکانس برده می‌شود. در این پژوهش به‌منظور تشخیص عیب سایش از روش سطح فشار صدا SPL بهره برده شده

<sup>۲</sup> Weibull distribution

<sup>۱</sup> Fast fourier transform

## ۶- منابع

- [1] X. Liang, M. J. Zuo, and Z. Feng, "Dynamic modeling of gearbox faults: A review," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 98, pp. 852–876, 2018. doi: [10.1016/j.ymssp.2017.05.024](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.024).
- [2] W. Caesarendra, A. Widodo, and B. S. Yang, "Combination of probability approach and support vector machine towards machine health prognostics," *Probabilistic Eng. Mech.*, vol. 26, no. 2, pp. 165–173, 2011. doi: [10.1016/j.probengmech.2010.09.008](https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2010.09.008).
- [3] G. Dalpiaz, A. Rivola, and R. Rubini, "Effectiveness and sensitivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 14, no. 3, pp. 387–412, 2000. doi: [10.1006/mssp.1999.1294](https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1294).
- [4] K. Feng, W. A. Smith, R. B. Randall, H. Wu, and Z. Peng, "Vibration-based monitoring and prediction of surface profile change and pitting density in a spur gear wear process," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 165, p. 108319, 2022. doi: [10.1016/j.ymssp.2021.108319](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108319).
- [5] O. D. Mohammed and M. Rantatalo, "Gear fault models and dynamics-based modelling for gear fault detection—A review," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 117, p. 104798, 2020. doi: [10.1016/j.engfailanal.2020.104798](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104798).
- [6] J. Xia, R. Huang, Y. Liao, J. Li, Z. Chen, and W. Li, "Digital twin-assisted gearbox dynamic model updating toward fault diagnosis," *Front. Mech. Eng.*, vol. 18, no. 2, p. 32, 2023. doi: [10.1007/S11465-023-0748-0](https://doi.org/10.1007/S11465-023-0748-0).
- [7] Q. Chen, Y. Ma, S. Huang, and H. Zhai, "Research on gears' dynamic performance influenced by gear backlash based on fractal theory," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 313, pp. 325–332, 2014. doi: [10.1016/J.APSUSC.2014.05.210](https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2014.05.210).

بررسی شده در این پژوهش (سایش) و نیز مکانیزم شتاب دهنده روند ایجاد عیب مذکور نیاز به بررسی تداخل ارتعاش ایجاد شده ناشی از مکانیزم ایجاد بار مقاوم با داده‌های مربوط به خرابی چرخ‌دنده می‌باشد. در همین خصوص و قبل از ساخت نمونه تجربی سامانه تخمین عمر مفید باقیمانده چرخ‌دنده، با استفاده از شبیه‌سازی مکانیزم اعمال بار مقاوم و بررسی نیروهای وارد بر محور ورودی نسبت به اخذ داده‌های ارتعاشی حاصل از عملکرد مکانیزم لنگ و فنر اقدام گردید. در این پژوهش تأثیر کارکرد مکانیزم اعمال بار مقاوم بر روی خصوصیات دینامیکی کل سامانه با در نظر گرفتن نیروی حاصل از کار فنر و نیروی حاصل از آن بررسی شد. ارتعاش پوسته تحت تأثیر پارامترهای غیرخطی چرخ‌دنده مانند سایش و جنس قطعات استفاده شده، غیرخطی می‌باشد. با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی انجام شده در دو حالت اعمال بار مقاوم و حالت بدون اعمال بار با بررسی فرکانس درگیری چرخ‌دنده مشخص گردید میزان ارتعاش ایجاد شده ناشی از کار مکانیزم لنگ و فنر تأثیر معنی‌داری بر روی ارتعاش کل سامانه نخواهد داشت. در نهایت و بعد از ساخت سامانه و مقایسه داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی، اعتبار داده‌های به‌دست‌آمده تأیید گردید و نیز مشخص شد که ارتعاش حاصل از مکانیزم لنگ و فنر (که به‌منظور اعمال بار مقاوم در خروجی جمع‌دنده استفاده شده است) تداخلی با داده‌های تشخیص عیب چرخ‌دنده نخواهد داشت. پس از انجام ارزیابی مکانیزم لنگ و فنر داده‌های مربوط به زمان شروع کار تا رؤیت ویژگی‌های عیب سایش در چرخ‌دنده اخذ و نسبت به تحلیل این سیگنال‌ها در حوزه فرکانس با روش SPL اقدام گردید. به همین منظور داده‌های صوتی از سامانه در سه مرحله اخذ و پردازش گردید. در ابتدا با توجه به وجود برخی عیوب ساخت به مرور و طی ۳۰ ساعت کارکرد اولیه سامانه، کاهش فرکانس درگیری از ۶۴/۸۲ به ۴۴/۵ دسی‌بل مشاهده شد، پس از این دامنه فرکانس درگیری با افزایش مواجه و به مقدار ۶۶/۸۷ دسی‌بل رسید و همچنین ایجاد باندهای جانبی نیز در اطراف این فرکانس به وضوح قابل مشاهده شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد با استفاده از نتایج پژوهش و به کمک توابع آماری مانند توزیع وایبل می‌توان عمر مفید جمع‌دنده را تخمین زد.

تشکر و قدردانی: بدین‌وسیله از مدیریت و پرسنل خدوم شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) که در مدت انجام این پژوهش کمال همکاری را داشتند، تقدیر و تشکر می‌گردد.

- 
- [11] G. Litak and M. I. Friswell, "Dynamics of a gear system with faults in meshing stiffness," *Nonlinear Dyn.*, vol. 41, pp. 415–421, 2005. doi: [10.1007/S11071-005-1398-Y](https://doi.org/10.1007/S11071-005-1398-Y).
- [12] G. A. Ambaye and H. G. Lemu, "Dynamic analysis of spur gear with backlash using ADAMS," *Mater. Today: Proc.*, vol. 38, pp. 2959–2967, 2021. doi: [10.1016/j.matpr.2020.09.309](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.309).
- [13] R. K. Y. Chang, C. K. Loo, and M. V. C. Rao, "Enhanced probabilistic neural network with data imputation capabilities for machine-fault classification," *Neural Comput. Appl.*, vol. 18, pp. 791–800, 2009. doi: [10.1007/s00521-008-0215-1](https://doi.org/10.1007/s00521-008-0215-1).
- [8] A. Kahraman and R. Singh, "Non-linear dynamics of a spur gear pair," *J. Sound Vib.*, vol. 142, no. 1, pp. 49–75, 1990. doi: [10.1016/0022-460X\(90\)90582-K](https://doi.org/10.1016/0022-460X(90)90582-K).
- [9] S. Ebrahimi and P. Eberhard, "Rigid-elastic modeling of meshing gear wheels in multibody systems," *Multibody Syst. Dyn.*, vol. 16, pp. 55–71, 2006. doi: [10.1007/S11044-006-9021-7](https://doi.org/10.1007/S11044-006-9021-7).
- [10] Y. Wang, H. M. E. Cheung, and W. J. Zhang, "Finite element modelling of geared multi-body system," *Commun. Numer. Methods Eng.*, vol. 18, no. 11, pp. 765–778, 2002. doi: [10.1002/CNM.526](https://doi.org/10.1002/CNM.526).