

# Miniaturization of combustion gas transmission equipment using traveling wave rotary piezoelectric actuator with the approach of improving safety and functional characteristics

Ebrahim Abolghasemi<sup>1</sup>, Ahmad Reza Khoogar<sup>1\*</sup>, Mehrdad Khandani<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Malek Ashtar University/ Department of Mechanic

## ABSTRACT

The space and weight limitation in air systems has always created the need to improve characteristics such as dimensions, weight, accuracy, and safety in the equipment used in these systems. This research uses the advantages of piezoelectric actuators, such as miniaturization, self-locking, working in harsh conditions, high safety, etc., to propose their use as actuators in combustion gas transmission equipment. A traveling-wave rotary piezoelectric actuator was selected, and a gas valve was installed in it. In the numerical section, the actuator was analyzed by the finite element, and frequency sensitivity analysis was performed. Then a prototype made in the optimal state. In the experimental section, the prototype parameters were evaluated and validated with the numerical results. In the results section, the efficiency of the piezoelectric actuator as a separate actuator was proven by measuring the output speed and torque. By comparing the geometrical parameters, it was shown that the combustion gas transmission was able to reduce 28%, 57%, and 50% in diameter, volume, and weight, respectively. By conducting environmental tests, it was found that this equipment can prevent changes in the gas valve status in harsh environmental conditions caused by vibrations and temperature changes and provide a high safety factor.

## KEYWORDS

Piezoelectric actuator, gas transmission equipment, miniaturization, Weight Loss, safety improvement

---

\* Corresponding Author: Email: khoogar@mut.ac.ir

## 1. Introduction

If all types of piezoelectric actuators are considered, we can count many different and diverse types in different fields such as robotics, medicine, optics, military, etc. In this regard, we can refer to the research of Lino et al. [1]. They designed a rotary micro-actuator for use in a wristwatch that could provide rotary movement with a small signal in a simple structure with mass production capabilities. Lu et al. [2] used a rotary actuator for a space application that required high reliability. Jurins et al. [3] also used piezoelectric actuators to create a multi-degree-of-freedom rotational movement in the lens of small satellites. Li et al. [4] also designed a rotary micro-actuator for use in an endoscopic camera. It can be seen that the field of actuator design with a new structure is one of the areas of interest in piezoelectric actuators. Conventional actuators currently used in combustion gas transmission equipment are not capable of miniaturization and lightening for use in special applications and more compact spaces. Therefore, the present research proposes and builds a traveling wave rotary piezoelectric actuator for combustion gas transmission equipment for the first time.

## 2. Structure and principles

Combustion gas transfer equipment is a safety mechanism that prevents unwanted and accidental transfer of combustion gas. In the first step, the combustion gas transmission equipment was designed. The initial design is shown in Figure 1.

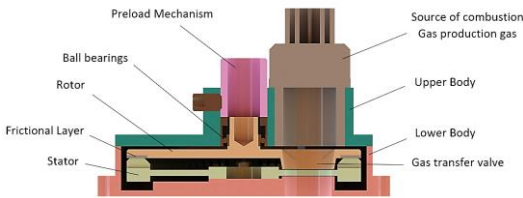


Figure 1. Actuator Structure

If signals with temporal and spatial phase differences are applied to four groups of piezoelectric elements, bending modes can be created and stator elements can be moved elliptically. The equation of the motion path of the points on the stator surface is an elliptic curve which is given in equation (1) [5].

$$\left(\frac{\xi_p}{W_0}\right)^2 + \left(\frac{\varsigma_p}{W_0 h k}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

## 3. Results and Discussion

Finite element simulation has been used to obtain modal analysis and harmonic responses. The materials used in the stator body are aluminum 6062 and type PZT-5h piezoelectric ceramics. Based on the  $B_{05}$  mode, the number and arrangement of piezoelectric elements have been considered. Finally, after completing all the steps and Performing frequency sensitivity analysis, the values of 27.62 kHz were obtained for functional mode. Then time-dependent analysis was used to obtain the traveling wave, the result of which is shown in Figure 2.

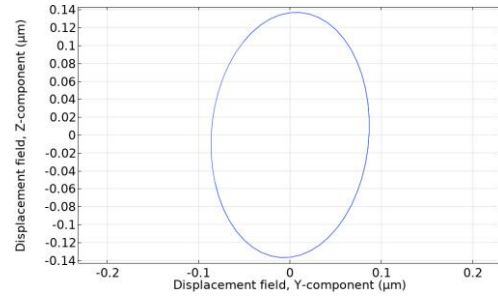


Figure 2. Elliptical path of a point located on the stator

After the completion of the simulation process, the stator is made and the piezoelectric elements are assembled on the stator as shown in Figure 3.



Figure 3. Stator and wiring

To verify the results, the resonance frequency of the stator has been measured by an impedance analyzer (hp4194A), the results of which are shown in Figure 4.

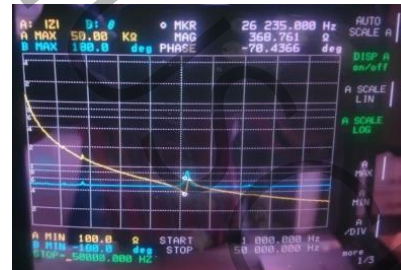


Figure 4. The result of the impedance analyzer

According to the frequency obtained from the numerical simulation and experimental test, the difference in the obtained results indicates an error of about 5.2%. The amount of error can be caused by neglecting the thickness of the adhesive layer, stator wiring, and manufacturing and assembly errors. To measure

rotational speed, a tachometer device (Lutron DT-2268) and to measure torque, weight, and pulley were used. The measured results are shown in Figure 5.

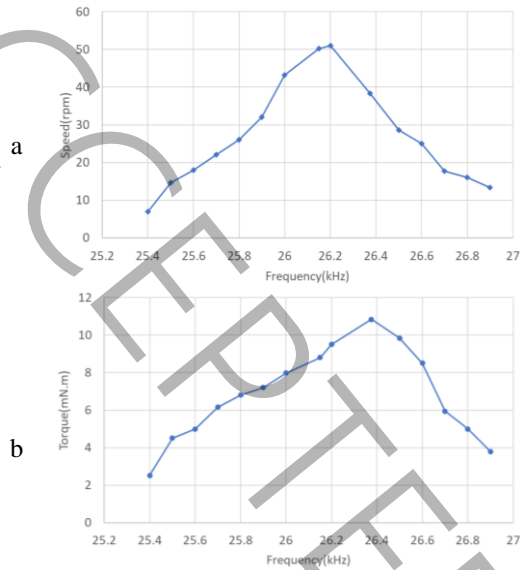


Figure 5. (a) Frequency-speed and (b) frequency- torque

The maximum value of both graphs was obtained in the desired resonance frequency range, i.e., 26.235 kHz. By measuring the geometric characteristics, it was also observed that the total weight of the actuator is equal to 35 grams and its volume dimensions are equal to 98125 m<sup>3</sup>, which is a 28% reduction in dimensions compared to the existing sample. Diametrically, a 57% reduction in overall volume and a 50% reduction in weight have been created. Vibration tests and high-temperature and low-temperature tests were defined to check the reliability and safety of the operation. In the vibration test, it was checked whether the environmental vibrations would lead to a change in the state of the rotor. The obtained results showed that due to the existence of the preload mechanism, there will be assurance that there will be no change in the status of the rotor. In the high-temperature and low-temperature tests, first, the actuator set was placed in the test chamber, and temperature cycles were applied to it the results are shown in Figure 6.

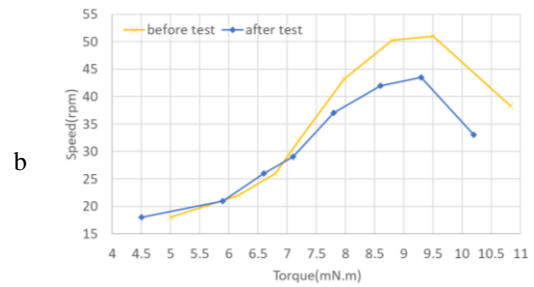
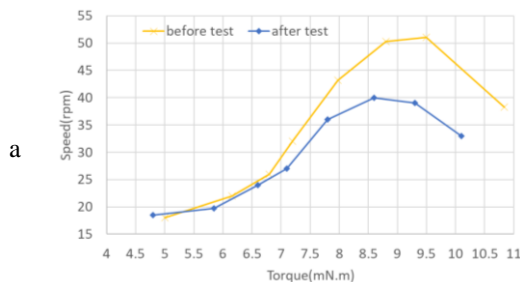


Figure 6. (a) High-temperature and (b) Low-temperature

The functional changes in the high-temperature test (31% reduction) are less than the low-temperature test (15% reduction). But in general, it can be said that temperature changes have little effect on the actuator's performance.

#### 4. Conclusions

The resonance frequency was obtained from the numerical solution and experimental test as 27.62 kHz and 26.235 kHz, respectively, and had an error of about 5.2%. Measurements of the mechanical characteristics of speed and torque showed that this actuator has all the capabilities of a rotary actuator or motor and can be used in other similar applications. The total weight of the combustion gas transmission equipment is equal to 35 gr and its volumetric dimensions are equal to 98125 m<sup>3</sup>. By comparing the weight and dimensions of the existing sample and the manufactured sample, respectively, a reduction of 28% in dimensions, a 57% decrease in the total volume, and a 50% decrease in the weight of the actuator were observed. This issue shows the achievement of the goal of the research, i.e., miniaturization and simplification of the equipment. Also, by conducting functional and environmental tests, the efficiency and ability to work in harsh environmental conditions were checked and its high safety was also proven.

#### 5. References

- [1] Iino, A., Suzuki, K., Kasuga, M., Suzuki, M., & Yamanaka, T, Development of a self-oscillating ultrasonic micro-motor and its application to a watch, *Ultrasonics*, 38(1-8) (2000) 54-59.
- [2] X. Lu, J. Hu, L. Yang, C. Zhao, A novel in-plane mode rotary ultrasonic motor, *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(2) (2014) 420-424.
- [3] V. Jūrėnas, G. Kazokaitis, D. Mažeika, 3DOF ultrasonic motor with two piezoelectric rings, *Sensors*, 20(3) (2020) 834.
- [4] J. Li, Z. Sun, H. Yan, J. Chen, Design of a Magnetically Anchored Laparoscope Using Miniature Ultrasonic Motors, *Micromachines*, 13(6) (2022) 855.
- [5] C. Zhao, *Ultrasonic motors: technologies and applications*, Springer Science & Business Media, 2011.

# کوچک‌سازی تجهیز انتقال گاز احتراق با استفاده از عملگر پیزوالکتریک دورانی با

## موج‌رونده با رویکرد بهبود ایمنی و مشخصه‌های عملکردی

ابراهیم ابوالقاسمی<sup>۱</sup>، احمد رضا خوگر<sup>۱\*</sup>، مهرداد خاندانی<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

\* khoogar@gmail.com

### چکیده

در مقاله‌ی حاضر با بهره‌گیری از ویژگی‌های منحصر به فرد عملگرهای پیزوالکتریک همچون قابلیت کوچک‌سازی، خودقفل‌ی، قابلیت کار در شرایط سخت، ایمنی بالا و غیره، استفاده از آن به عنوان عملگر در تجهیز انتقال گاز احتراق پیشنهاد شده است. بدین منظور عملگر پیزوالکتریک دورانی انتخاب شده و در پیچه انتقال گاز در آن تعبیه گردیده است. در بخش شبیه‌سازی، عملگر به کمک المان محدود تحلیل شده و سپس تحت تحلیل حساسیت فرکانسی قرار گرفته و در نهایت یک نمونه از آن ساخته شده است. در بخش تجربی پارامترهای نمونه ساخته شده ارزیابی گردیده و با نتایج حل عددی مقایسه و صحت‌سنجی شده است. در بخش نتایج با انجام تست عملکردی و اندازه‌گیری مشخصه‌های خروجی سرعت و گشتاور، کارایی عملگر پیزوالکتریک به عنوان یک عملگر مجزا اثبات گردیده است. سپس با مقایسه پارامترهای هندسی نشان داده شده است که عملگر توانسته کاهش ۲۸٪ در ابعاد قطری، کاهش ۵۷٪ در حجم کلی و کاهش ۵۰٪ در وزن را تامین نماید. در انتها با انجام تست‌های محیطی نشان داده شده است که عملگر می‌تواند در شرایط محیطی سخت ناشی از ارتعاشات و تغییرات دمایی از تغییر در وضعیت در پیچه انتقال گاز ممانعت به عمل آورده و ضریب ایمنی بالایی را تامین نماید.

### کلمات کلیدی

عملگر پیزوالکتریک-تجهیز انتقال گاز-کوچک‌سازی-سبک‌سازی-بهبود ایمنی

موتورهای الکترومگنت دارای استفاده‌های فراوانی بوده و می‌توان آن‌ها را از پرکاربردترین نوع عملگرها و موتورها دانست. این موتورها معمولاً دارای گشتاورهای پایین در سرعت‌های بالا می‌باشند. از همین رو برای تولید گشتاور بالا نیاز به یک گیربکس افزاینده خواهد بود که این تجهیز مانعی جدی در برابر کوچک‌سازی و سبک‌سازی سیستم‌هایی می‌باشد که موتورهای الکترومگنتی به عنوان عملگر در آن‌ها به کار رفته‌اند. علاوه بر این به علت وجود لقی در گیربکس‌ها، رسیدن به دقت‌های بالا نیز ممکن نخواهد بود [۱]. همچنین مغناطیسی بودن این موتورها منجر گردیده تا استفاده از آن‌ها در شرایط مغناطیسی با مشکل روبرو شود. اما با پیدایش عملگرهای پیزوالکتریک فصل جدیدی حوزه‌ی عملگرها پدید آمد. عملگرهای پیزوالکتریک تجهیزاتی هستند که از خاصیت معکوس مواد پیزوالکتریک جهت تولید حرکت مکانیکی استفاده می‌کنند و می‌توانند در انجام وظایف خاص صنعتی و هوایی مورد استفاده قرار گیرند [۲]. این عملگرها با داشتن ساختار مناسب برای تحریک مستقیم و بدون نیاز به گیربکس، تامین گشتاور بالا در سرعت پایین، مصرف انرژی پایین‌تر و رزولوشن بالا در کنترل، می‌توانند معایب موتورهای الکترومگنتی را جبران نمایند [۳-۵]. عملگرهای پیزوالکتریک دارای جرم کم و اینرسی پایینی هستند، به همین دلیل زمان پاسخ‌گویی آن‌ها نیز بسیار سریع می‌باشد. این عملگرها غیر مغناطیسی بوده، تکرارپذیری بالایی داشته و قابلیت کار در مقیاس میکرومتر و نانومتر را نیز دارا می‌باشند. مزیت‌های دیگری نظیر خوددق‌لی در حالت بی‌باری، قابلیت کار در شرایط سخت و خشن، قابلیت کار در خلا، قابلیت استفاده در دماهای بالا و پایین از جمله سایر مزیت‌های این عملگرها می‌باشد [۵-۷]. ساختار عملگرهای پیزوالکتریک اجازه می‌دهد که محرک‌های مرسوم و یا پیچیده‌ای که در حال حاضر در کاربردهای خاصی همچون تجهیز انتقال گاز استفاده می‌شوند را تغییر داده و با یک طراحی جدید سیستم را ساده سازی نمود [۸]. عملگرهای پیزوالکتریک به واسطه‌ی داشتن نسبت توان/حجم بالا، تولید نیرو و گشتاور بالا در عین داشتن ابعاد کوچک می‌توانند مخاطب نیازمندی در تجهیزاتی قرارگیرند که در کاربردهای هوایی استفاده داشته و مباحثی همچون وزن، ابعاد و ایمنی در آن‌ها حائز اهمیت می‌باشد [۹].

عملگرهای پیزوالکتریک می‌توانند در کاربردهای متفاوتی که نیاز به یک عملگر یا موتور با ساختاری متفاوت برای انجام فعالیت خاصی وجود دارد، مورد استفاده قرارگیرند. چنانچه تمامی انواع عملگرهای پیزوالکتریک مدنظر قرارگیرد، می‌توان انواع بسیار متفاوت و متنوعی را در زمینه‌های مختلفی از جمله رباتیک، پزشکی، اپتیک، نظامی و غیره را احصا نمود. در همین راستا می‌توان به پژوهش‌های لینو و همکاران [۱۰] اشاره نمود. آن‌ها یک میکروعملگر دورانی به جهت استفاده در ساعت مچی طراحی کردند که می‌توانست حرکت دورانی را با یک سیگنال کوچک در یک ساختار ساده و با قابلیت تولید انبوه فراهم نماید. در سال ۲۰۱۴ لو و همکاران [۱۱] برای یک کاربرد فضایی که نیازمند قابلیت اطمینان بالایی بود از یک عملگر دورانی استفاده کردند که در آن از مکانیزم لانگیون جهت تولید موج‌رونده در استاتور استفاده شده بود. ماشیمو [۱۲] در سال ۲۰۱۵ پیشنهاد استفاده از یک میکروعملگر دورانی در لنز دوربین گوشی‌های هوشمند را مطرح کرد. او در عملگر خود تنها از دو المان پیزوالکتریک جهت تحریک استاتور بهره برده بود. همچنین استفاده از عملگر دورانی برای به حرکت درآوردن میکروپروانه‌ی یک تجهیز، جهت حرکت در زیر آب در سال ۲۰۱۹ توسط لو و همکاران [۱۳] مطرح گردید. جورینز و همکارانش [۸] نیز عملگرهای پیزوالکتریک را برای ایجاد یک حرکت دورانی چند درجه آزادی در لنز ماهواره‌های کوچک مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها همچنین ادعا کردند که این مکانیزم می‌تواند در بازوهای رباتیک نیز مورد استفاده قرارگیرد. شیو و همکاران [۱۴] برای به چرخش درآوردن یک پروانه‌ی میکروپرنده کوچک، یک عملگر جدید با روش تحریک متفاوت را طراحی نمودند که می‌توانست در ولتاژ پایین کار کند. لی و همکاران [۱۵] نیز یک میکروعملگر دورانی برای استفاده در دوربین آندوسکوپی طراحی کردند. در ادامه و در راستای طراحی ساختارهای جدید، یک عملگر با ساختار جدید استاتور توسط دانگ و همکاران [۱۶] ارائه گردید. آنها در این عملگر با ادغام وظایف روتور و استاتور، از روتور نیز برای تولید حرکت در موتور کمک گرفتند و توانستند از این طریق خروجی‌های عملگر را افزایش دهند. رینزیوناک و همکاران [۱۷] نیز توانستند یک استاتور که دارای ساختار سه‌عضوی برای ایجاد تحریک بود را در جهت افزایش گشتاور خروجی طراحی و تست نمایند. ون و همکاران [۱۸] المان‌های پیزوالکتریک را علاوه بر استاتور، بر روی روتور نیز قرار دادند و توانستند از روتور نیز برای ایجاد حرکت استفاده کنند. عملگر آن‌ها قادر بود با یک ولتاژ پایین به سرعت و گشتاور نسبتاً خوبی دست پیدا کنند. این عملگر در صنعت زیست پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است. اولین استفاده از عملگرهای پیزوالکتریک در تجهیز انتقال گاز احتراق در سال ۲۰۱۳ و توسط تانگ و وانگ [۱۹] صورت گرفت. در این پژوهش یک

عملگر پیزوالکتریک خطی برای ایجاد حرکت در مکانیزم بکارگرفته شد. این پژوهشگران [۲۰] دو سال بعد نیز پژوهش بر روی این عملگر را ادامه داده و به بهینه‌سازی هندسی استاتور برای دستیابی به فرکانس کاری پایین‌تر و خروجی‌های بیشتر پرداختند. تانگ و همکاران [۲۱] و سان و همکاران [۲۲] نیز در سال ۲۰۲۰ عملگرهای خطی دیگری به جهت استفاده در تجهیز انتقال گاز احتراق پیشنهاد کردند. در سال‌های اخیر با توجه به توسعه فناوری ممز، برخی محققین تجهیزات فوق را در این حوزه نیز بررسی کرده‌اند که می‌توان به مطالعات مراجع [۲۳]، [۲۴] و [۲۵] اشاره نمود.

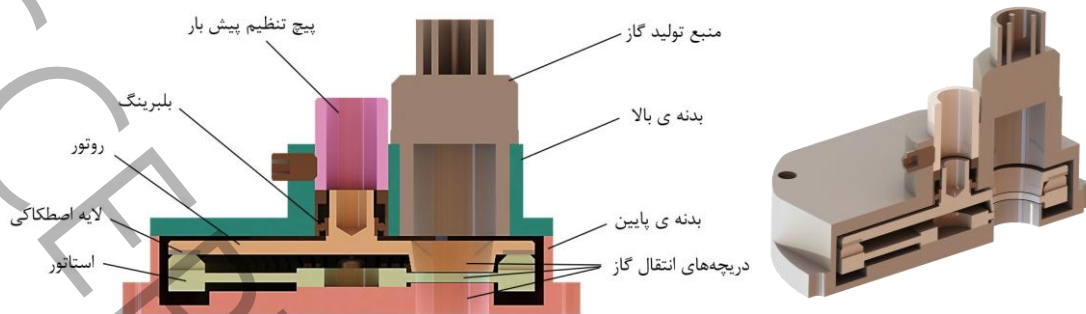
در مرور تاریخچه فوق تنها تنوع طراحی در حوزه‌ی عملگرهای پیزوالکتریک دورانی بررسی گردید. در صورتی که تمامی انواع عملگرهای پیزوالکتریک در نظر گرفته شود، می‌توان گفت پهنه‌ی وسیعی از عملگرها با ساختار و کاربرد مختلف مشاهده خواهد گردید. در همین راستا هوانگ و لی [۲۶] در سال ۲۰۲۱ در مطالعات طولی خود که بین حدود ۲۵۰ اثر تحقیقاتی صورت گرفت، انواع عملگرهای پیزوالکتریک را در حوزه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها خلاصه‌ای از مقالات منتشر شده در سال‌های اخیر تهیه نموده و یک برآورد بسیار کامل از حوزه‌هایی که توسط محققین در مقالات، کنفرانس‌ها، اختراعات و رساله‌های دکتری مورد مطالعه قرار گرفته ارایه دادند. نتایج بررسی آن‌ها جریان‌های غالب در حوزه‌های مطالعاتی، سال‌های انتشار، کشورهای ناشر و مجلات را نشان داد. می‌توان مشاهده کرد حوزه‌ی طراحی عملگر با ساختار جدید یکی از حوزه‌های مورد توجه در عملگرهای پیزوالکتریک می‌باشد. تنوع و تعدد مقالات، گواه این مطلب می‌باشد که عملگرهای پیزوالکتریک با توجه به ساختار شناور خود، امکان طراحی‌های جدید با کاربردهای مختلف را در حوزه‌های متنوعی همچون رباتیک، پزشکی، میکروساختارهای ممز، تجهیزات هوشمند، ماهواره و حوزه‌های نظامی را فراهم کرده است.

عملگرهای مرسوم می‌که در حال حاضر در تجهیز انتقال گاز احتراق استفاده می‌شود دارای یک موتور الکترومغناطیسی می‌باشد که دارای مخاطراتی همچون مغناطیسی بودن، نویز پذیری، نسبت وزن به گشتاور بالا می‌باشند. همچنین امکان کوچک‌سازی و سبک‌سازی برای استفاده در کاربردهای خاص و فضاهای فشرده‌تر در آن‌ها وجود ندارد. همچنین برخی پژوهش‌ها نیز بر اساس ابعاد دریاچه‌ی گاز کوچک انجام شده است که در این نیازمندی قابل طرح و استفاده نمی‌باشد. بنابراین در همین راستا و با توجه به اهمیت بیان شده، در پژوهش حاضر برای اولین بار استفاده از عملگر پیزوالکتریک دورانی با موج‌رونده به عنوان عملگر تجهیز انتقال گاز احتراق پیشنهاد، تست و ساخته شده است. در این پژوهش پس از طراحی ساختار جدید عملگر متناسب با محل مورد استفاده، به بیان اصول عملکردی این عملگرها پرداخته شده است. در ادامه شبیه‌سازی و تحلیل حساسیت فرکانسی استاتور به جهت دستیابی به یک عملگر بهینه و حذف تداخلات فرکانسی صورت گرفته است. در بخش آخر نیز پس از صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی به بررسی مشخصه‌های خروجی و تست‌های محیطی به جهت اثبات کارایی عملگر پرداخته شده است.

## ۲- ساختار عملگر

تجهیز انتقال گاز احتراق در واقع یک مکانیزم ایمنی است که از انتقال ناخواسته و تصادفی گاز احتراق ممانعت به عمل می‌آورد. این مکانیزم دارای یک مسیر عبور گاز می‌باشد که در وضعیت غیر عملکردی توسط یک دیافراگم مسدود بوده و در وضعیت عملکردی با جابجا شدن دیافراگم و قرار گرفتن دریاچه‌ی آن در مقابل مسیر عبور، اجازه انتقال گاز داده می‌شود. در همین راستا در ابتدا مدل تجهیز انتقال گاز احتراق بر اساس ورودی‌های مساله مدل‌سازی گردید تا بتوان ابعاد نهایی استاتور که بخش اصلی عملگر می‌باشد را بدست آورد. طرح اولیه با قطر خارجی ۴ سانتی‌متر در شکل ۱ نشان داده شده است. عملگر از چهار بخش کلی استاتور، روتور، بدنه و مکانیزم پیش‌بار تشکیل شده است. استاتور توسط سه پیچ بر روی بدنه پایین ثابت گردیده و روتور به همراه یک بلبرینگ در بدنه بالا جانمایی شده است. در نهایت استاتور و روتور به واسطه لایه اصطکاکی از جنس پی‌تی‌اف‌ای-برنز در تماس با یکدیگر قرار دارند. مکانیزم پیش‌بار به کمک یک پیچ جانمایی شده در بالای بلبرینگ، روتور را بر روی استاتور می‌فشارد و یک نیروی پیش‌بار قابل تنظیم را ایجاد می‌نماید. رینگ پیزوالکتریک و لایه اصطکاکی با استفاده از چسب به استاتور و روتور متصل شده‌اند. به منظور ایجاد مسیر عبور گاز احتراق بر روی روتور، استاتور و بدنه‌ی پایینی دریاچه‌هایی تعبیه شده است که در وضعیتی غیرکاری این دریاچه‌ها در وضعیت غیر هم‌راستا قرار می‌گیرد و مسیر عبور گاز مسدود می‌شود. در وضعیت عملکردی روتور که نقش همان دیافراگم را دارد، دوران نموده و با

قرارگیری دریچه آن در مقابل دریچه استاتور و بدنه، مسیر عبور باز شده و امکان عبور گاز احتراق فراهم می‌گردد. ابعاد هندسی اجرای عملگر در کمینه‌ترین حالت ممکن طراحی شده است تا بتوان نیازمندی کاهش وزن و ابعاد را تامین نماید.



شکل ۱: ساختار عملگر به همراه بخش‌های تشکیل دهنده

Fig. 1. The structure of the actuator and constituent parts

### ۳- اصول عملکردی

#### ۲-۱- تشکیل موج‌رونده

برای تولید موج‌رونده در استاتور از اصل برهم‌نهی دو موج سینوسی ایستا و اعمال آن بر چهار گروه المان پیزوالکتریک استفاده می‌شود. این دو موج دارای فازهای متفاوت بوده اما فرکانس و دامنه‌ی آن‌ها یکسان می‌باشد و دارای طول موج  $\lambda$ ، دامنه  $V$  و اختلاف فاز  $\phi$  هستند. معادله‌ی دو موج سینوسی با اختلاف فاز  $\phi$  در معادلات (۱) و (۲) بیان شده است.

$$y_1(x, t) = V \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

$$y_2(x, t) = V \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (2)$$

که  $k$  تعداد موج در واحد فاصله،  $x$  راستای انتشار موج،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای و  $t$  زمان می‌باشد. حال جمع آثار موج‌های  $y_1$  و  $y_2$  پس از مختصر نویسی به صورت زیر بدست می‌آید.

$$y(x, t) = y_1 + y_2 = V (\sin(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t + \phi)) \quad (3)$$

در صورتی که  $a = kx - \omega t + \phi$ ،  $a - b = -\phi$ ،  $b = kx - \omega t$  و  $a + b = 2kx - 2\omega t + \phi$  در نظر گرفته شود، با استفاده از رابطه‌ی (۴) می‌توان رابطه‌ی موج برآیند به صورت معادله (۵) را بدست آورد.

$$\sin a + \sin b = 2 \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \quad (4)$$

$$y(x, t) = 2V \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right) \quad (5)$$

رابطه بدست آمده معادله یک موج‌رونده خواهد بود. این موج متشکل از یک موج سینوسی که دارای فرکانس و طول موج یکسان برابر با موج‌های  $y_1$  و  $y_2$  می‌باشد، دامنه‌ای از  $2A \cos(\phi/2)$  و دارای فاز  $\phi/2$  می‌باشد که اگر  $\phi$  مقادیر دلخواهی از مضرب‌های فرد یا زوج  $\pi$  باشد، آنگاه، موج برآیند دارای دامنه‌ای بین صفر و  $2V$  خواهد داشت.

#### ۲-۲- حرکت بیضوی

حال چنانچه بر اساس قاعده بالا دو سیگنال تحریک با اختلاف فاز زمانی و مکانی  $\pi/2$  به چهار گروه المان پیزوالکتریک اعمال شود، می‌توان مودهای خمشی  $B_n$  را در بدنه الاستیک استاتور ایجاد نمود و موج برآیند تولید شده می‌تواند در جهت معینی در استاتور منتشر شود. در نتیجه‌ی همین حرکت، المان‌های استاتور می‌توانند به صورت بیضوی جابجا شوند. در این حالت حرکت بیضوی

دندانه‌های استاتور که به واسطه لایه اصطکاکی با روتور در تماس است تحت یک پیش‌بار معین موجب چرخش روتور خواهد شد. می‌توان جابجایی بیضوی دندانه‌های استاتور را به این صورت بیان نمود که چنانچه فرم رینگی استاتور در فرم گسترده به شکل یک تیر در نظر گرفته شود، هندسه‌ی شکل ۲ ایجاد خواهد شد. راستای محور  $x$  مختصات فرضی بر روی تار خنثی این تیر منطبق شده است. چنانچه فرض شود که قطر استاتور یعنی  $r_c = 1$  باشد، رابطه‌ی موج‌رونده و روابط را می‌توان بر اساس مرجع [۲۷] به صورت زیر نوشت.

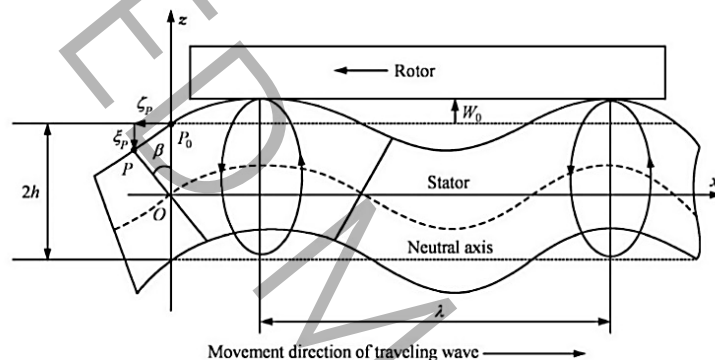
$$w = W_0 \sin(n\theta - \omega_n t) \quad (۶)$$

با در نظر گرفتن تغییر شکل کوچک در تیر، روابط زیر بدست خواهد آمد که در این رابطه  $\lambda$  طول موج موج‌رونده می‌باشد.

$$\theta = \frac{x}{r_c}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{n}{r_c} \quad (۷)$$

با ترکیب معادلات (۶) و (۷) رابطه زیر بدست می‌آید.

$$w(r, \theta, t) = W_0 \sin(kx - \omega_n t) \quad (۸)$$



شکل ۲: آنالیز حرکت نقاط سطح استاتور در موج‌رونده [۲۷]

Fig. 2. Analysis of motion of stator surface points in traveling wave [27]

برای نقطه‌ی  $P_0$  بر روی سطح استاتور و جابجایی با موج‌رونده، هنگامی که استاتور تغییر شکل می‌دهد، در سطح مقطع آن یک زاویه‌ی چرخش  $\beta$  وجود خواهد داشت که  $P_0$  را به  $P$  منتقل می‌کند. بر اساس رابطه‌ی هندسی شکل ۲ جابجایی نقطه‌ی  $P$  در راستای  $x$  و  $z$  به صورت زیر می‌باشد.

$$\xi_p = W_0 \sin(kx - \omega_n t) - h(1 - \cos\beta) \quad (۹)$$

$$\zeta_p = -h \sin\beta \quad (۱۰)$$

$h$  نصف ضخامت استاتور است. در مقایسه با طول موج  $\lambda$  جابجایی  $W_0$  و  $\beta$  خیلی کوچک می‌باشد. بنابراین جابجایی نقطه  $P$  در راستای  $x$  و  $z$  را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\xi_p \approx W_0 \sin(kx - \omega_n t) \quad (۱۱)$$

$$\zeta_p = -h\beta \quad (۱۲)$$

برای تغییر شکل خمشی تیر نازک، زاویه‌ی  $\beta$  می‌تواند به صورت زیر بیان شود.

$$\beta \approx \frac{dw}{dx} = W_0 k \cos(kx - \omega_n t) \quad (۱۳)$$

با جاگذاری معادله (۱۳) در معادله (۱۰) رابطه‌ی زیر بدست خواهد آمد.

$$\zeta_p = -W_0 h k \cos(kx - \omega_n t) \quad (۱۴)$$



با استفاده از سه معادله‌ی (۱۴)، (۱۱) و (۱۲) می‌توان رابطه‌ی جابه‌جایی در راستای  $x$  و  $z$  را بر هر نقطه مانند نقطه‌ی  $P$  واقع بر سطح استاتور به صورت زیر نوشت.

$$\left(\frac{\xi_p}{W_0}\right)^2 + \left(\frac{\xi_p}{W_0 h k}\right)^2 = 1 \quad (15)$$

مشاهده می‌شود که معادله مسیر حرکت نقاط روی سطح استاتور، یک منحنی بیضوی می‌باشد. جهت حرکت موج‌رونده در استاتور برخلاف حرکت خروجی روتور می‌باشد که با اعمال اختلاف فاز  $-\pi/2$  می‌توان جهت چرخش را برعکس نمود.

#### ۴- شبیه‌سازی المان محدود

به منظور شبیه‌سازی المان محدود از نرم‌افزار کامسول برای تحلیل‌های مودال و پاسخ‌های هارمونیک استفاده شده و شکل مودها، دامنه‌ی جابجایی و فرکانس مودال بدست آورده شده است. همچنین از حل عددی در بخش‌های آتی به منظور تحلیل حساسیت فرکانسی نیز بهره برده شده است. مشخصات مواد استفاده شده در بدنه استاتور و سرامیک پیزوالکتریک در جدول ۱ ارائه شده است. در حل المان محدود مواد پیزوالکتریک به ثوابت الاستیک، ثوابت پیزوالکتریک و ثوابت گذردهی نیاز می‌باشد که بر اساس روش ارائه شده در مرجع [۲۸] اندازه‌گیری و گزارش شده است. ضریب میرایی در نظر گرفته بر اساس مقالات مشابه در این کلاس برابر  $0/2$  در نظر گرفته شده است.

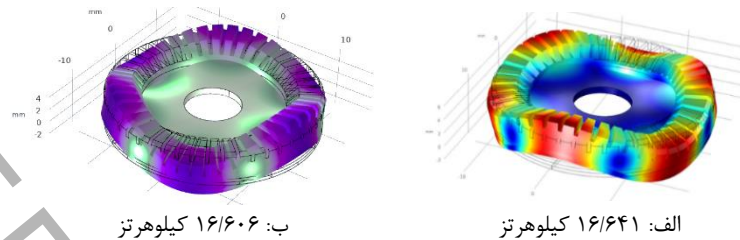
جدول ۱: مشخصات مواد

Table 1. Material specifications

مشخصات	آلومینیوم ۶۰۶۲	سرامیک پیزوالکتریک PZT-5H
چگالی ( $\text{Kg/m}^3$ )	۲۷۰۰	۷۵۰۰
مدول الاستیسیته (Gpa)	۷۰	$\begin{bmatrix} 127/0.5 & 8.0/2 & 84/6 & 0 & 0 & 0 \\ 8.0/2 & 127/0.5 & 84/6 & 0 & 0 & 0 \\ 84/6 & 84/6 & 117/4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 22/9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 22/9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 23/4 \end{bmatrix}$
نسبت پواسون	۰/۳	...
ثوابت پیزوالکتریک ( $\text{C/m}^2$ )	...	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 17/0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17/0.3 & 0 & 0 \\ -6/62 & -6/62 & 23/24 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
گذردهی نسبی	...	$\begin{bmatrix} 17.4/4 & 0 & 0 \\ 0 & 17.4/4 & 0 \\ 0 & 0 & 1433/6 \end{bmatrix}$

مهمترین پارامتر موثری که می‌بایست در شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گیرد مود عملکردی استاتور می‌باشد و سایر پارامترها در تناسب با آن تعیین می‌شوند. در واقع سایر پارامترها را باید به گونه‌ای تعیین نمود که بتوان به مود عملکردی مطلوب دست یافت. منظور از مود عملکردی مطلوب، مودی است که بتواند در یک فاصله فرکانسی ایمن و با کمترین میزان از پیچیدگی طراحی و اجرا، به بیشترین جابجایی در دندانه‌های استاتور و در نهایت به بالاترین گشتاور و سرعت ممکن دست پیدا کند. از جمله پارامترهای موثر بر مود عملکردی می‌توان به تعداد و چیدمان المان‌های پیزوالکتریک و هندسه استاتور اشاره نمود. در ادامه به بررسی این دو پارامتر و اثر آن‌ها بر روی مود عملکردی استاتور پرداخته شده است. مود عملکردی موج‌رونده در عملگر متناسب با مود خمشی  $B_{,n}$  می‌باشد که  $n$  تعداد موج‌رونده است که در اثر تحریک در استاتور ایجاد می‌شود. در این روش می‌بایست در ابتدا یکی از مودهای خمشی استاتور را که شامل شکل مود ناشی از یکی از فرکانس‌های طبیعی سازه استاتور است را انتخاب نمود. علاوه بر این برای تولید موج‌رونده در استاتور می‌بایست چیدمان و تعداد المان‌های پیزوالکتریک را نیز طوری انتخاب نمود که فرکانس تحریک ناشی از این المان‌ها با فرکانس طبیعی انتخابی منطبق گردیده و با ایجاد پدیده تشدید موجب ایجاد بیشترین جابجایی در دندانه‌های استاتور گردد. به جهت صحت

سنجی از روش بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی در محیط کوپله مکانیک-الکترونیک، در ابتدا استاتور عملگر مقاله [۲۹] مدلسازی گردید و با اعمال شرایط مرزی عنوان شده در مقاله مذکور، فرکانس‌های طبیعی مجدا بدست آورده شد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مقادیر فرکانس‌های طبیعی بدست آمده با درصد خطای کمتر از ۰/۲۱ در مودهای مقایسه شده بدست آمده است.



شکل ۳: یک نمونه از صحت‌سنجی روش حل، الف: نتیجه‌ی مقاله [۲۹] ب: نتیجه شبیه‌سازی

**Fig. 3. An example of validation of the solution method (a) The result of the article [29] (b) The result of the simulation**

پس از اطمینان از روش حل با استفاده از آنالیز مودال استاتور، شش مود خمشی اول استاتور بدست آورده شد. مشاهده گردید مقدار فرکانس در مود  $B_5$  از مقدار  $38/793$  کیلوهرتز با شیب زیادی به مقدار  $54$  کیلوهرتز در مود  $B_6$  می‌رسد. از آنجا که شکل مود  $B_5$  دارای یک فرکانس نه چندان زیاد می‌باشد و همچنین در هر لحظه دارای پنج نقطه‌ی تماس با روتور جهت ایجاد نیروی مماسی خواهد بود. بنابراین موضوع می‌تواند یک نیروی مماسی مناسب را در عین حفظ فرکانس عملکردی پایین تامین نماید. بر همین اساس مود خمشی  $B_5$  با فرکانس رزونانس  $38/793$  کیلوهرتز به عنوان مود عملکردی اولیه استاتور انتخاب گردید. سپس بر مبنای مود انتخابی  $B_5$  تعداد و نحوه‌ی چیدمان المان‌های پیزوالکتریک در نظر گرفته شده است تا بتوان با انطباق فرکانس‌ها پدیده‌ی تشدید را ایجاد نمود. در "شکل ۴" چیدمان سرامیک پیزوالکتریک نشان داده شده است. همه‌ی المان‌ها در راستای ضخامت پلاریزه شده و به چهار گروه  $A, B, C, D$  تقسیم‌بندی شده‌اند. از آنجا که هر المان  $\lambda/4$  طول موج را ایجاد می‌نماید و مود خمشی پنجم نیز انتخاب شده است، بنابراین رینگ پیزوالکتریک به  $20$  سگمنت تقسیم شده است.



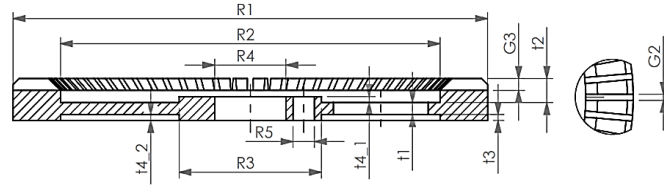
شکل ۴: چیدمان سگمنت‌های پیزوالکتریک و نوع اتصال آن‌ها

**Fig. 4. Arrangement of piezoelectric segments and their connection type**

#### ۴-۱- تحلیل حساسیت فرکانسی استاتور

پس از بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی و همچنین تعیین مود عملکردی، لازم است فرآیند آنالیز حساسیت فرکانسی بر روی استاتور صورت پذیرد. منظور از آنالیز حساسیت فرکانسی تعیین میزان حساسیت فرکانس‌های طبیعی استاتور (مشخصاً فرکانس عملکردی انتخابی) به تغییرات ابعادی هندسه می‌باشد. در فرآیند آنالیز حساسیت استاتور سعی می‌شود بر اساس تفاوت فرکانس‌های مختلف مودال و پارامترهای سازه‌ای، تا حد امکان مودهای عملکردی را از مودهای غیر لازم جدا نمود. در واقع در این فرآیند سعی می‌شود تمامی پارامترهایی که به واسطه‌ی اثرگذاری بر روی ماتریس سفتی استاتور می‌توانند موجب تغییر در فرکانس‌های آن گردند، بررسی شوند. سپس میزان کاهش یا افزایش فرکانس در اثر تغییرات این مقادیر را در قالب نمودارهای تعیین حساسیت بدست آورده می‌شود. با استفاده از نتایج این تحلیل‌ها می‌توان در مواقعی که احتمال تداخل فرکانسی (نزدیک بودن مودهای قبل و بعد به

مودکاری) وجود دارد به صورت آگاهانه تغییرات هندسی لازم را اعمال نمود و به نتایج مورد انتظار دست یافت. تداخل فرکانسی می تواند با اثرگذاری بر روی فرکانس مود عملکردی موجب ناپایداری عملکردی عملگر گردیده و موجب عدم دستیابی به مشخصه های خروجی مطلوب گردد. در همین راستا بر اساس پارامترهای شکل ۵ و بازه ی تغییرات آنها که در جدول ۲ ارایه شده است، آنالیز حساسیت بر روی سازه استاتور صورت گرفته است.



شکل ۵: نام گذاری پارامتریک هندسه استاتور

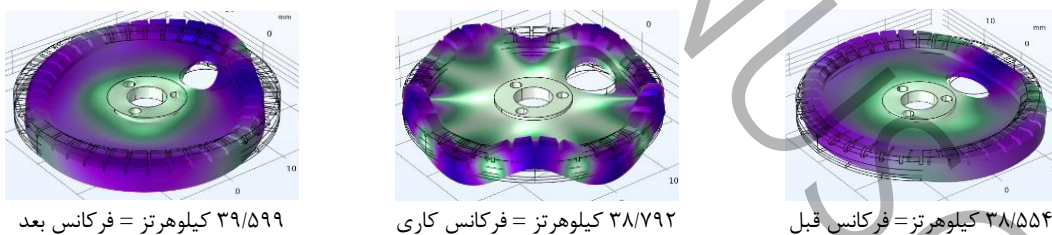
Fig. 5. The name of the geometric parameters

جدول ۲: نام گذاری پارامترهای هندسی و محدوده ی تغییرات

Table 1. The name of the geometric parameters and the range of changes

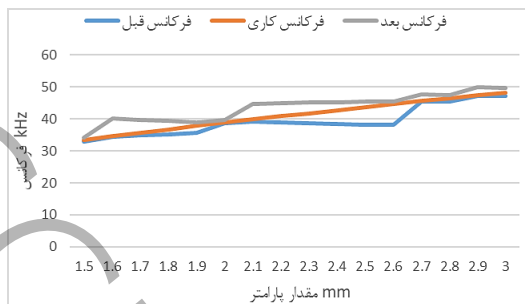
نام پارامتر	اندازه اولیه (میلیمتر)	محدوده تغییرات (میلیمتر)	نام پارامتر	اندازه اولیه (میلیمتر)	محدوده تغییرات (میلیمتر)
R1	۲۰	بدون تغییر	t4_2	۰/۵	$0.1 \leq t4_2 \leq 1$
t1	۱	$0.17 \leq t1 \leq 0.19$	R4	۳	$2 \leq R4 \leq 4.5$
t2	۲	$1.5 \leq t2 \leq 3$	R5	۱/۷	بدون تغییر
t3	۰/۵	$0.13 \leq t3 \leq 0.17$	G2	۰/۵	$0.1 \leq G2 \leq 1.5$
R2	۱۶/۵	$15.5 \leq R2 \leq 17.5$	G3	۱	$0.5 \leq G3 \leq 1.9$
R3	۶	$5.5 \leq R3 \leq 7$	تعداد دندانه ها	۴۰	۳۰، ۳۶، ۴۰، ۴۶، ۵۰، ۵۶

محدوده های مقادیر جدول ۲ بر اساس عواملی همچون محدودیت های هندسی، الزامات عملیاتی و همچنین محدودیت های ساخت در نظر گرفته شده است. برای هر کدام از مقادیر جدول بالا با استفاده از یک جاروب فرکانسی به بررسی حساسیت فرکانسی پرداخته شده است و اثر این تغییرات بر روی کاهش یا افزایش فرکانس های مورد نظر مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی تداخلات فرکانسی به بررسی شکل مودهای قبل و بعد این فرکانس پرداخته شده است. در آنالیز مودالی که بر اساس ابعاد اولیه استاتور انجام شده است فرکانس های طبیعی قبل و بعد مود  $B_{56}$  به صورت شکل ۶ بدست آمده است.

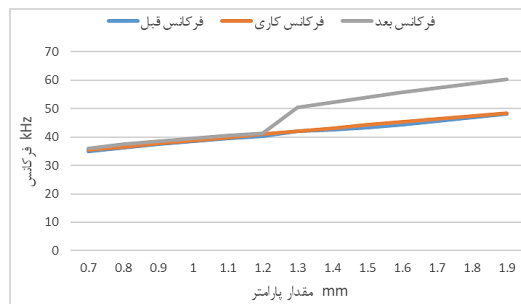


شکل ۶: آنالیز مودال اولیه استاتور پیش از تحلیل حساسیت فرکانسی  
Fig. 6. Primary modal analysis of stator before frequency sensitivity analysis

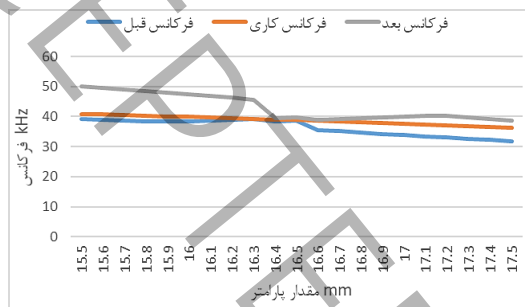
همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود فرکانس های طبیعی قبل و بعد مود به فرکانس عملکردی استاتور نزدیک می باشند و دارای حداقل فاصله حدود ۲ کیلوهرتز بیان شده در مرجع [۲۷] نمی باشند. بنابراین لازم است با استفاده از آنالیز حساسیت فرکانسی این تداخل فرکانسی اصلاح گردد. در ادامه ابتدا آنالیز حساسیت صورت گرفته برای تمامی پارامترهای هندسی بیان می گردد سپس با اعمال بررسی های بر روی سازه استاتور، ابعاد آن تعیین می گردد. در ادامه تمامی نمودارها در شکل ۷ ارایه شده است.



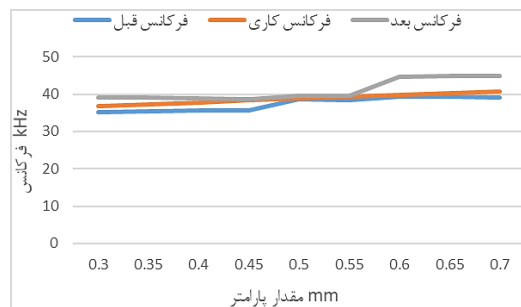
نمودارهای تحلیل حساسیت پارامتر  $t_2$



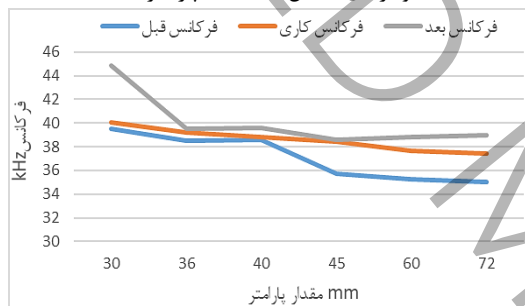
نمودارهای تحلیل حساسیت پارامتر  $t_1$



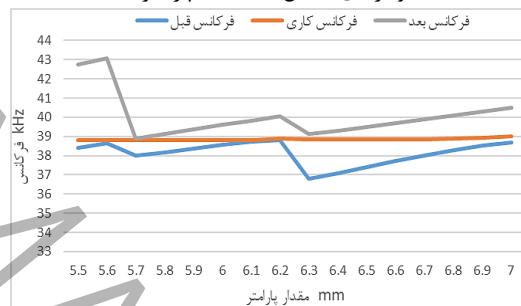
نمودارهای تحلیل حساسیت پارامتر  $R_2$



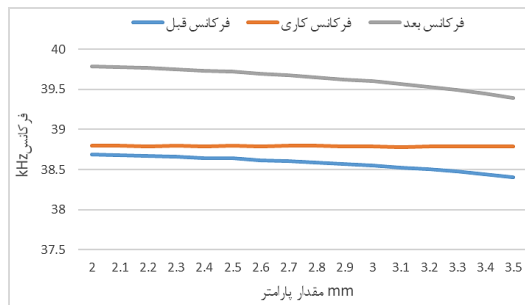
نمودارهای تحلیل حساسیت پارامتر  $t_3$



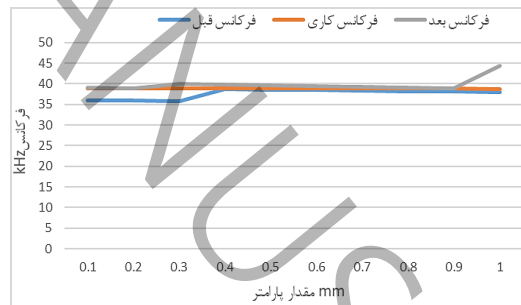
نمودارهای تحلیل حساسیت پارامتر  $Number\ of\ Teeth$



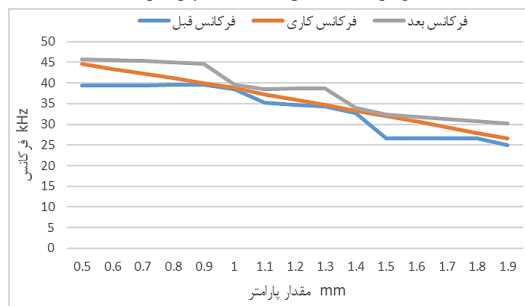
نمودارهای تحلیل حساسیت پارامتر  $R_3$



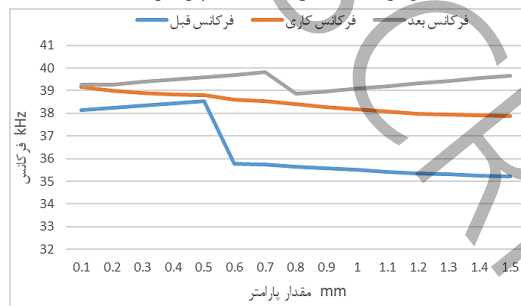
نمودارهای تحلیل حساسیت پارامتر  $R_4$



نمودارهای تحلیل حساسیت پارامتر  $t_{4-2}$



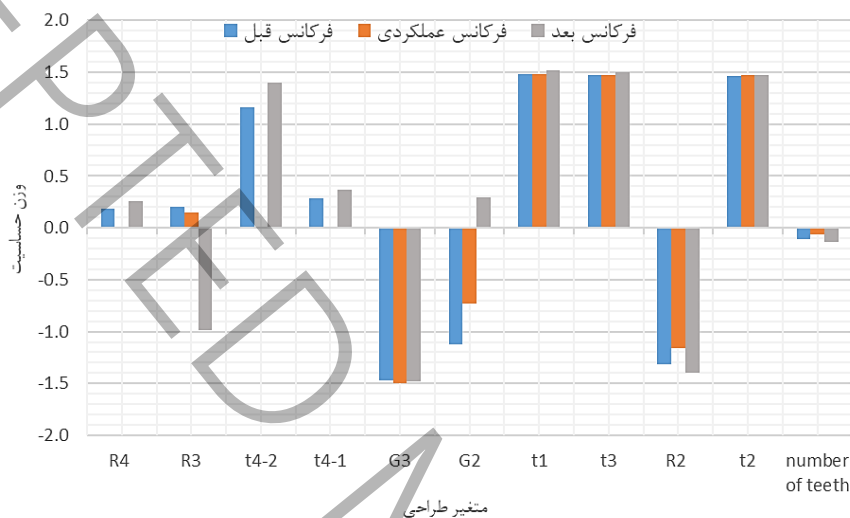
نمودارهای تحلیل حساسیت پارامتر  $G_3$



نمودارهای تحلیل حساسیت پارامتر  $G_2$

شکل ۷: نمودارهای تحلیل حساسیت فرکانسی  
Fig. 7. Frequency sensitivity analysis graphs

چنانچه مجموع نتایج شکل ۷ به جهت مقایسه بهتر در یک نمودار نمایش داده شود، نمودار جامع شکل ۸ بدست خواهد آمد. در این نمودار می‌توان پارامترهای اثرگذارتر را به سادگی تشخیص داد و وضعیت مود قبل و بعد از مود عملکردی را مشاهده نمود. به عبارت بهتر در مواردی که نیاز است فرکانس قبل یا بعد از فرکانس عملکردی دور شود، بر اساس این نمودار می‌توان نوع تغییر آن که آیا افزایش یا کاهش خواهد بود را به سهولت تشخیص داد و بر اساس آن انتخاب نمود. همچنین می‌توان وزن هر پارامتر در حساسیت فرکانسی را نیز از شکل ۸ بدست آورد. یعنی می‌توان مشخص نمود کدام پارامتر با تغییرات کمتر ولی نرخ بیشتری موجب ایجاد فاصله فرکانسی خواهد گردید تا بر این اساس در اولویت تغییرات قرارگیرد. بنابراین اکنون می‌توان با آگاهی به میزان حساسیت هر پارامتر اقدام به اصلاح و نهایی نمودن هندسه استاتور نمود.



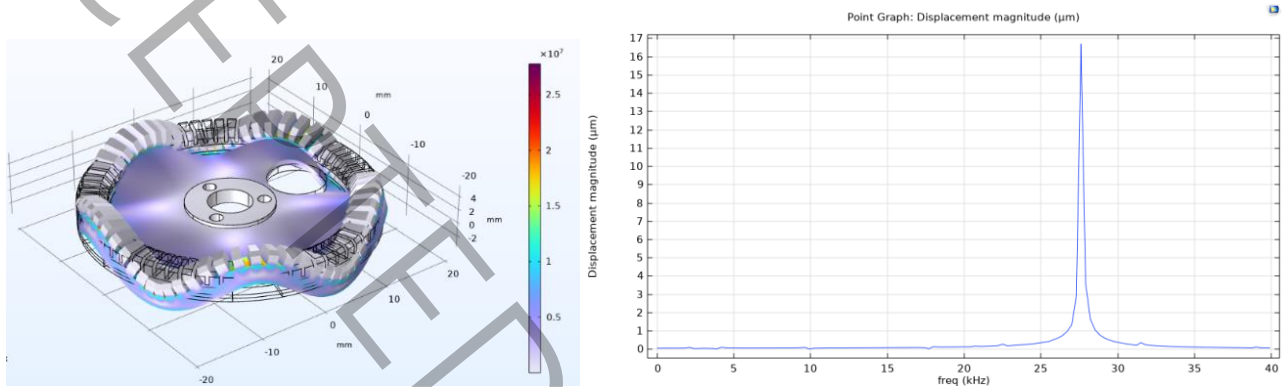
شکل ۸: نمودار جامع آنالیز حساسیت فرکانسی

Fig. 8. Comprehensive diagram of frequency sensitivity analysis

برای مشخص نمودن اولویت انتخاب پارامتر مطلوب برای اعمال تغییرات هندسی، به این صورت عمل شده است که در ابتدا میزان حساسیت پارامتر به کاهش فرکانس در نظر گرفته شده است. در واقع هر چه بتوان استاتور را در فرکانس‌های پایین‌تری تحریک نمود، موجب خواهد شد عملگر مصرف انرژی پایین‌تری داشته باشد. در مرحله دوم نیز میزان حساسیت پارامتر به جداسازی فرکانسی مدنظر قرار گرفته است. بنابراین بر اساس نمودارهای شکل ۷ در فاز اول با توجه به آنکه افزایش تعداد دندانه‌های استاتور موجب کاهش فرکانس رزونانس گردیده است، ابتدا تعداد دندانه‌ها به ۷۲ افزایش یافت. سپس در فاز دوم به دلیل آنکه افزایش عمق دندانه‌ها یعنی پارامتر  $G3$  علاوه بر آنکه موجب می‌شود فرکانس رزونانس به شدت کاهش یابد (از حدود ۳۸ به ۲۶ کیلوهرتز) منجر به اختلاف فرکانسی مناسب (حدود ۲ کیلوهرتز) بین فرکانس‌های قبل و بعد فرکانس مورد نظر خواهد شد. به همین دلیل به عنوان اولویت دوم انتخاب گردید. با اعمال عمق ۱/۹ میلیمتری برای عمق دندانه‌ها، فرکانس عملکردی از ۳۷/۴ کیلوهرتز به ۲۶/۷۴ کیلوهرتز کاهش یافت. در فاز سوم با اعمال تغییرات مرحله دوم بر روی هندسه استاتور و بدست آوردن فرکانس‌های رزونانس جدید مشاهده گردید اگرچه فرکانس کلی استاتور کاهش یافته است اما فرکانس مدهای قبل و بعد مود عملکردی به یکدیگر نزدیک شده است و این یعنی فاصله‌ی ایمن فرکانسی بین مود عملکردی و مدهای قبل و بعد وجود ندارد. بنابراین در فاز چهارم از پارامتر  $R2$  استفاده گردید. مقدار مناسب این پارامتر بر اساس نمودار شکل ۷ برابر ۱۷/۲ میلیمتر می‌باشد. اما با توجه به تغییرات هندسی که در مراحل قبل صورت گرفته است بهتر است مجدداً یک جروب فرکانسی در بازه قبلی یعنی ۱۵/۵ تا ۱۷/۵ میلیمتر صورت گیرد. در نهایت پس از انجام تمامی مراحل مقادیر ۲۷/۶۲ کیلوهرتز، ۲۵/۷۸ کیلوهرتز و ۳۰/۷۱ کیلوهرتز به ترتیب برای مود عملکردی و مدهای قبل و بعد بدست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از نمودارهای آنالیز حساسیت منجر گردیده است علاوه بر کاهش فرکانس عملکردی، فاصله ایمن فرکانسی به جهت جلوگیری از تداخل فرکانسی بین فرکانس‌های مدنظر ایجاد گردد.

## ۲-۴- تحلیل هارمونیک

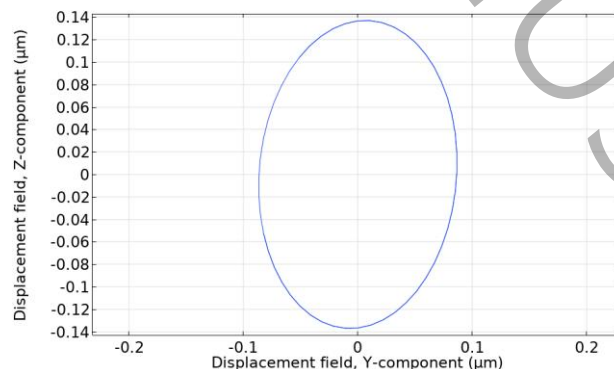
در این تحلیل سیگنال‌های سینوسی و کسینوسی مورد نظر به جهت تحریک استاتور به المان‌های پیزوالکتریک اعمال می‌گردد. فرکانس ولتاژ برابر فرکانس رزونانس مود  $B_5$  یعنی  $27/62$  کیلوهرتز با دامنه‌ی  $85$  ولت پیک تا پیک در نظر گرفته شده است. در واقع به هر گروه از المان‌ها سیگنال‌های  $+Sin$ ،  $+Cos$ ،  $-Sin$  و  $-Cos$  اعمال شده است. به جهت بررسی فرکانسی کامل و اطمینان از شکل مودها از یک بازه‌ی فرکانسی صفر الی  $40$  کیلوهرتز برای فرکانس ولتاژ استفاده می‌شود. نتایج آنالیز مودال برای یک نقطه واقع بر روی دندانه‌های استاتور به همراه تغییر شکل و تنش‌های ایجاد شده در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: نمودار جاروب فرکانسی استاتور به همراه نمودار تنش و تغییر شکل ایجاد شده

**Fig. 9. Stator frequency sweep diagram and created stress and deformation**

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است نحوی اعمال ولتاژ موجب شده است در بازه فرکانسی صفر الی  $40$  کیلوهرتز، فقط فرکانس طبیعی  $27/62$  کیلوهرتز تحریک شود و شکل مود آن نیز دقیقاً شکل مود خمشی  $B_5$  مورد نظر می‌باشد. همچنین مقدار جابجایی در شکل مود  $B_5$  که در آنالیز مودال بدون اعمال ولتاژ برابر  $1/3546 \times 10^{-8}$  میکرومتر بدست آمده بود، به مقدار حدودی  $16/5$  میکرومتر افزایش یافته است. حال از تحلیل وابسته به زمان برای بدست آوردن موج‌رونده در استاتور استفاده می‌شود. در این تحلیل نیز ورودی به مانند ورودی‌های ذکر شده خواهد بود. با این تفاوت که حل در بازه‌ی زمانی مشخصی صورت می‌گیرد. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد و در شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌شود، مسیر حرکت نقاط روی استاتور یک مسیر بیضوی را تشکیل داده‌اند که در نهایت موجب چرخش روتور خواهد گردید.

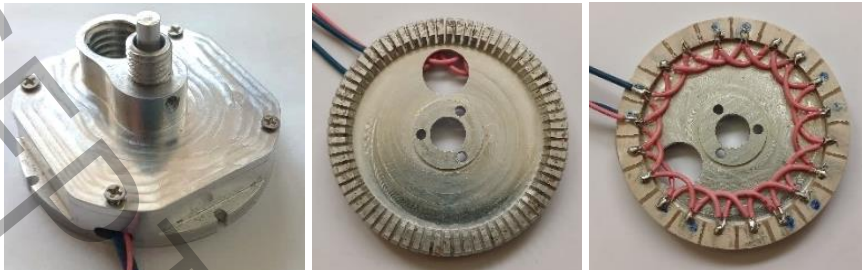


شکل ۱۰: مسیر بیضوی یک نقطه واقع بر استاتور

**Fig. 10. Elliptical path of a point located on the stator**

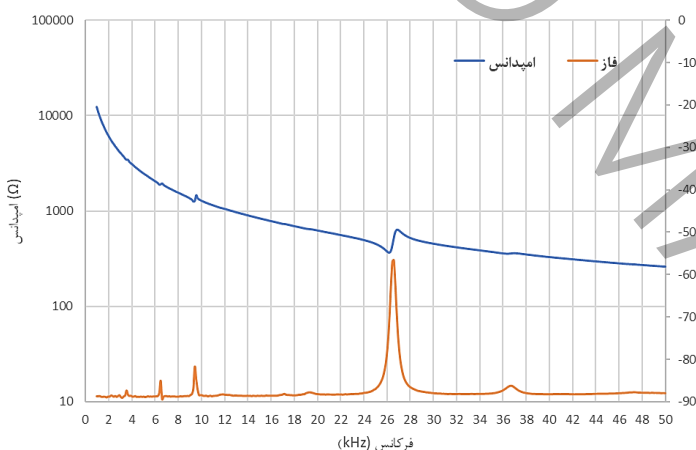
## ۵- مطالعات تجربی

پس از اتمام مراحل شبیه‌سازی، استاتور با استفاده از فرآیند ماشینکاری دقیق و بر اساس مدل بهینه شده در مراحل قبل ساخته شده و المان‌های پیزوالکتریک بر روی استاتور مونتاژ شده است. سپس سیم‌بندی‌های المان‌های پیزوالکتریک نیز انجام شده است. استاتور و عملگر ساخته شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



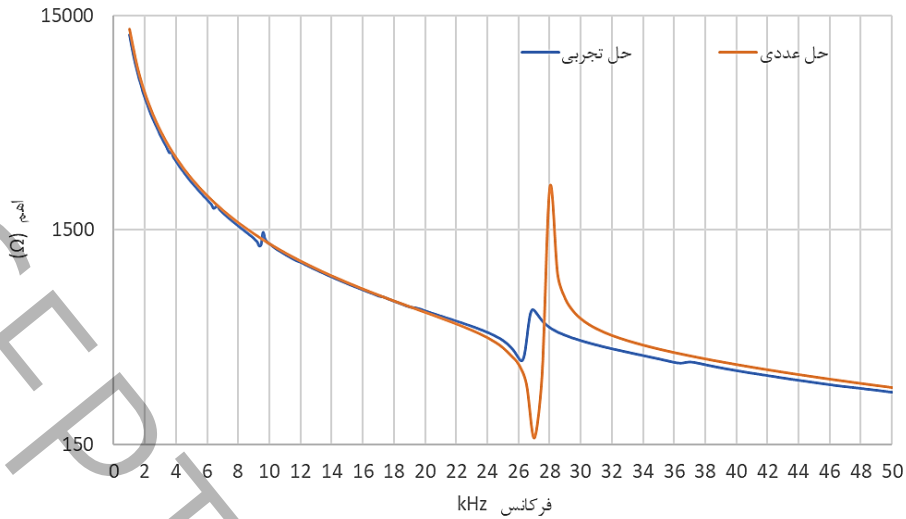
شکل ۱۱: عملگر و استاتور ساخته شده به همراه سیم‌بندی انجام شده  
**Fig. 11. The actuator and stator are made along with the wiring**

به منظور صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از حل عددی، فرکانس رزونانس استاتور توسط دستگاه امپدانس آنالایزر (hp۴۱۹۴A) اندازه‌گیری شده است که نتایج آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است. فرکانس رزونانس برابر ۲۶/۲۳۵ کیلوهرتز بدست آمده است.



شکل ۱۲: نمودار اندازه‌گیری فرکانس رزونانس استاتور با استفاده از دستگاه امپدانس آنالایزر  
**Fig. 12. Diagram of stator resonance frequency measurement using impedance analyzer**

با توجه به فرکانس ۲۷/۶۲ کیلوهرتز بدست آمده از شبیه‌سازی عددی و فرکانس ۲۶/۲۳۵ کیلوهرتز بدست آمده از تست تجربی، اختلاف نتایج بدست آمده نشانگر خطای در حدود ۵/۲٪ می‌باشد که با توجه به اختلاف اندک آن‌ها قابل قبول خواهد بود. مقدار خطای ایجاد شده می‌تواند ناشی از صرف‌نظر کردن از ضخامت لایه چسب، سیم‌بندی‌های استاتور و خطاهای ساخت و مونتاژ ایجاد شده باشد. به جهت مقایسه نمودار نتایج عددی و تجربی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: مقایسه نتایج عددی و تجربی  
**Fig. 13. Comparison of numerical and experimental results**

#### ۵-۱- اندازه‌گیری مشخصه‌های خروجی

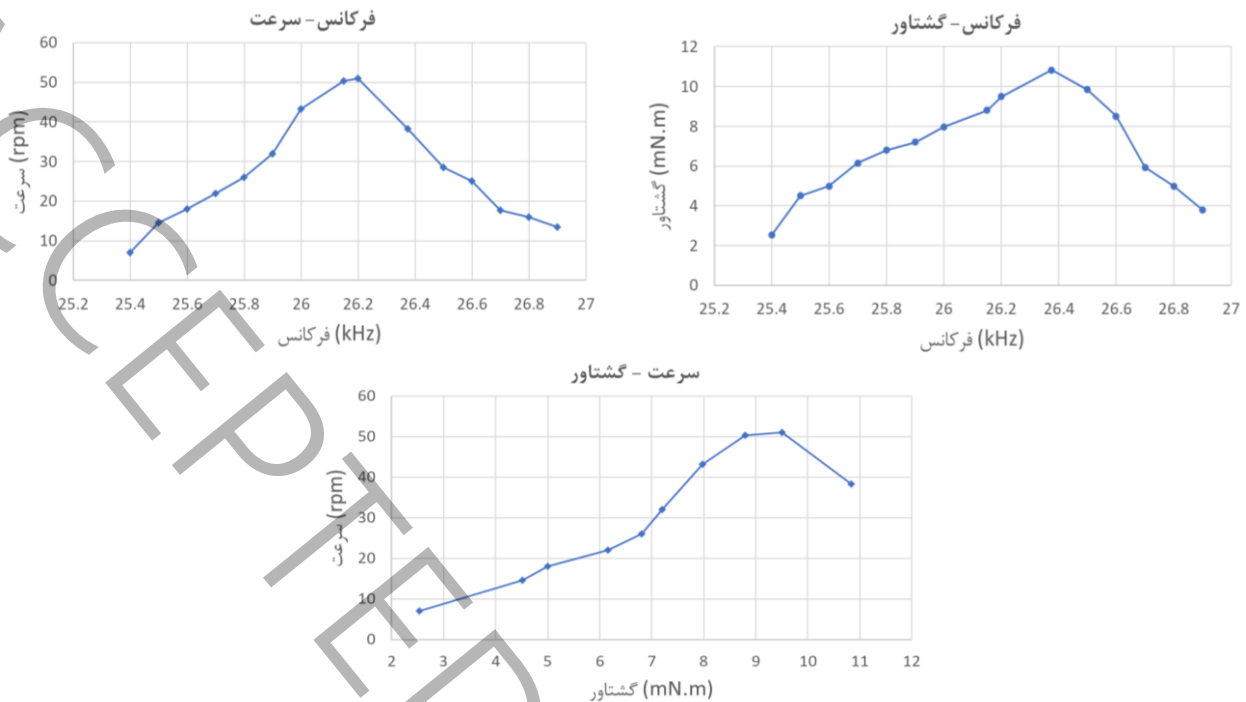
اندازه‌گیری مشخصه‌های خروجی عملگر ساخته شده توسط تجهیزات نشان داده شده در شکل ۱۳ انجام شده است. همچنین بلوک دیاگرام اتصالات تجهیزات راه‌اندازی عملگر نیز ترسیم شده است. برای اندازه‌گیری سرعت دورانی از دستگاه دورسنج (۲۲۶۸-Lutron DT) و برای اندازه‌گیری گشتاور و اماندگی نیز از تجهیزات وزنه و قرقره که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، بهره برده شده است.



شکل ۱۴: تجهیزات اندازه‌گیری مشخصه‌های خروجی به همراه بلوک دیاگرام تجهیزات راه‌اندازی  
**Fig. 14. Measurement equipment output characteristics and equipment block diagram**

برای شروع اندازه‌گیری، عملگر به خروجی آمپلی‌فایر متصل گردیده و سیگنال‌های مربوطه به آن اعمال می‌گردد. سپس با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری خروجی‌های مکانیکی در قالب سه نمودار فرکانس-گشتاور، فرکانس-سرعت و سرعت-گشتاور در ولتاژ ثابت ۸۵ ولت پیک تا پیک اندازه‌گیری و ترسیم شده و در شکل ۱۵ نشان داده شده است.





شکل ۱۵: نمودارهای (فرکانس-گشتاور)، (فرکانس-سرعت) و (سرعت-گشتاور)

Fig. 15. Graphs (frequency-torque), (frequency-speed) and (speed-torque)

همان طور که مشاهده می شود در هر دو نمودار فرکانس-گشتاور و فرکانس-سرعت، مقدار بیشینه گشتاور برابر ۱۱ میلی نیوتن متر و بیشینه سرعت دورانی برابر ۵۰/۱ دوربردقیقه بدست آمده است که هر دو نمودار در محدوده ی فرکانس رزونانس موردنظر یعنی ۲۶/۲۳۵ کیلوهرتز حاصل شده است. همچنین نتایج بدست آمده حاکی از آن است که عملگر ساخته شده توانایی حرکت با سرعت دورانی مناسب و تحمل گشتاور مقاوم در برابر حرکت را دارا می باشد و می تواند خواسته موردنظر یعنی باز و بسته نمودن دریچه انتقال گاز را در مدت زمان بسیار کوتاهی انجام دهد. با اندازه گیری مشخصات هندسی نمونه ساخته شده در راستای کوچک و سبک سازی نیز مشاهده گردید وزن مجموع عملگر به همراه تمامی تجهیزات برابر ۳۵ گرم و ابعاد حجمی آن برابر ۹۸۱۲۵ میلی متر مکعب می باشد که در مقایسه با نمونه موجود کاهش ۲۸٪ در ابعاد قطری، کاهش ۵۷٪ در حجم کلی و کاهش ۵۰٪ در وزن ایجاد شده است.

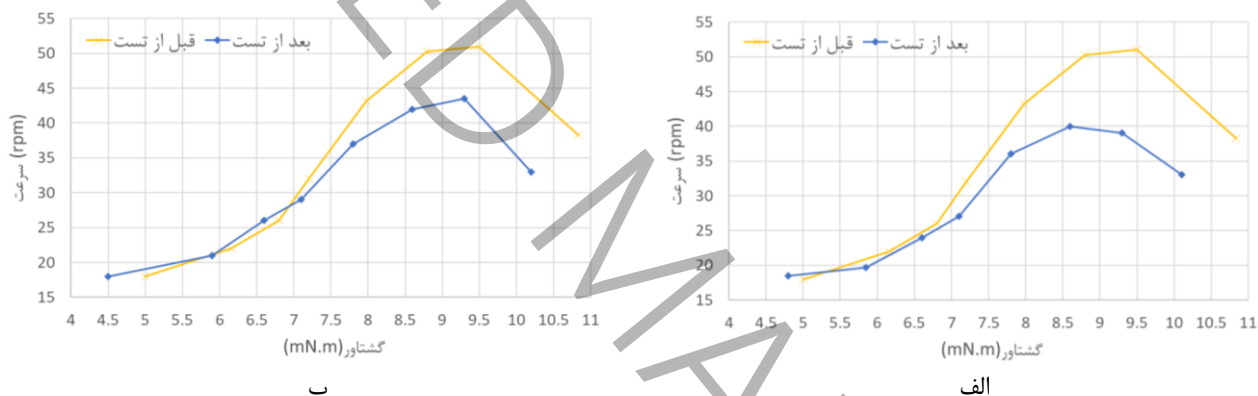
#### ۲-۵- تست عملکردی

همان طور که در بخش ۲ بیان شد تجهیز انتقال گاز احتراق می بایست از انتقال ناخواسته و تصادفی گاز در وضعیتی که دریچه ها در یک راستا قرار ندارند (وضعیت ایمن)، ممانعت به عمل آورد و هیچ گونه عامل خارجی مانند فشار گاز نتواند تغییری در وضعیت دریچه ها ایجاد نماید. به همین منظور یک تست تجربی برای بررسی صحت عملکردی تجهیز تعریف گردید و با اتصال منبع تولید گاز به تجهیز مورد نظر، به بررسی عملکرد آن پرداخته شد. با انجام تست، شعله ی احتراق در سمت مقابل تجهیز مشاهده نگردید و فشار ایجاد شده در اثر احتراق نیز به دلیل وجود مکانیزم پیش بار در عملگر پیزوالکتریک، تغییری در وضعیت دریچه ها ایجاد نمود. بنابراین می توان گفت عملگر و تجهیز توانسته اند وظیفه ی خود را به درستی انجام دهند.

#### ۳-۵- تست های محیطی

به منظور بررسی اطمینان عملکردی و ایمنی عملگر ساخته شده تست ارتعاشات حمل و نقل، تست دما بالا و دما پایین بر اساس شرایط کاری مورد نظر تعریف شده است. تست های تعریف شده بر اساس استانداردهای تست دما بالا (استاندارد ۰۸۱۰-استاندارد دفاعی ایران- بخش ۵۰۱) استاندارد تست دما پایین (استاندارد ۰۸۱۰-استاندارد دفاعی ایران- بخش ۵۰۲)، استاندارد تست ارتعاشات حمل و نقل (استاندارد ۰۸۱۰-استاندارد دفاعی ایران- بخش ۵۱۴) و استاندارد تست شوک مکانیکی (استاندارد ۰۸۱۰-استاندارد دفاعی ایران- بخش ۵۱۴) می باشد.

ایران بخش ۵۱۶) انجام شده و تمامی مراحل بر اساس نمودارهای موجود در استانداردها عمل شده است. در تست ارتعاشات بررسی گردید که آیا ارتعاشات محیطی منجر به تغییر وضعیت روتور و به دنبال آن باز شدن دریچه به صورت ناخواسته خواهد شد یا خیر. در همین راستا با علامت گذاری وضعیت روتور قبل و بعد از تست به بررسی این موضوع پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشان داد که با توجه وجود مکانیزم پیش‌بار در عملگر پیزوالکتریک این اطمینان وجود خواهد داشت که تغییر وضعیتی در دریچه‌ها به وجود نخواهد آمد و این موضوع منجر به افزایش ضریب ایمنی خواهد گردید. در تست دما بالا و دما پایین ابتدا مجموعه عملگر در چمبر تست قرار داده شد و بر اساس استاندارد، سیکل‌های دمایی بر روی آن اعمال گردید. در ادامه بلافاصله پس از خارج کردن عملگر از چمبر مجدداً مشخصه‌های مکانیکی سرعت و گشتاور اندازه‌گیری گردید. نتایج بدست آمده در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات عملکردی در تست دما بالا (کاهش ۳۱٪) کمتر از تست دما پایین (کاهش ۱۵٪) می‌باشد. اما به طور کلی می‌توان گفت تغییرات دمایی تاثیر کمی در عملکرد عملگر داشته است. علت کاهش مقادیر نیز ناشی از تغییرات هندسی استاتور و به دنبال آن کاهش مقادیر جابجایی در دندان‌های استاتور می‌باشد؛ که این موضوع منجر به کاهش مشخصه‌های خروجی خواهد گردید. همچنین افزایش مقاومت اهمی ایجاد شده در اثر تغییرات دمایی نیز می‌تواند موجب افزایش اتلاف در تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی گردیده و در نهایت منجر به کاهش راندمان و مشخصه‌های خروجی عملگر شود. این موضوع در نتایج سایر پژوهش‌ها نیز مشاهده شده است. اما با این وجود می‌توان گفت عملگر همچنان در این شرایط نیز خواهد توانست وظیفه تغییر وضعیت دریچه را ایجاد نماید.



شکل ۱۶: مقایسه نمودار سرعت-گشتاور قبل و بعد از تست. الف: دما بالا - ب: دما پایین

Fig. 16. Comparison of speed-torque diagram before and after the test. (a) High temperature - (b) Low temperature

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از ویژگی‌های منحصر به فرد عملگرهای پیزوالکتریک از جمله ساختار شناور، قابلیت کوچک‌سازی، خودقفلی، قابلیت کار در شرایط محیطی سخت، غیرمغناطیسی بودن و ایمنی بالا پیشنهاد استفاده از آن به عنوان عملگر تغییر وضعیت دریچه انتقال گاز احتراق مطرح گردید. سپس با طراحی، تحلیل، ساخت نمونه و تست آن به بررسی عملکرد آن پرداخته شد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی و تست‌های تجربی تطابق بسیار خوبی با یکدیگر داشتند. فرکانس رزونانس از حل عددی و تست تجربی به ترتیب برابر ۲۷/۶۲ کیلوهرتز و ۲۶/۲۳۵ کیلوهرتز بدست آمد و دارای خطایی در حدود ۵/۲٪ بود. اندازه‌گیری‌های مشخصه های مکانیکی سرعت و گشتاور نشان داد که این عملگر علاوه بر ویژگی‌های منحصر به فرد خود، تمامی قابلیت یک عملگر یا موتور دورانی را دارد و می‌تواند در سایر کاربردهای مشابه مورد استفاده قرار گیرد. با طراحی جدید صورت‌گرفته وزن مجموع تجهیز انتقال گاز احتراق برابر ۳۵ گرم و ابعاد حجمی آن برابر ۹۸۱۲۵ میلی‌متر مکعب می‌باشد که با مقایسه وزنی و ابعادی صورت‌گرفته ما بین نمونه موجود و نمونه ساخته شده، به ترتیب کاهش ۲۸٪ در ابعاد قطری، کاهش ۵۷٪ در حجم کلی و کاهش ۵۰٪ در وزن عملگر مشاهده گردید؛ و این موضوع نشانگر تامین هدف پژوهش یعنی کوچک‌سازی و سبک‌سازی تجهیز می‌باشد. همچنین با انجام تست‌های عملکردی و محیطی نیز کارایی و قابلیت کارکرد در شرایط محیطی سخت بررسی گردید و ایمنی بالای آن نیز به اثبات رسید.

فهرست علائم

علائم	توضیحات	علائم	توضیحات
موج‌های سینوسی	$y_2$ و $y_1$	مود خمشی پنجم	$B_{05}$
راستای عمودی محور مختصات	$z$	مود خمشی $n$ ام	$B_{0n}$
زاویه چرخش نقطه رو	$\beta$	فرکانس	$f$
طول موج	$\lambda$	نصف ضخامت استاتور	$h$
جابجایی در راستای $z$	$\xi_p$	تعداد موج در واحد فاصله: $k = 2\pi / \lambda$	$k$
عدد پی	$\pi$	نقطه واقع روی سطح استاتور	$P_0$
جابجایی در راستای $x$	$\zeta_p$	قطر استاتور	$r_c$
فاز	$\phi$	زمان موج	$t$
فرکانس زاویه ای: $\lambda = 2\pi f$	$\omega$	دامنه‌ی موج	$V$
فرکانس طبیعی	$\omega_n$	جابجایی ناشی از شکل مود	$W_0$
		راستای افقی محور مختصات	$x$

#### ۷- منابع و مراجع

- [1] J.-H. Oh, H.-E. Jung, J.-s. Lee, K.-J. Lim, H.-H. Kim, B.-H. Ryu, D.-H. Park, Design and performances of high torque ultrasonic motor for application of automobile, *Journal of Electroceramics*, 22 (2009) 150-155.
- [2] B. Kang, J.-H. Lee, C.-H. Won, Micro-navigation satellite network design and analysis, in: *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, 2008, pp. 867-876.
- [3] G.H. Haertling, Ferroelectric ceramics: history and technology, *Journal of the American Ceramic Society*, 82(4) (1999) 797-818.
- [4] K. Uchino, *Ferroelectric Devices* Marcel Dekker, Inc, New York, (2000).
- [5] S. Ueha, *Ultrasonic motors, Theory and Applications*, (1993) 1-293.
- [6] T. Sashida, Motor device utilizing ultrasonic oscillation, in: *Google Patents*, 1985.
- [7] J. Wallaschek, Piezoelectric ultrasonic motors, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 6(1) (1995) 71-83.
- [8] V. Jūrėnas, G. Kazokaitis, D. Mažeika, 3DOF ultrasonic motor with two piezoelectric rings, *Sensors*, 20(3) (2020) 834.
- [9] P. Janker, F. Claeysen, B. Grohmann, M. Christmann, T. Lorkowski, R. LeLetty, O. Sosniki, A. Pages, New actuators for aircraft and space applications, in: *Proceedings of the 11th International Conference on New Actuators*, Bremen, Germany, 2008, pp. 9-11.
- [10] Iino, A., Suzuki, K., Kasuga, M., Suzuki, M., & Yamanaka, T, Development of a self-oscillating ultrasonic micro-motor and its application to a watch, *Ultrasonics*, 38(1-8) (2000) 54-59.
- [11] X. Lu, J. Hu, L. Yang, C. Zhao, A novel in-plane mode rotary ultrasonic motor, *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(2) (2014) 420-424.
- [12] T. Mashimo, Micro ultrasonic motor using a cube with a side length of 0.5 mm, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(2) (2015) 1189-1192.
- [13] X. Lu, Z. Wang, H. Shen, K. Zhao, T. Pan, D. Kong, J. Twiefel, A novel dual-rotor ultrasonic motor for underwater propulsion, *Applied Sciences*, 10(1) (2019) 31.
- [14] J. Qiu, Y. Yang, X. Hong, P. Vasiljev, D. Mazeika, S. Borodinas, A disc-type high speed rotary ultrasonic motor with internal contact teeth, *Applied Sciences*, 11(5) (2021) 2386.
- [15] J. Li, Z. Sun, H. Yan, J. Chen, Design of a Magnetically Anchored Laparoscope Using Miniature Ultrasonic Motors, *Micromachines*, 13(6) (2022) 855.

- [16] Z. Dong, M. Yang, Z. Chen, L. Xu, F. Meng, W. Ou, Design and performance analysis of a rotary traveling wave ultrasonic motor with double vibrators, *Ultrasonics*, 71 (2016) 134-141.
- [17] R. Ryndzionek, Ł. Sienkiewicz, M. Michna, F. Kutt, Design and experiments of a piezoelectric motor using three rotating mode actuators, *Sensors*, 19(23) (2019) 5184.
- [18] Z. Wen, X. Li, T. Cao, B. Wang, R. Liu, D. Wu, A low-voltage cylindrical traveling wave ultrasonic motor incorporating multilayered piezoelectric ceramics, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 69(6) (2022) 2129-2136.
- [19] Y. Tang, J. Wang, A Two-Foot Linear Ultrasonic Motor for Fuze Safety System, in: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 2013, pp. V014T015A003.
- [20] Y. Tang, Z. Yang, X. Wang, J. Wang, Research on the Piezoelectric Ultrasonic Actuator Applied to SFSS, in: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 2015, pp. V04BT04A048.
- [21] Y. Tang, Z. Yang, X. Wang, J. Wang, Research on the piezoelectric ultrasonic actuator applied to smart fuze safety system, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 53(2) (2017) 303-313.
- [22] D. Sun, Y.-j. Tang, J. Wang, X.-j. Wang, Design of an H-shaped linear piezoelectric motor for safety and arming device, *Sensors and Actuators A: Physical*, 303 (2020) 111687.
- [23] X. Fan, T. Hu, Y. Wang, Y. Zhao, Z. Tian, W. Xue, Research on Multiphysics-Driven MEMS Safety and Arming Devices, *Micromachines*, 15(10) (2024) 1194.
- [24] S. Lei, Y. Cao, W. Ma, H. Zhu, H. Lu, J. Yao, W. Nie, Z. Xi, Robust Multi-Objective Optimization of Setback Feature In MEMS Safety and Arming Device Considering Parameters Uncertainty, *IEEE Sensors Journal*, 24(8) (2024) 12197–12206.
- [25] S. Lv, H. Feng, W. Lou, C. Xiao, W. Kan, W. Su, J. Wang, T. Ji, Design and process of force-electric fusion for electromagnetic driven Si based MEMS S&A, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2740(1), 2024, pp. 012023.
- [26] H. Huang, J. Li, *Piezoelectric Actuators: Principles, Design, Experiments and Applications*, BoD–Books on Demand, 2021.
- [27] C. Zhao, *Ultrasonic motors: technologies and applications*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [28] J. Fialka, P. Beneš, Measurement of piezoelectric ceramic parameters-A characterization of the elastic, dielectric and piezoelectric properties of NCE51 PZT, in: *Proceedings of the 13th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, IEEE, 2012, pp. 147-152.
- [29] P. Carvalho, C. Nycz, K. Gandomi, G. Fischer, (2018), Multiphysics Simulation of an Ultrasonic Piezoelectric Motor, *COMSOL Conference in Boston*, <https://www.COMSOL.com>.

# Miniaturization of combustion gas transmission equipment using traveling wave rotary piezoelectric actuator with the approach of improving safety and functional characteristics

Ebrahim Abolghasemi<sup>a</sup>, Ahmad Reza Khoogar<sup>a1</sup>, Mehrdad Khandani<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Malek Ashtar University/ Department of Mechanic

## ABSTRACT

The space and weight limitation in air systems has always created the need to improve characteristics such as dimensions, weight, accuracy, and safety in the equipment used in these systems. This research uses the advantages of piezoelectric actuators, such as miniaturization, self-locking, working in harsh conditions, high safety, etc., to propose their use as actuators in combustion gas transmission equipment. A traveling-wave rotary piezoelectric actuator was selected, and a gas valve was installed in it. In the numerical section, the actuator was analyzed by the finite element, and frequency sensitivity analysis was performed. Then a prototype made in the optimal state. In the experimental section, the prototype parameters were evaluated and validated with the numerical results. In the results section, the efficiency of the piezoelectric actuator as a separate actuator was proven by measuring the output speed and torque. By comparing the geometrical parameters, it was shown that the combustion gas transmission was able to reduce 28%, 57%, and 50% in diameter, volume, and weight, respectively. By conducting environmental tests, it was found that this equipment can prevent changes in the gas valve status in harsh environmental conditions caused by vibrations and temperature changes and provide a high safety factor.

## KEYWORDS

Piezoelectric actuator, gas transmission equipment, miniaturization, Weight Loss, safety improvement

---

<sup>1</sup> Corresponding Author: Email: khoogar@mut.ac.ir