



Dynamic Simulation of a Soft Fluidic Actuator with Finite Element Method

Melika Mohammadi ^{a*}, Ahmad Karimi ^b, Mahdi Bamdad ^c, Seyed Ali Sina ^a

^a Department of Mechanical Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

^c School of Computer Science and Engineering, Faculty of Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia

^a Mechanical Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Dynamic Simulation of a Fluidic Soft Actuator with Finite Element Method. Mechanics of Advanced and Smart Materials. 2025;5(3):437-462.

doi <https://10.66224/masm.5.3.437>

KEYWORDS

Soft Fluidic Actuator,
Fluid-Structure Interaction,
Bio-inspired Robot Fish,
Modal Analysis,
Resonance Tuning.

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive vibrational and static analysis of a soft actuator considering nonlinear effects. Fluidic channels embedded within a soft beam are considered a soft robotic actuator, exhibiting nonlinear characteristics due to the inherent properties of the soft material. The analytical process is based on Hamilton's principle, and the numerical solution has been carried out using the finite element software ANSYS, utilizing the Fluid-Structure Interaction (FSI) and Pre-stress Modal tools. Initially, time-dependent inlet pressure is applied, and the resulting pressure distribution within the soft fluidic actuator (SFA) is extracted over the time domain. Following the validation of results obtained from finite element software and analytical methods, the feasibility of using this actuator as an artificial muscle in a robotic fish has been examined, leveraging the phenomenon of resonance and analyzing its behavior under real-world conditions. The findings indicate that utilizing this type of actuator in the robotic fish's tail enables functional similarity to a real fish after 8 seconds. However, by applying the proposed method and tuning the operating frequency closer to the system's natural frequency, the robot can immediately exhibit movements resembling those of a biological fish.

Extended Abstract

1. Introduction

The research in modeling and analyzing soft robotics has gained increased attention, inspired by living creatures and being at the forefront of robotics evolution [1]. When researchers seek robotic systems with higher degrees of freedom for specialized applications, soft robots with flexible links are an effective alternative for traditional rigid-link robots [2]. These robots, made of silicone or other soft materials, offer various applications involving interactions with natural environments and biomedical devices. Unlike traditional rigid actuators, soft actuators have many advantages, including high compliance, low weight, and low noise.

Soft Fluidic Actuator development has gained significant popularity in the context of bio-inspired capabilities that permit adaptive, flexible interactions with unpredictable environments such as rough, uneven, and delicate terrains [3, 4]. Bio-inspired criteria have ensured that robots can benefit from their living environments for

* Corresponding author. Tel.: 09020032136

E-mail address: melika.mohammadi@um.ac.ir

DOI: <https://10.66224/masm.5.3.437>

Received: June 16, 2026; Received in revised form: July 14, 2026; Accepted: July 18, 2026.

© Author



locomotion [5], but their continuous nature, and material durability present challenges in accurate modeling and ensuring compatibility with extreme environmental conditions. To address these challenges coming from the nonlinearities and material properties, experimental, optimization, and finite element methods were extensively used to analyze the behavior of soft robots [11, 12].

The analysis of soft structures has been observed in many recent studies employing software such as Abaqus and Ansys [28, 29]. For instance, in 2020, Zhang *et al.* investigated an energy-absorbing soft actuator for the tail of a robotic fish. The softness of the robotic tail generates nonlinear effects; therefore, the nonlinear analysis capability of ANSYS is utilized to validate the soft FSI problem, and the deformation results obtained from the numerical and software-based approaches demonstrated excellent correlation [34]. Because of the interaction between the solid bodies of robots and the surrounding fluid in the marine environment, numerous studies have utilized Ansys's FSI analysis capabilities. For example, the research by Fouladi *et al.* in 2021 investigated the pressure distribution in various parts of a robotic fish during swimming, validating the experimental results against those obtained from Ansys [35]. Bamdad and Karimi, in 2022 and 2025, analyzed the dynamic behavior of a robotic fish that employs a SFA as a tail. In these studies, the robotic fish's tail was modeled as a cantilevered Euler–Bernoulli beam in Ansys, and the actuator's displacement, driven by a time-varying input pressure, was utilized as the source of thrust, with the robot's dynamic behavior examined in three-dimensional space [36, 37].

This paper presents a novel approach based on the modal analysis of a biomimetic soft actuator used as a robotic fish tail. Results illustrate that the implementation of modal analysis and resonance phenomena leads to better convergence of robotic tail behavior with the behavior of a biological fish tail. In this process, the soft actuator is modeled using Ansys software. Subsequently, an input pressure function is applied, and the system's natural frequencies, along with the actuator's deformations resulting from pressure distribution, are extracted and validated. The investigation of the margin between the natural and operating frequencies not only provides an opportunity to achieve greater system vibration where required, such as in robotic fish tail, but it also allows for maintaining a maximum separation between the operating frequency and the natural frequency, as needed in surgical and biomedical applications. This leads to higher robot efficiency and optimal interaction with the surrounding environment. Finally, this research demonstrates that the actuator's behavior as a robotic fish tail becomes fully consistent with that of a real fish after 8 seconds. However, by employing the approach presented in this study and utilizing resonance, the actuator's behavior aligns with real fish from the beginning of system operation. This has been shown by calculating the fish-robot's tail-flapping frequency and the Strouhal number, which serves as a metric for the functional compatibility of the fish robot with their biological counterparts.

2. Modeling and Formulation

In this section, the deformation field of the supporting elastic structure is formulated, and to derive accurate modeling, the following assumptions are made.

1. The fluid is incompressible, and the velocity profile remains constant along the actuator.
2. Rotary inertia and shear deformation effects are neglected.
3. Despite large deformations, the system's strain is always small.
4. The actuator is assumed to be an Euler–Bernoulli beam.
5. The actuator's motions are considered only planar.

2.1 Modeling in the Elastic Domain

The Euler–Bernoulli beam theory, besides the nonlinear strain–displacement relation (the Green strain), is employed:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U + W_{nc}) dt = 0 \quad (1)$$

Where T the kinetic energy of the system, U is the potential energy of the system, and W_{nc} is the work done by non-conservative forces. The system's kinetic energy is the sum of the fluid's and the beam's kinetic energies, arising from the system's deformation.

$$T = T_b + T_f \quad (2)$$

Where T_b represents the kinetic energy of the beam and T_f represents the kinetic energy of the fluid, defined by (3) and (4), respectively.

$$T_b = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \quad (3)$$

$$T_f = \frac{1}{2} c \int_0^L m_f (V_M^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 + V_M^2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2V_M \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial w}{\partial x}) dx \quad (4)$$

Where w is the deflection of the beam, ρ is the density of the beam, A is the cross-sectional area of the beam, c is the density of the fluid in the channel along the beam, m_f is the mass per unit length of the fluid, and V_M is the mean velocity of the fluid along the actuator.

Considering the Green strain relationship, the potential energy for a clamped Euler–Bernoulli beam can be expressed by (5).

$$U = \frac{1}{8} EA \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^4 dx + \frac{1}{2} EI \int_0^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (5)$$

Where E is the modulus of elasticity, I is the beam's inertia, and L is the beam's length. Figure 1 shows the displacement field in an Euler–Bernoulli beam

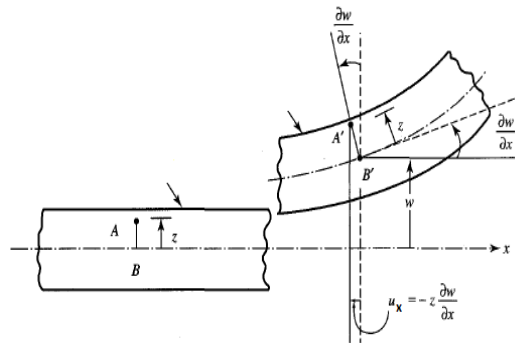


Figure 1. Displacement field

2.2 Modeling in the Fluid Domain

According to the Stokes equation for an incompressible Newtonian fluid, the governing equations can be expressed as follows:

$$\rho_f \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + F_B \quad (6)$$

Where ρ_f is the fluid density, v is the velocity vector, P is the fluid pressure in the x, y, and z directions, μ is the fluid viscosity, and F_B represents any body force. The simplified form of (6) in the x-direction can be written as (7).

$$\rho_f (2zV \frac{\partial^3 w}{\partial t \partial x^2} + V \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + V^2 \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}) = \frac{\partial P}{\partial x} + \mu zV \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \quad (7)$$

By substituting (3), (4), and (5) in (1), we have:

$$(\rho A + m_f c) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + m_f c V^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2m_f c V \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} - \frac{3}{2} EA \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 0 \quad (8)$$

To solve (7) and (8), the assumed mode method has been employed. For this purpose, the problem variables are first defined in the expanded form of (9) and (10).

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) \eta_i(t) \quad (9)$$

$$p(x, t) = \sum_{i=1}^n P_i(x) T_i(t) \quad (10)$$

Finally, EoM can be found by substituting (9) and (10) into (7) and (8).

$$M_i \ddot{\eta}_i + C_i \dot{\eta}_i + K_i \eta_i + N L_i = f_{1i} \sin(\omega t) + f_{2i} \cos(\omega t) \quad (11)$$

$$c_i \dot{\eta}_i + k_i T + n L_i = 0 \quad (12)$$

$$M_i = \rho A \int_0^l \phi_i^2(x) dx \quad (13)$$

$$C_i = \mu m_f c \int_0^l \phi_i(x) \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} dx - 2 m_f c z V \int_0^l \phi_i(x) \frac{d \phi_i(x)}{dx} dx \quad (14)$$

$$K_i = (E I + m_f c (z - z^2) V^2) \int_0^l \phi_i(x) \frac{d^4 \phi_i(x)}{dx^4} dx \quad (15)$$

$$N L_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \int_0^l \phi_i(x) \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} \frac{d \phi_j(x)}{dx} \frac{d \phi_k(x)}{dx} \eta_i(t) \eta_j(t) \eta_k(t) \left(-\frac{3}{2}\right) \quad (16)$$

$$f_{1i} = \frac{m_f c}{\rho_f z} \int_0^l \phi_i(x) \left(p_a + \sum_{m=1}^n A_{0m} \omega \sin(\beta_m c x) \right) dx \quad (17)$$

$$f_{2i} = \frac{m_f c}{\rho_f z} \int_0^l \phi_i(x) \left(\sum_{m=1}^n A_{0m} \beta_m^2 \sin(\beta_m c x) \right) dx \quad (18)$$

$$c_i = -\rho z V \int_0^l \phi_i(x) \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} dx - \mu z \int_0^l \phi_i(x) \frac{d^3 \phi_i(x)}{dx^3} dx \quad (19)$$

$$n L_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(-V^2 \int_0^l \phi_i(x) \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} \frac{d \phi_j(x)}{dx} + \mu V \int_0^l \phi_i(x) \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} \frac{d^2 \phi_j(x)}{dx^2} \right) \quad (20)$$

$$k_i = \int_0^l \phi_i(x) \frac{d P_i(x)}{dx} dx \quad (21)$$

where V is the fluid velocity, ω is the natural frequency of the system, p_a is the amplitude of the input pressure, and c is the density of the channels along the beam, defined as the number of channels along the beam, and the parameters β_m , A_{0m} , $\phi_i(x)$ are defined as follows.

$$\beta_m = (2m - 1) \frac{\pi}{2} \quad (22)$$

$$A_{0m} = -2 \frac{p_a \omega}{\beta_m \sqrt{\omega^2 + \beta_m^4}} \quad (23)$$

$$\phi_i(x) = \cos(\beta_i x) - \cosh(\beta_i x) - \frac{\cos(\beta_i L) + \cosh(\beta_i L)}{\sin(\beta_i L) + \sinh(\beta_i L)} (\sin(\beta_i L) - \sinh(\beta_i L)) X_n \quad (24)$$

2.3 Problem Definition

A soft robotic tail is generally modeled as an elastic beam that consists of a fluid-filled network of cavities [37]. Fluid channels are arranged parallel to each other and embedded within the neutral (middle) plane of the beam. The flow of viscous fluid with different pressures in the channels will induce the normal and shear stress in the elastic beam. Therefore, the stress field and internal strain of the fluid motion deform the beam curvature in a direction perpendicular to the network of fluid channels. Figure 2 illustrates the overall schematic of the actuator modeled in ANSYS software.

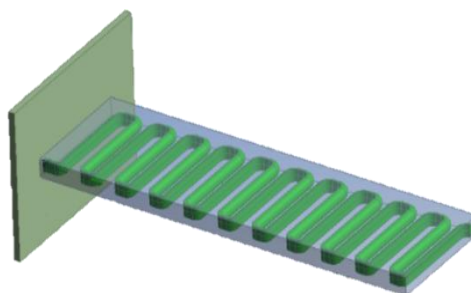


Figure 2. Soft Actuator with Fluid Channels

In 2015, Poligrinus *et al.* investigated three cross-sectional shapes, rectangular, circular, and semi-circular cross-sections for the channels of these types of actuators. The semi-circular cross-section was identified as the most effective cross-section shape of channels. The semi-circular shape for a soft bending actuator requires the slightest pressure to bend to the same angle while preserving its original cross-sectional shape [41]. Therefore, the semi-circular shape was chosen for this study.

3. Results

3.1 Problem Solution and Results Analysis

To investigate the dynamic and static behavior of the SFA, after modeling the actuator in the geometry environment of ANSYS software, Fluent was used for meshing the soft actuator and applying boundary and initial conditions. For meshing, a hexahedral mesh with 1626908 nodes and 4717544 elements was employed to achieve convergent responses to ensure mesh convergence. The reason for employing this type of meshing is its use in similar research [36]. The inlet pressure and inlet velocity were applied at the channel entrance. After modeling and applying initial conditions, the pressure distribution along the beam was determined. Figures 3 and 4 display the location of the inlet pressure and the maximum pressure distribution along the actuator, respectively.

Table 1 shows the values of the geometric and mechanical parameters of the SFA used in the research. These values are considered identical to those used in [40] to clearly indicate the accuracy of the software method.

Table 1. Values of the geometric and mechanical parameters of the actuator

Parameter	Value	Parameter	Value
$l_f (mm)$	80	$L (mm)$	320
$E (KPa)$	2	$\rho (kg/m^3)$	1100
$\mu_f (kg/m.s)$	0.01307	$\rho_f (kg/m^3)$	1000
$p_a (Pa)$	4	$b_s (mm)$	90
$z (mm)$	6	$h_s (mm)$	12
$r_c (mm)$	5	$l (mm)$	3250

Table 1 summarizes the parameters used in the finite element model. Here, L denotes beam length, r_c is the channel radius, z is the distance between the channel centerline and the neutral axis, E is the Young's modulus, ρ and ρ_f are the densities of the solid and fluid, μ_f is the dynamic viscosity of the fluid, and p_a is the inlet pressure amplitude.

In this study, the analysis was carried out over a time interval of 10 seconds and with a pressure amplitude of 4 Pa. As expected, considering the input pressure function (10), pressure variations along the beam are negligibly affected by the channel position in the coordinate directions and are clearly a function of time. Figures 5, 6, and 7 show the pressure variations over time, the displacement value under the distributed fluid pressure, and displacement versus number of channels, respectively. After ensuring the results of the manner and magnitude of pressure distribution along the actuator, its static analysis was then performed, and the large deformations resulting from the fluid pressure distribution along the beam were obtained.

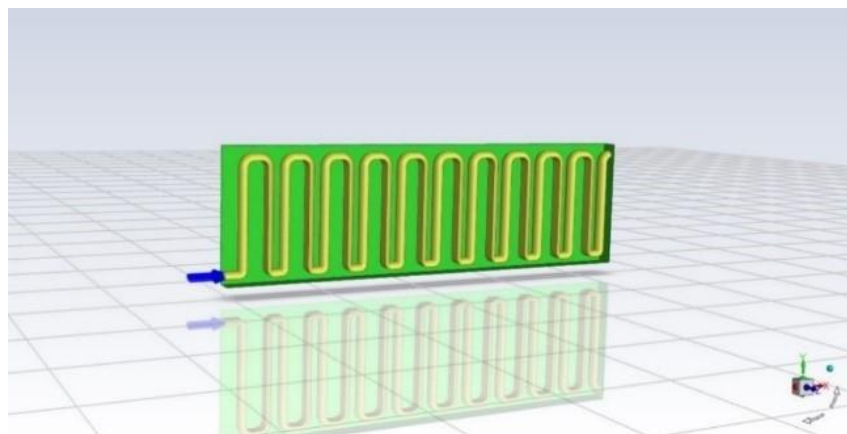


Figure 3. Location of the inlet pressure

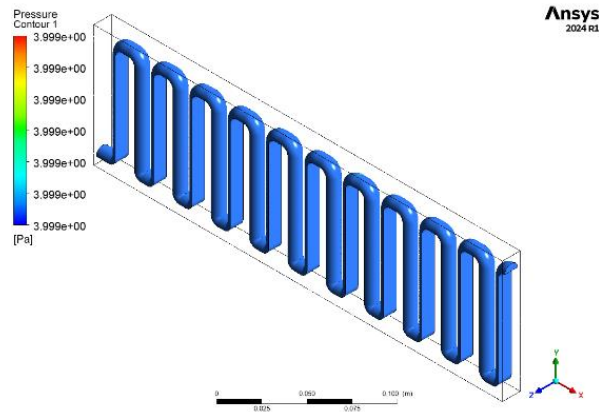


Figure 4. Pressure distribution at the 10th second along the actuator

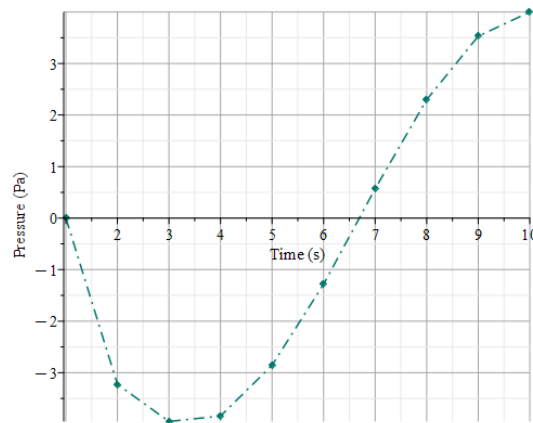


Figure 5. Pressure distribution over the time domain

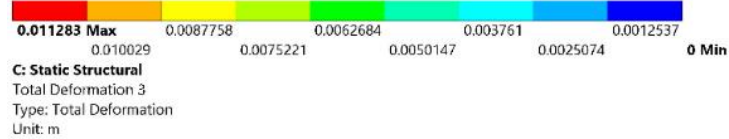


Figure 6. Displacement caused by fluid pressure

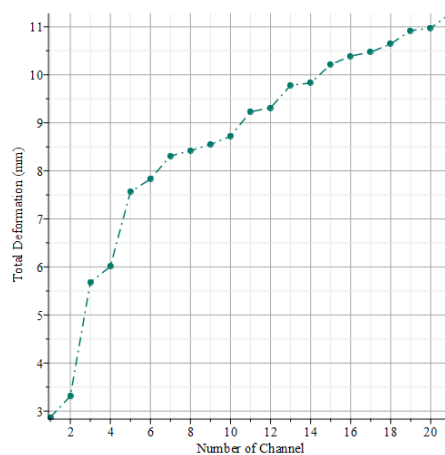


Figure 7. Displacement versus number of channels

In the following, the vibration analysis of the system has been carried out concerning the boundary conditions and the force applied to the actuator in the previous sections. In the next section, results obtained from validating

the natural frequencies of the SFA with research [31] are discussed. The high correlation between the analytical and software outputs of these two studies indicates the high accuracy of the software method and the possibility of using it for analyzing the vibrational behavior of similar soft actuators.

3.2 Validation

Although ANSYS software has in recent years been widely considered by researchers in the field of interaction of multi-physical structures, and computer-based simulations are widely used in solving complex and practical engineering problems, there is always a need for accurate validation of computer solutions; because due to minor errors or assumptions used in the boundary conditions during the solution process, software error, or even errors caused by meshing accuracy, the response may differ greatly from reality. The extracted numerical results were validated with the analytical methods presented in 2022 and 2025 [37, 40]. In these studies, a semi-analytical method has been presented for solving this type of problem so that, in addition to significantly reducing the computational volume and saving time, highly accurate responses can be obtained for these types of problems. In order to accurately examine the presented method, all geometric and mechanical properties are consistent with those in the studies. Table 2 compares the natural frequencies of the system in the presented study and [40].

Table 2. Comparison of the natural frequencies

Method	Number of mode shapes	ω_1	ω_2	ω_3
Numerical	*	8.99	55.89	154.2
Analytical [40]	3	8.79	55.10	154.2

The difference between the two methods in the first natural frequency is 2%, in the second natural frequency is 4.1%, and in the third natural frequency, it is only 0.03%. Figures 8 and 9 show the investigation of the eigenvalues of the nonlinear model.

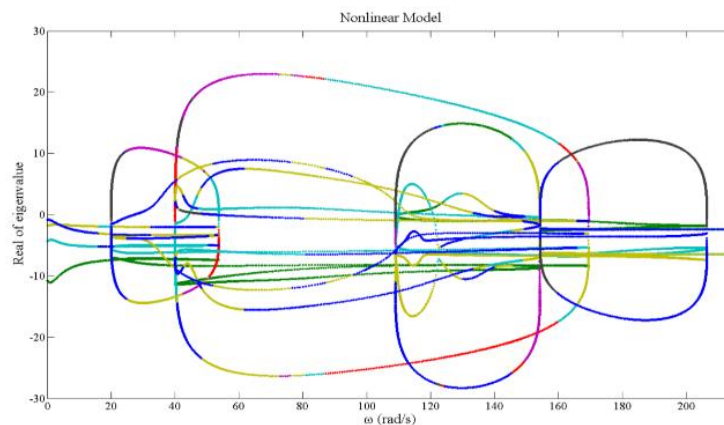


Figure 8. Real part of eigenvalues

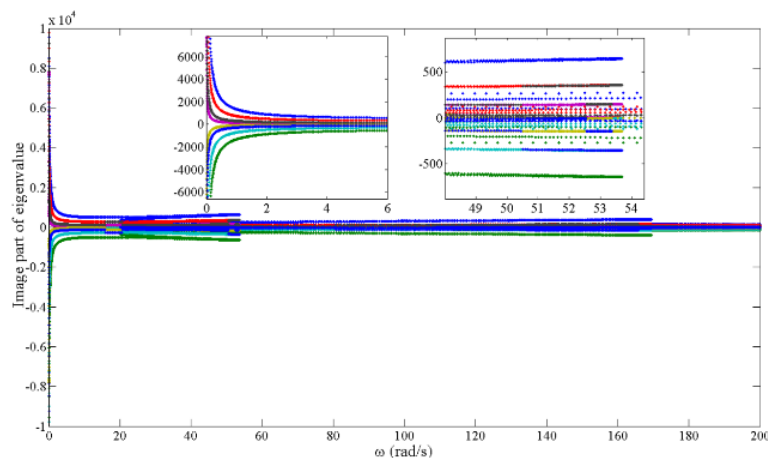


Figure 9. Imaginary part of eigenvalues

Subsequently, to ensure the results of the static analysis at the 10th second under the pressure function (Equation 10), the output of the model analyzed using ANSYS software (Figure 6) was validated. Figure 10 demonstrates the displacement values of the actuator [40].

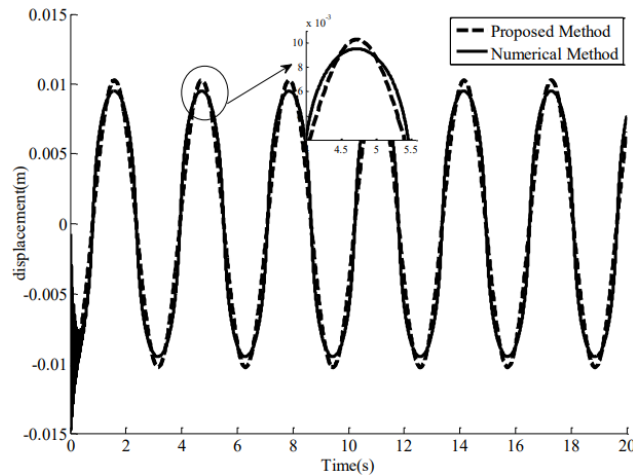


Figure 10. Actuator displacement using the semi-analytical method

In the final step, after ensuring the results of the static and vibration analyses, the proposed approach of using the natural frequency in real-world applications was employed to investigate the possibility of using this method in a robotic fish. As evident from Fig.5, the input pressure function to the actuator exhibits a sinusoidal behavior. This pressure distribution can provide bidirectional displacement of the actuator. From the displacement obtained in the actuator under input pressure, the required propulsion force and speed for the robotic fish can be derived

according to the Lighthill theory ($U = \sqrt{\frac{M(\frac{\partial w}{\partial T})^2}{M(\frac{\partial w}{\partial X})^2 + \rho_w A(L)C_D}}$). Where, M is the weight of the robot, ρ_w is the fluid density, C_D is the drag coefficient, $A(L)$ is the nominal cross-sectional area, and w is the displacement of the robot's tail. Table 3 shows the assumed values for the considered robot.

Table 3. Parameters of the robotic fish

Parameter	Value
$A(L)$ [m^2]	0.011
M [Kg]	0.311
L_f [mm]	25
ρ_w [Kg/ m^3]	1000
C_D	0.295

By substituting the values from Table 3 into the Lighthill equation, the average speed values based on the tail-flapping frequency can be found as shown in Figure 11.

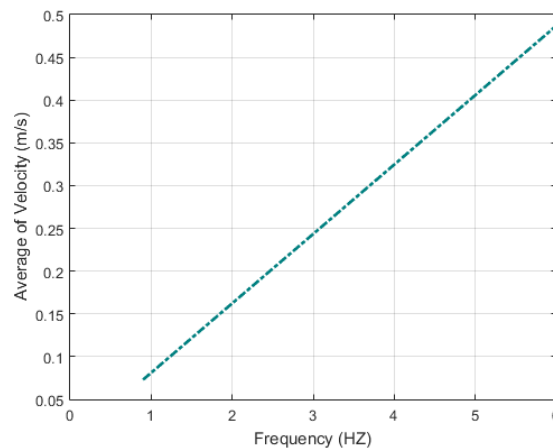


Figure 11. Average of robot speed versus tail bit frequency

The time to reach a flapping frequency of 6 Hz, according to (11), is 8 seconds, the corresponding Strouhal number $St = \frac{w\omega}{U}$, which indicates the degree to which the robot's behavior approximates that of a biological fish, is 0.31 at this frequency and speed. This value falls within the range of biological fish (0.25 to 0.4) [42].

4. Discussion of Results

In this paper, the dynamic and static behavior of a SFA as an artificial tail was studied using ANSYS finite element software, and the results of the actuator's deformation under fluid force were examined. This method provides much more accurate responses compared to other methods such as Newton-Euler and Lagrange, as the boundary conditions modeled in this method align much better with reality than the assumptions in those methods. Furthermore, this method addresses the effects of fluid head loss in the channels, which previous methods disregard due to the extremely high computational volume.

The primary approach of this research was to leverage the phenomenon of natural resonance to bring the dynamic response of the SFA closer to its real-world applications, such as the tail of a robotic fish. The obtained results indicate that the system's first natural frequency is 8.99 Hz. Considering the range of the Strouhal number, to achieve biological fish-like behavior, the tail flapping frequency should be at least 6 Hz, which occurs from the beginning of the eighth second. If, by bringing system's operating frequency closer to its natural frequency, not only will the system's behavior from the start of motion be similar to a real fish, but the increased oscillation amplitude in this state will also generate more propulsive force.

Moreover, by carefully examining Table. 2, it can be observed that the results obtained from the analytical and numerical methods have a highly acceptable correlation. Therefore, ANSYS software can be considered a useful tool in analyzing SFA. As mentioned, using computer tools not only saves time but also provides more reliable responses because the possibility of errors in the calculation process is minimized. Employing assumptions closer to reality, in addition to optimizing the response, also prevents errors arising from complex formulations in numerical methods. Consequently, the use of computers is particularly important in industrial applications where losing even a fraction of time can reduce profitability. Given the sinusoidal deformation due to the sinusoidal nature of the fluid pressure function input to the actuator, it can be realized that the only control tool for these types of actuators is the input pressure. Therefore, it would be preferable for the input pressure function to be dependent not only on time but also on position to ensure optimal actuator control, as deformation in these types of actuators, unlike traditional actuators, occurs along the links, and controlling the links requires precise control of the input pressure.

It is further suggested, considering the high importance of precise control for soft robots due to their specific applications, to focus on their online control. Additionally, optimizing geometric parameters such as the dimensions of the fluid channels or updating the mechanical properties of the system using methods like the Genetic Algorithm could be explored to enhance the system's efficiency in real-world applications like robotic fish tails.

5. Conclusion

The fluid-filled network of channels embedded into the soft body is considered a soft, continuous artificial muscle. Fluid pressurization inflates the embedded cavities and produces the desired deformation of the elastic structure. The nature of this problem and the extracted EoM make accurate and efficient solutions challenging. Therefore, the pressure distribution along the actuator was obtained in the time domain, followed by the extraction of the system's deformations and natural frequencies. To verify the accuracy of the proposed approach, the obtained results were validated against a numerical and semi-analytical study published in 2022, showing good agreement. The proposed strategy provides an efficient solution for nonlinear equations of motion while maintaining a low computational cost. Finally, by exploiting the resonance phenomenon, the actuator can exhibit a swimming behavior that more closely resembles that of a real fish from the beginning of its operation.



شبیه‌سازی دینامیکی عملگر نرم مبتنی بر سیال با روش المان محدود

ملیکا محمدی^{الف*}، احمد کریمی^ب، مهدی بامداد^ج، سید علی سینا^د

^{الف} کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران melika.mohammadi@mail.um.ac.ir

^ب کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، Ahmadvkarimi396@gmail.com

^ج دانشیار، گروه مهندسی کامپیوتر، UNSW، سیدنی، استرالیا، mbamdad@unsw.edu.au

^د استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، asina@shahroodut.ac.ir

واژگان کلیدی	چکیده
عملگر سیالاتی نرم، اندرکنش سیال و سازه، ربات ماهی، تحلیل مودال، رزونانس.	در این پژوهش تحلیل دینامیکی و استاتیکی یک عملگر سیالاتی نرم در حالت غیرخطی ارائه شده است. تیر نرم دارای کانال‌های سیال به عنوان عملگر رباتیکی در نظر گرفته شده که به علت ماهیت انعطاف‌پذیرش اثرات غیرخطی را به دنبال دارد. فرآیند تحلیل بر پایه اصل همیلتون و حل عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود انسیس صورت گرفته است. در این روش ابتدا با اعمال تابع فشار ورودی متغیر با زمان، توزیع فشار در همه نقاط عملگر نرم سیالاتی در دامنه زمانی حاصل شده و سپس به تحلیل استاتیکی و مودال ناشی از فشار سیال پرداخته شده است. در ادامه پس از اعتبارسنجی نتایج حاصل از نرم‌افزار المان محدود و روش تحلیلی، با رویکردی جدید با بهره‌گیری از پدیده رزونانس و تحلیل رفتار عملگر در شرایط واقعی، امکان استفاده از آن به عنوان ماهیچه مصنوعی در ربات ماهی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از این نوع عملگر در کاربرد دم ربات ماهی باعث شباهت عملکردی آن به ماهی واقعی بعد از ۸ ثانیه می‌شود، این درحالی است که با بهره‌گیری از روش پیشنهادی در پژوهش حاضر و نزدیک کردن فرکانس کاری به فرکانس طبیعی سیستم، ربات می‌تواند از ابتدا شروع به حرکت رفتاری مشابه با ماهی بیولوژیکی داشته باشد.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به نیازهای گوناگون در زمینه‌های مختلف تعامل انسان و ربات از جمله پزشکی، ساختارهای پیوسته بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. ربات‌های پیوسته فاقد مفاصل صلب هستند و حرکت آن‌ها به‌طور مداوم در طول بدنه رخ می‌دهد [۲]. ماهیت پیوسته ربات‌های نرم، امکان تعامل با اشیاء حساس یا ورود به فضاهای محدود، پیچیده یا نامنظم را فراهم می‌کند [۳، ۴]. این ربات‌ها از ساختارها و عملگرهای پیوسته برای حرکت‌های پیچیده‌تر در طول بدنه بهره می‌گیرند [۵].

زمانی که پژوهشگران تمایل دارند ربات‌هایی با درجات آزادی بیشتر برای کاربردهای خاص در اختیار داشته باشند، ربات‌های پیوسته با لینک‌های انعطاف‌پذیر و بدون مفصل خلأهای موجود در ساختار ربات‌های صلب را برطرف نموده و این قابلیت را مهیا می‌سازند [۶]. به دلیل دقت بالا و تطبیق‌پذیری این دسته از ربات‌ها با طبیعت و به‌خصوص بدن موجودات زنده، در علم مهندسی پزشکی محبوبیت بسیار بالایی پیدا کرده‌اند [۷]. این تطبیق‌پذیری باعث می‌شود تا تخریب و آسیب ربات به محیط پیرامون به حداقل برسد. یکی از ملموس‌ترین مثال‌ها در این زمینه خرطوم فیل می‌باشد که یکی از مهمترین منابع برای الهام گرفتن دانشمندان و روی آوردن به سمت این دسته از ربات‌ها بوده است [۸]. عملگرهای نرم اغلب تحت کنترل فشار یا ولتاژ هستند،

بنابراین رابطه بین عملگرهای ورودی و پیکربندی نمی‌تواند تنها با روش‌های هندسی نظیر قوانین مثلثات به روشنی بیان شود و به روش‌های ریاضیاتی مکانیک محیط‌های پیوسته نیاز دارد [۹]. این پیچیدگی‌های محاسباتی ایجاد شده همواره رسیدن به یک مدل قابل اعتماد برای مهندسين را با چالش‌هایی جدی همراه کرده است. از این رو همواره محققان به پژوهش‌های بسیاری در زمینه ربات‌های نرم و تقابل ساختارهای جامد و سیال به منظور رسیدن به یک مدل تا حد امکان نزدیک به واقعیت، دقیق و قابل اعتماد برای مدل‌سازی، تحلیل و کنترل عملگرهای نرم پرداخته‌اند [۱۰]. به منظور غلبه بر چالش‌های ناشی از رفتار غیر خطی مواد نرم، روش‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود همواره مورد توجه محققین بوده است [۱۱، ۱۲].

از طرفی همواره تغییر شکل‌های بزرگ باعث به‌وجود آمدن چالش‌هایی در امر کنترل این نوع عملگرها می‌باشند که به نیاز مبرم مدل‌سازی دقیق این نوع عملگرها، صحنه می‌گذارند [۱۳]. در واقع به دلیل اینکه در ربات‌های نرم برخلاف ربات‌های سنتی جابه‌جایی‌ها تنها در مفاصل رخ نمی‌دهند و در طول لینک‌ها اتفاق می‌افتند، به‌دست آوردن مکان دقیق عملگر با استفاده از زوایای مفاصل و طول لینک‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد.

در سال‌های اخیر حل دقیق برای ربات‌های نرم، به روش‌های نیوتن-اولیر [۱۴] و لاگرانژ [۱۵، ۱۶] بسیار گسترش یافته است. همچنین از تئوری کسرات برای مدل‌سازی دینامیکی و استاتیکی ربات‌های پیوسته بهره برده شده است [۱۷]. در سال ۲۰۰۱ گراوانگ^۱ و همکاران یک تیر یک‌سر گیردار انعطاف‌پذیر را به عنوان عملگر نرم در نظر گرفتند و به تحلیل استاتیکی آن پرداختند. در این پژوهش تغییر شکل‌ها کوچک و از اثرات غیرخطی صرف‌نظر شد [۱۸]. البته بعدها پژوهشگرانی اثرات تغییر شکل‌های بزرگ را بر روی سیستم‌های پیوسته نرم غیرخطی بر پایه قوانین همیلتون در نظر گرفتند [۱۹، ۲۰]. بامداد و همکاران نیز در سال ۲۰۱۹ روشی بر پایه ماتریس ژاکوبین برای سینماتیک مستقیم این سازه‌ها ارائه کردند [۲۱]. اما همواره به دلیل درجات آزادی بی‌نهایت ربات‌های پیوسته، همگرا شدن پاسخ‌ها در روش‌های تکراری امری غیرممکن بوده است. از این رو ثیفر^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۹ روشی برای همگرایی سریع‌تر پاسخ‌ها و پرهیز از ارتعاشات ناخواسته ارائه دادند. در این روش معادلات حرکت به کمک قوانین نیوتن و روش اجزا محدود حاصل می‌شدند. البته به دلیل خطی بودن مسئله پاسخ‌های سیستم تنها در همسایگی نقاط تعادل صادق بودند [۲۲]. سعادت و همکاران نیز در سال ۲۰۲۱ به ساده‌سازی و خلاصه‌سازی روش‌های مختلف ارائه شده برای مدل‌سازی و حل مسائل تیر پیوسته پرداختند [۲۳]. از این رو به دلیل غیرممکن بودن یافتن پاسخ دقیق این مسائل پژوهشگران همواره سعی داشته‌اند روشی تخمینی ارائه دهند تا بیشترین و سریع‌ترین همگرایی را فراهم آورد [۲۴].

برخلاف عملگرهای سنتی، عملگرهای نرم از مزیت‌های بسیاری نظیر سازگاری بالاتر با محیط پیرامون، وزن و نویز کمتر برخوردار هستند. به سبب کاربرد وسیع این دسته از عملگرها پژوهش‌های بسیاری به روش‌های آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی در این زمینه انجام شده است [۲۵، ۲۶]. از طرفی امروزه با توجه به گسترش و دسترسی به کامپیوترهای قدرتمند، تحلیل مسائل پیچیده مکانیکی به‌وسیله نرم‌افزارها بسیار مورد توجه محققین این زمینه قرار گرفته است [۲۷]. از این رو تحلیل ساختارهای نرم در بسیاری از پژوهش‌ها در سال‌های اخیر به کمک نرم‌افزارهایی نظیر آباکوس [۲۸] و انسیس به چشم می‌خورد [۲۹].

به‌عنوان مثال وانگ^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۰ از نرم افزار انسیس برای تحلیل دو بخش گازی و جامد نرم مدل خود بهره بردند و سپس تغییر شکل‌های سیستم را ناشی از فشار سیال ارائه دادند [۳۰]. در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۹ نرم‌افزار انسیس به منظور تحلیل یک سیستم غیرخطی با تغییر شکل‌های بزرگ تحت اثر یک سیال نیوتنی غیرقابل تراکم بر روی جامد نرم استفاده شد. در این پژوهش از روش گلرکین^۴ برای اعتبارسنجی استفاده شد که نتایج همبستگی بسیار بالایی با یکدیگر داشتند، به نحوی که خطای به‌دست آمده قابل صرف‌نظر بود [۳۱]. از دیگر پژوهش‌های این زمینه در سال‌های اخیر می‌توان به پژوهشی در سال ۲۰۲۰ اشاره کرد که از انسیس برای اعتبارسنجی تغییر شکل به‌دست آمده از روش خود برای یک سازه نرم تحت فشار

¹ Gravagne² Thieffry³ Wang⁴ Galerkin

ورودی استفاده کرد و یا لئو^۱ و همکاران که فرکانس‌های طبیعی یک سیستم تقابل جامد و سیال را در اثر توزیع سیال بر روی یک صفحه نرم به کمک نرم‌افزار انسیس ارائه کردند [۳۲، ۳۳]. یکی از وسیع‌ترین حوزه‌های کاربرد مواد جدید، حوزه دریایی است. با پیشرفت روزافزون این حوزه علاقه به استفاده از مواد جایگزین و کارآمد توجه بالایی به خود جذب کرده است. به عنوان مثال ژانگ^۲ در پژوهشی از یک عملگر نرم با قابلیت جذب انرژی برای دم ربات ماهی استفاده کرده است. نرم بودن دم ربات، اثرات غیرخطی را به همراه دارد. لذا در این پژوهش از قابلیت تحلیل غیرخطی نرم‌افزار انسیس برای اعتبارسنجی مسئله تقابل جامد نرم با سیال بهره گرفته شده و نتایج تغییر شکل عملگر نرم حاصل از روش عددی و نرم‌افزاری همبستگی بسیار قابل قبولی را داشته‌اند [۳۴]. همچنین به دلیل تقابل ساختارهای جامد ربات‌ها با سیال محیط در حوزه دریایی، پژوهش‌های زیادی از قابلیت تحلیل تقابل سیال-جامد نرم‌افزار انسیس در این حوزه بهره برده‌اند. برای مثال می‌توان به پژوهش فولادی و همکاران در سال ۲۰۲۱ اشاره کرد. در این تحقیق توزیع فشار در قسمت‌های مختلف ربات ماهی در هنگام شناوری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از نرم‌افزار انسیس اعتبارسنجی شد [۳۵]. بامداد و کریمی نیز در پژوهش‌هایی در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۵ به تحلیل رفتار دینامیکی ربات ماهی که از عملگر سیالاتی نرم به عنوان دم بهره می‌برد پرداخته‌اند. در این پژوهش‌ها دم ربات ماهی به صورت یک تیر اوپلر-برنولی یک‌سرگردار در نرم‌افزار انسیس مدل شده و از جابه‌جایی‌های عملگر ناشی از تابع متغیر با زمان فشار ورودی، به عنوان ایجادکننده نیروی تراست بهره برده شده و رفتار دینامیکی ربات در فضای سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته است [۳۶، ۳۷].

تمرکز این پژوهش بر مطالعه و به کارگیری پدیده رزونانس و اثرات آن برای نزدیک‌تر کردن رفتار دینامیکی عملگر به اندام طبیعی نظیر دم ربات ماهی می‌باشد. برای این منظور اثرات یک سیال غیرقابل تراکم روی تیر اوپلر-برنولی نرم به عنوان یک سیستم پیوسته دارای تغییر شکل‌های بزرگ و همچنین اثرات غیرخطی در نظر گرفته شده است. این تحقیق در ادامه پژوهش‌های پیشین انجام شده در مورد بررسی رفتار استاتیکی عملگر نرم به عنوان بازوی نرم رباتیکی و همچنین بررسی رفتار دینامیکی آن در کاربرد دم ربات ماهی، به تحلیل مودال آن پرداخته و با رویکردی جدید نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از تحلیل مودال و استفاده از پدیده رزونانس محدوده عملکرد عملگر مورد استفاده کاملاً منطبق بر رفتار دم ماهی بیولوژیکی می‌باشد. در این مسیر، ابتدا به کمک نرم‌افزار انسیس عملگر نرم مدل شده سپس تابع فشار ورودی اعمال و فرکانس‌های طبیعی سیستم و همچنین تغییر شکل‌ها در عملگر بر اثر توزیع فشار استخراج و اعتبارسنجی شده است. تحلیل فرکانس‌های طبیعی این امکان را فراهم می‌آورد تا هنگامی که نیاز به ارتعاشات بیشتر در سیستم وجود دارد مانند کاربرد آن به عنوان دم ربات ماهی برای افزایش نیروی پیشران و همچنین زمانی که نیاز به فاصله حداکثری فرکانس کاری با فرکانس طبیعی وجود دارد مانند کاربردهای بازو نرم رباتیکی در عمل‌های جراحی و مهندسی پزشکی، علاوه بر راندمان بالاتر ربات، تعامل آن با محیط پیرامون خود به بهترین نحو صورت پذیرد تا تعامل انسان-ربات که کلیدی‌ترین کاربرد این دسته از ربات‌ها محسوب می‌شود به بهترین نحو صورت پذیرد. در انتها این پژوهش نشان داده شده که رفتار عملگر به عنوان دم ربات ماهی پس از گذشت ۸ ثانیه کاملاً منطبق بر رفتار ماهی واقعی می‌باشد. این درحالیست که با بهره‌گیری از رویکرد ارائه شده در این پژوهش و با استفاده از پدیده رزونانس، از ابتدا شروع به کار سیستم رفتار عملگر مطابق با رفتار ماهی واقعی خواهد بود. این امر با محاسبه فرکانس دم زدن ربات ماهی و عدد استروهال^۳ که معیاری از تطابق عملکردی ربات‌های ماهی با ماهی بیولوژیکی می‌باشد نشان داده شده است.

۱-۱- نوآوری‌های مقاله

در مقایسه با مدل‌های دینامیکی پیشین عملگر سیالاتی نرم، از جمله فرمول‌بندی‌های نیمه‌تحلیلی ارائه شده در مراجع [۳]، ۸، ۴۰ و شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود مبتنی بر نیروی پیشران دم رباتیک ماهی در مراجع [۳۶، ۳۷]، پژوهش حاضر سه نوآوری مشخص ارائه می‌دهد. نخست، بر خلاف پژوهش‌های پیشین که تنها به حل یک مدل بر پایه روش مود مفروض یا شبیه‌سازی صرفاً مبتنی بر جابه‌جایی اکتفا می‌کرد، تاثیر متقابل فشار و تغییرشکل عملگر با استفاده از تحلیل تقابل سیال-جامد (FSI) به همراه تحلیل مودال در نرم‌افزار انسیس به طور کامل ارائه می‌شود، به گونه‌ای که فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها مستقیماً از

¹ Luo

² Zhang

³ Strouhal number

پیکربندی تغییر شکل یافته تحت فشار استخراج می گردند. دوم، فرکانس های طبیعی و تغییر شکل های استاتیکی به دست آمده با سه منبع مستقل مدل نیمه تحلیلی مراجع [۳۷، ۴۰] و نتایج FSI مرجع [۳۱] اعتبارسنجی شده اند؛ سطحی از اعتبارسنجی که در پژوهش های پیشین روی این عملگر گزارش نشده است. همچنین در مهمترین رویکرد پژوهش برای نخستین بار رزونانس را به عنوان یک راهبرد طراحی معرفی می کند؛ با نزدیک کردن فرکانس کاری به فرکانس طبیعی، دم رباتیکی بر اساس معیار عدد استروهل از همان ابتدای حرکت، رفتاری مشابه با ماهی بیولوژیکی از خود نشان می دهد و حالت گذار چندثانیه ای که در تحریک با فرکانس دلخواه و غیر رزونانسی مانند مراجع [۳۶، ۳۷] وجود دارد، حذف می شود.

۲- مدل سازی و فرمول بندی

به دلیل وجود محدودیت ها برای رسیدن به پاسخ کاملاً دقیق مساله پیش روی، فرضیاتی صورت گرفته که شامل موارد زیر هستند [۳۸].

۱- سیال غیر قابل تراکم می باشد و پروفیل سرعت در طول عملگر ثابت می باشد.

۲- از اثرات اینرسی دورانی و تنش برشی صرف نظر شده است.

۳- با وجود تغییر شکل های بزرگ، کرنش سیستم همواره کوچک می باشد.

۴- عملگر به صورت تیر اوپلر- برنولی فرض شده است.

۵- حرکات عملگر در صفحه فرض شده است.

۲-۱- مدل سازی در حوزه الاستیک

با در نظر گرفتن شرایط فوق و بهره بردن از قانون همیلتن می توان نوشت:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U + W_{nc}) dt = 0 \quad (1)$$

که در آن T انرژی جنبشی سیستم، U انرژی پتانسیل سیستم و W_{nc} کار نیروهای غیر پایستار می باشد. انرژی جنبشی سیستم شامل مجموع انرژی جنبشی سیال و تیر، ناشی از تغییر شکل سیستم می باشد.

$$T = T_b + T_f \quad (2)$$

که T_b نشان دهنده انرژی جنبشی تیر و T_f نشان دهنده انرژی جنبشی سیال می باشد که به صورت روابط ۳ و ۴ تعریف می شوند.

$$T_b = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx \quad (3)$$

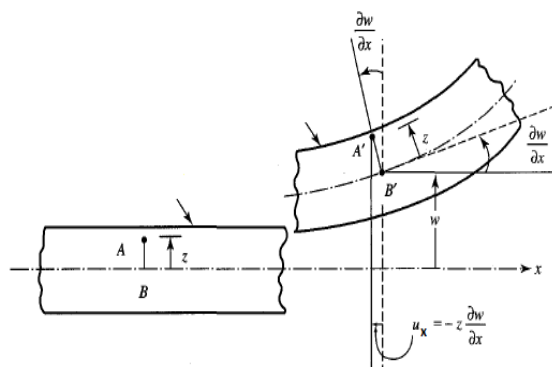
$$T_f = \frac{1}{2} c \int_0^L m_f (V_M^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 + V_M^2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2V_M \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial w}{\partial x}) dx \quad (4)$$

که w جابه جایی تیر، ρ چگالی تیر، A سطح مقطع تیر، c چگالی کانال سیال در طول تیر، m_f جرم واحد طول سیال و V_M سرعت میانگین سیال در طول عملگر می باشد.

باتوجه به رابطه کرنش گرین، می توان انرژی پتانسیل را برای تیر یک سر گیردار اوپلر- برنولی به صورت رابطه ۵ نوشت.

$$U = \frac{1}{8} EA \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^4 dx + \frac{1}{2} EI \int_0^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (5)$$

که در آن E مدول الاستیسیته، I اینرسی تیر و L طول تیر می‌باشد. شکل ۱. شماتیک کلی میدان جابه‌جایی عملگر را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۱ میدان جابه‌جایی در تیر اویلر-برنولی [۳۹]

۲-۲- مدل‌سازی در حوزه سیال

به منظور مدل‌سازی بخش سیال، از رابطه استوکس بهره گرفته شده است.

$$\rho_f \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + F_B \quad (۶)$$

در رابطه استوکس ρ_f چگالی سیال، v بردار سرعت، P فشار سیال در جهت‌های x, y, z ، μ لزجت سیال و F_B نشانگر هرگونه نیروی حجمی می‌باشد. فرم ساده شده رابطه ۶ را در جهت x می‌توان به صورت رابطه ۷ نوشت.

$$\rho_f \left(2zV \frac{\partial^3 w}{\partial t \partial x^2} + V \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + V^2 \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = \frac{\partial P}{\partial x} + \mu zV \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \quad (۷)$$

با جایگذاری روابط ۳، ۴ و ۵ در رابطه ۸؛ رابطه حاصل می‌شود.

$$(\rho A + m_f c) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + m_f c V^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2m_f c V \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} - \frac{3}{2} EA \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 0 \quad (۸)$$

به‌منظور حل روابط ۷ و ۸ روش مد مفروض به کار گرفته شده است. برای این منظور ابتدا متغیرهای مسئله به فرم گسترش یافته روابط ۹ و ۱۰ تعریف می‌شود.

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) \eta_i(t) \quad (۹)$$

$$p(x, t) = \sum_{i=1}^n P_i(x) T_i(t) \quad (۱۰)$$

حال با جایگذاری روابط ۹ و ۱۰ در روابط ۷ و ۸ و سپس با ضرب در هر شکل مود و انتگرال‌گیری روابط ۱۱ و ۱۲ حاصل می‌شوند [۴۰].

$$M_i \ddot{\eta}_i + C_i \dot{\eta}_i + K_i \eta_i + N L_i = f_{1i} \sin(\omega t) + f_{2i} \cos(\omega t) \quad (۱۱)$$

$$c_i \dot{\eta}_i + k_i T + n L_i = 0 \quad (۱۲)$$

$$M_i = \rho A \int_0^L \phi_i^2(x) dx \quad (۱۳)$$

$$C_i = \mu m_f c \int_0^L \phi_i(x) \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} dx - 2m_f c z V \int_0^L \phi_i(x) \frac{d \phi_i(x)}{dx} dx \quad (۱۴)$$

$$K_i = (EI + m_f c (z - z^2) V^2) \int_0^L \phi_i(x) \frac{d^4 \phi_i(x)}{dx^4} dx \quad (۱۵)$$

$$NL_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \int_0^l \phi_i(x) \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} \frac{d\phi_j(x)}{dx} \frac{d\phi_k(x)}{dx} \eta_i(t) \eta_j(t) \eta_k(t) \left(-\frac{3}{2}\right) \quad (16)$$

$$f_{1i} = \frac{m_f c}{\rho_f z} \int_0^l \phi_i(x) \left(p_a + \sum_{m=1}^n A_{0m} \omega \sin(\beta_m c x) \right) dx \quad (17)$$

$$f_{2i} = \frac{m_f c}{\rho_f z} \int_0^l \phi_i(x) \left(\sum_{m=1}^n A_{0m} \beta_m^2 \sin(\beta_m c x) \right) dx \quad (18)$$

$$c_i = -\rho z V \int_0^l \phi_i(x) \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} dx - \mu z \int_0^l \phi_i(x) \frac{d^3 \phi_i(x)}{dx^3} dx \quad (19)$$

$$nL_i = \sum_i^n \sum_j^n (-V^2 \int_0^l \phi_i(x) \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} \frac{d\phi_j(x)}{dx} + \mu V \int_0^l \phi_i(x) \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} \frac{d^2 \phi_j(x)}{dx^2} \quad (20)$$

$$k_i = \int_0^l \phi_i(x) \frac{dP_i(x)}{dx} \quad (21)$$

که در آن‌ها V سرعت سیال، ω فرکانس طبیعی سیستم، p_a دامنه فشار ورودی و c چگالی کانال‌ها در طول تیر که به صورت تعداد کانال‌ها در طول تیر تعریف می‌شوند و پارامترهای A_{0m} ، β_m ، $\phi_i(x)$ به صورت زیر تعریف می‌شوند.

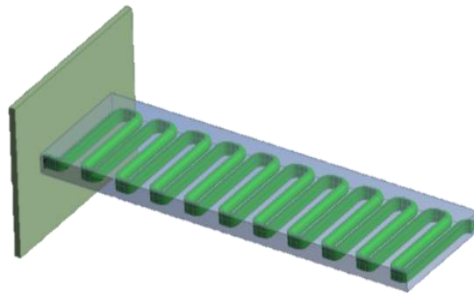
$$\beta_m = (2m - 1) \frac{\pi}{2} \quad (22)$$

$$A_{0m} = -2 \frac{p_a \omega}{\beta_m \sqrt{\omega^2 + \beta_m^4}} \quad (23)$$

$$\phi_i(x) = \cos(\beta_i x) - \cosh(\beta_i x) - \frac{\cos(\beta_i L) + \cosh(\beta_i L)}{\sin(\beta_i L) + \sinh(\beta_i L)} (\sin(\beta_i L) - \sinh(\beta_i L)) X_n \quad (24)$$

۲-۳- تعریف مسئله

در طراحی عملگر نرم، کانال‌های محبوس‌شده در یک تیر یک‌سرگیردار اوایلر-برنولی، برای هدایت سیال به کار گرفته شده است. این مدل به طور عمومی در بسیاری از پژوهش‌ها به عنوان عملگر رباتیکی نرم مدل‌سازی و تحلیل شده است. شکل ۲. نمای کلی عملگر که در نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی شده است را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۲ عملگر نرم با کانال‌های سیال

در هر قسمت از این عملگر، کانال‌های سیال به صورت موازی و در جهت عرض عملگر تعبیه شده‌اند. با اعمال فشار سیال، عملگر دچار کشش و فشار می‌شود و تغییر شکل را به همراه دارد. یکی از چالش‌های جدی در این عملگرها انسداد کانال‌های آن است؛ زیرا معمولاً دارای کانال‌های ظریفی هستند که احتمال انسداد را بالا می‌برند. از این رو در پژوهش حاضر سعی شده در عین بالا بردن چگالی کانال‌های سیال در طول عملگر، بیشترین قطر کانال را برای آن‌ها در نظر گرفت. این امر علاوه بر آسان‌تر شدن پروسه ساخت کانال‌ها احتمال بروز مشکل انسداد را تا حد امکان کاهش می‌دهد. از طرفی چیدمان عرضی و بالا بردن چگالی کانال‌ها در طول عملگر باعث بهبود عملکرد آن می‌شود. اگر کانال‌ها در راستای طول عملگر تعبیه می‌شدند، تعداد آن‌ها کاهش یافته و قابلیت کنترل عملگر محدودتر می‌شد. یکی دیگر از ویژگی‌های قابل توجه در این عملگرها امکان اتصال آن‌ها به یکدیگر است، با اتصال آن‌ها به صورت سری می‌توان مانورپذیری ربات را تا حد چشم‌گیری افزایش داد؛ زیرا می‌توان هر یک از

عملگرها را به طور جداگانه کنترل کرد و به مانورپذیری پیچیده‌تری دست یافت. در سال ۲۰۱۵ پلی‌گرینوس^۱ و همکاران سه سطح با مقاطع مستطیلی، دایروی و نیم‌دایره‌ای را برای کانال‌های این نوع عملگرها مورد بررسی قرار دادند و نهایتاً در بین این سطوح مقطع، سطح مقطع نیم‌دایره‌ای بهترین عملکرد را در بین این سه داشت بدان معنا که تحت فشار ورودی برابر این سطح مقطع بیشترین جابه‌جایی را مهیا ساخت [۴۱]. از این رو، در این پژوهش نیز از سطح مقطع نیم‌دایره استفاده شده است.

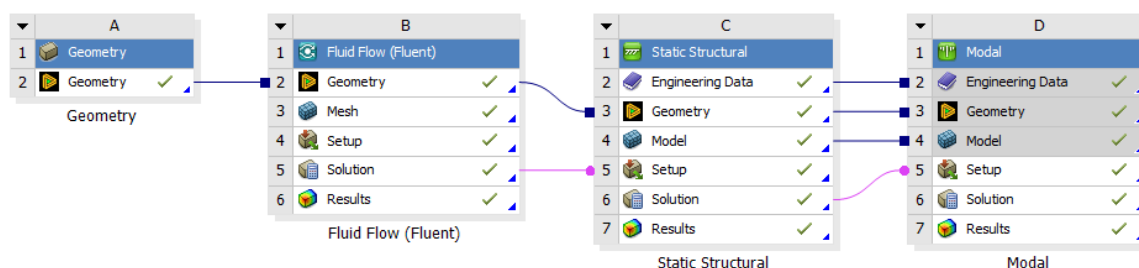
۳- نتایج

در این بخش به کمک نرم‌افزار انسیس به تحلیل استاتیکی و دینامیکی یک تیر یک‌سرگیردار نرم، با رفتار غیرخطی تحت اثر فشار سیال ورودی پرداخته شده است. در ابتدا توزیع فشار در طول عملگر در دامنه زمانی به‌دست آمده، سپس به ترتیب تغییر شکل‌ها و فرکانس‌های طبیعی سیستم استخراج شده است. در ادامه برای نشان دادن دقت این روش، اعتبارسنجی با پژوهش دیگری در سال ۲۰۲۲ که این مسئله را به صورت عددی و نیمه‌تحلیلی مورد بررسی قرار داده انجام شده است.

۳-۱- حل مسئله و بررسی نتایج

به‌منظور بررسی رفتار دینامیکی و استاتیکی عملگر نرم سیالاتی پس از مدل‌سازی عملگر در فضای جنومتری^۲ نرم‌افزار انسیس، از محیط فلوئنت به منظور شبکه‌بندی عملگر نرم، اعمال شرایط مرزی و اولیه استفاده شده است. در شبکه‌بندی مسئله از مش شش‌وجهی با تعداد ۱۶۲۶۹۰۸ گره و ۴۷۱۷۵۴۴ المان بهره‌برده شده است؛ تا با توجه به مش‌بندی دقیق، همگرایی پاسخ‌ها حاصل شوند. دلیل استفاده از این نوع شبکه‌بندی، استفاده این نوع مش در پژوهش‌های مشابه می‌باشد [۳۶]. شکل‌های ۳ و ۴. به ترتیب نمای کلی مراحل مدل‌سازی و تحلیل سیالاتی، استاتیکی و ارتعاشاتی عملگر و کیفیت شبکه‌بندی و نوع مش‌ها را به نمایش می‌گذارد.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای هندسی و همچنین پارامترهای مکانیکی عملگر سیالاتی نرم به‌کار برده شده در پژوهش را نشان می‌دهد. این مقادیر عیناً مشابه پژوهش [۴۰] در نظر گرفته شده تا دقت روش نرم‌افزاری به وضوح مشخص باشد.



شکل ۳ مراحل حل مسئله در نرم‌افزار انسیس



شکل ۴ کیفیت و نوع مش عملگر

^۱ Polygerinos

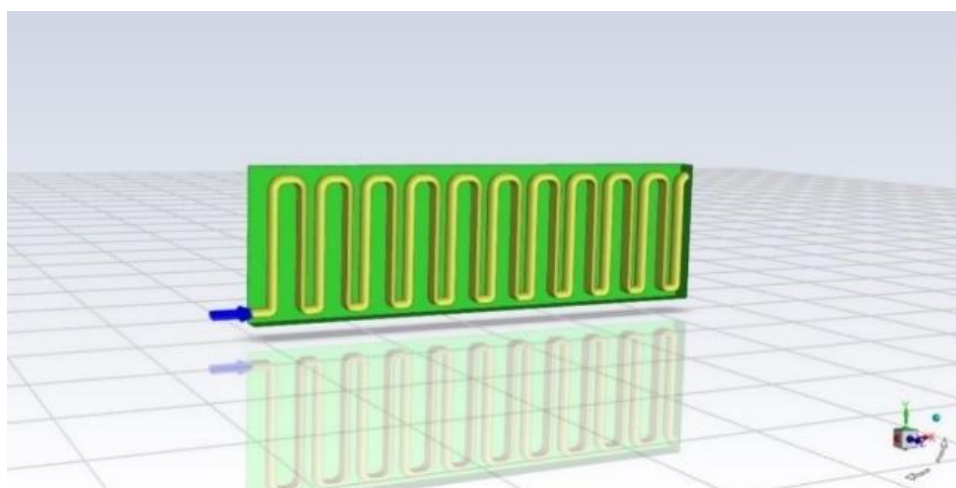
^۲ Geometry

جدول ۱ مقادیر پارامترهای هندسی و مکانیکی عملگر

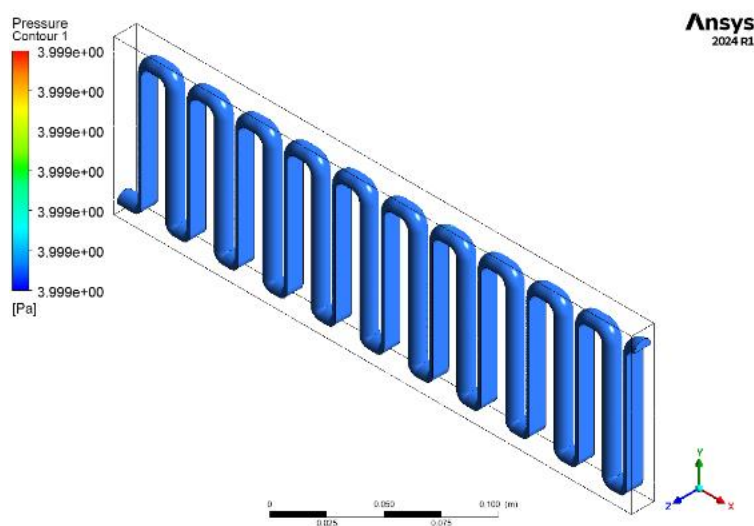
Value	Parameter	Value	Parameter
۳۲۰	$L (mm)$	۸۰	$l_f (mm)$
۱۱۰۰	$\rho (kg/m^3)$	۲	$E (KPa)$
۱۰۰۰	$\rho_f (kg/m^3)$	۰/۰۱۳۰۷	$\mu_f (kg/m.s)$
۹۰	$b_s (mm)$	۴	$p_a (Pa)$
۱۲	$h_s (mm)$	۶	$z (mm)$
۳۲۵۰	$l (mm)$	۵	$r_c (mm)$

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در مدل را نشان می‌دهد. در این جدول، L طول دم، l طول کل کانال، l_f طول هر بخش از کانال سیال، b_s عرض عملگر، h_s ضخامت عملگر، r_c شعاع کانال، z فاصله مرکز کانال از محور خنثی، E مدول یانگ، ρ و ρ_f به ترتیب چگالی جامد و سیال، μ_f لزجت دینامیکی سیال و p_a دامنه فشار ورودی هستند.

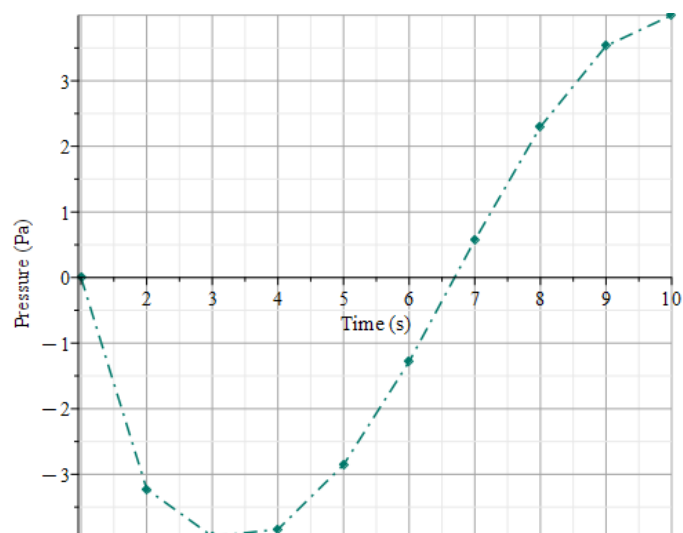
شکل ۵. نمای کلی عملگر نرم سیالاتی و همچنین محل ورود فشار سیال غیرقابل تراکم را در محیط فلوئنت نرم افزار انسیس نشان می‌دهد. سیال وارد شده به سیستم، در کانال‌های سیال تعبیه شده در طول تیر توزیع می‌یابد. در حل عددی، پس از شبکه بندی و اعمال شرایط مرزی عملگر به عنوان تیر یک سر گیردار، تابع فشار ورودی مطابق رابطه (۱۰) به کانال‌های سیال عملگر اعمال و توزیع فشار ناشی از این تابع در محیط فلوئنت نرم افزار انسیس شبیه سازی و حاصل شد. از نتایج این قسمت به عنوان ورودی محیط استراکچر به کمک ابزار FSI نرم افزار استفاده شد تا تحت توزیع فشار بدست آمده در مرحله قبل مقادیر جابه جایی مشخص شود. روند حل بصورت تکراری انجام شده است و مقدار باقی ماند مجاز 10^{-6} با گام زمانی ۱ ثانیه و ۵۰ تکرار در هر حل در نظر گرفته شده است. در این پژوهش در دامنه زمانی ۱۰ ثانیه و با دامنه فشار ۴ پاسکال تحلیل انجام شده است. همان طور که انتظار می‌رود باتوجه به تابع فشار ورودی (رابطه ۱۰)، تغییرات فشار در طول تیر اثر بسیار کمی از موقعیت کانال در جهت‌های مختصات می‌گیرد و به وضوح تابع زمان می‌باشد. شکل‌های ۶، ۷ و ۸. به ترتیب توزیع فشار را در طول عملگر، تغییرات فشار در بازه زمانی و مقدار جابه جایی تحت فشار سیال توزیع یافته را نشان می‌دهند. پس از اطمینان از نتایج نحوه و میزان توزیع فشار در طول عملگر سپس به تحلیل استاتیکی آن پرداخته و تغییر شکل‌های بزرگ حاصل از توزیع فشار سیال در طول تیر حاصل شده است. شکل ۹. میزان حداکثر تغییر شکل عملگر را تحت تاثیر فشار سیال در ازای تعداد کانال‌های مختلف و فشار ورودی به عملگر را به نمایش می‌گذارد.



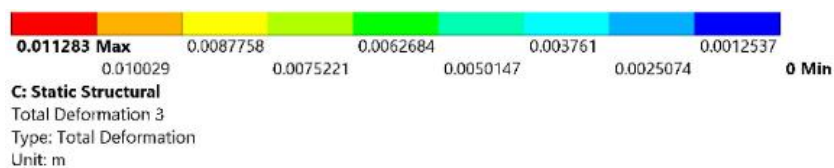
شکل ۵ محل فشار ورودی به عملگر



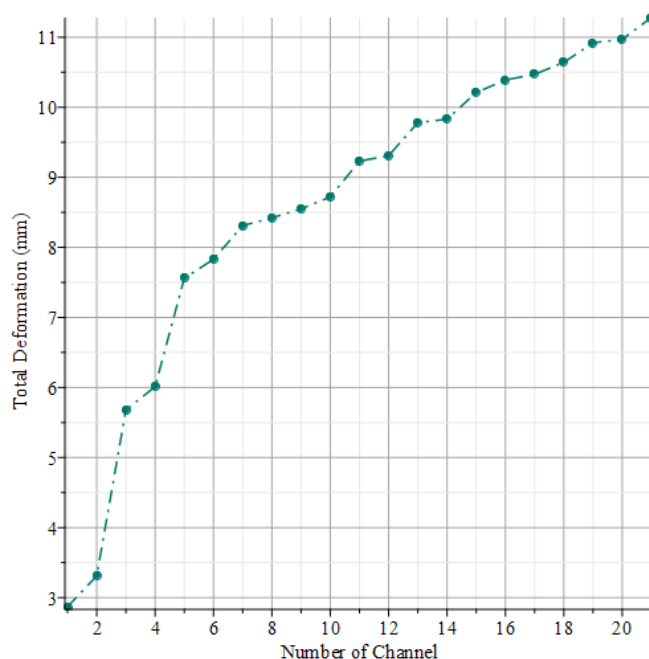
شکل ۶ توزیع فشار ثابته دهم در طول عملکرد



شکل ۷ توزیع فشار در دامنه زمانی



شکل ۸ میزان جابه‌جایی ناشی از فشار سیال

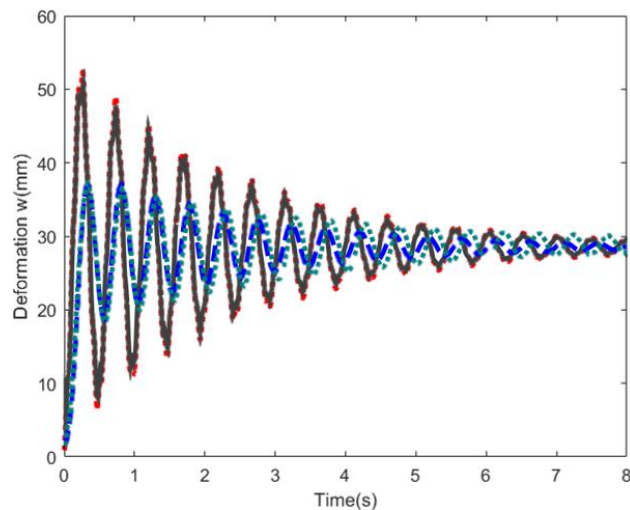


شکل ۹ جابه‌جایی در ازای تعداد کانال

در ادامه به تحلیل ارتعاشاتی سیستم با توجه به شرایط مرزی و نیروی اعمال شده در قسمت‌های قبل بر روی عملگر پرداخته شده است. در این قسمت نیز ابتدا شرایط مرزی را برای حصول فرکانس‌های طبیعی سیستم معرفی سپس فرکانس‌های طبیعی آن استخراج شده است. در ادامه نتایج حاصل از اعتبارسنجی فرکانس‌های طبیعی عملگر سیالاتی نرم با پژوهش [۳۱] بحث شده است. همبستگی بالای خروجی‌های تحلیلی و نرم‌افزاری این دو پژوهش نشان از دقت بالای روش نرم‌افزاری و امکان بهره‌گرفتن از آن به منظور تحلیل رفتار ارتعاشاتی عملگرهای نرم مشابه را دارد.

۳-۲- اعتبارسنجی

با وجود این که نرم‌افزار انسیس در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد توجه محققین در زمینه تقابل ساختارهای چند-ماهیتی قرار گرفته است و از کامپیوترها به طور گسترده در حل مسائل پیچیده و کاربردی مهندسی استفاده می‌شود، همواره نیاز به یک اعتبارسنجی دقیق برای حل‌های کامپیوتری احساس می‌شود؛ چرا که ممکن است به دلیل اشتباهات جزئی یا فرضیاتی که در شرایط مرزی در طول حل استفاده می‌شود، خطای نرم‌افزاری و یا حتی خطاهای ناشی از دقت مش‌بندی، پاسخ تفاوت زیادی با واقعیت داشته باشد. از طرفی به علت کاربرد روزافزون و نوپا بودن این زمینه همواره سعی می‌شود تا اعتبارسنجی با یکی از پژوهش‌هایی که در سال‌های اخیر صورت گرفته انجام پذیرد. از این رو در این پژوهش پاسخ حل نرم‌افزاری با حل عددی در پژوهش‌های [۳۷-۴۰] که در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۵ صورت گرفته، انجام شده است. در این پژوهش‌ها روشی نیمه‌تحلیلی برای حل این نوع مسائل ارائه شده است تا علاوه بر کاهش چشم‌گیر حجم محاسبات و صرفه‌جویی در زمان، پاسخ‌هایی با دقت بالا برای این دسته از مسائل حاصل شود. به منظور بررسی دقیق روش نرم‌افزاری تمامی خواص هندسی و مکانیکی در پژوهش‌ها تطابق دارد. ابتدا به دلیل عدم دسترسی به تمام داده‌های مورد نیاز جهت اعتبار سنجی پژوهش آزمایشگاهی [۴۲] نتایج تجربی با حل تحلیل اعتبار سنجی شده و سپس نتایج نرم‌افزاری با حل تحلیلی مدل پژوهش حاضر اعتبار سنجی شده است. شکل ۱۰ نتایج اعتبار سنجی حل تحلیل با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در [۴۲] را به نشان می‌دهد. جدول ۲. به مقایسه فرکانس‌های طبیعی سیستم در [۴۰] و پژوهش حاضر می‌پردازد.

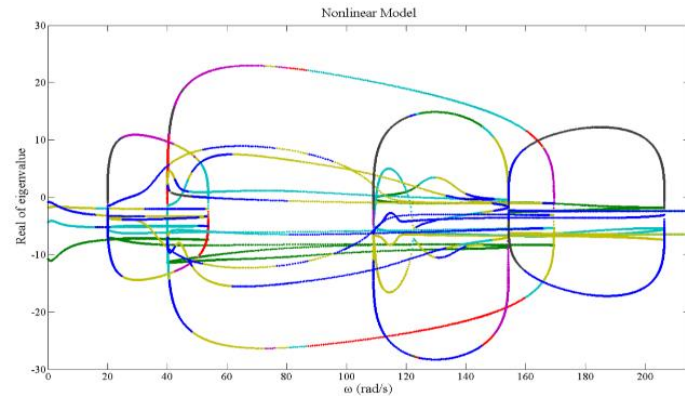


شکل ۱۰ اعتبارسنجی داده‌های تجربی. خط مشکی حل تحلیلی پژوهش [۴۲]، خط چین قرمز اعتبار سنجی تحلیلی انجام شده، خط چین سبز و آبی حل عددی و نتایج تجربی [۴۲].

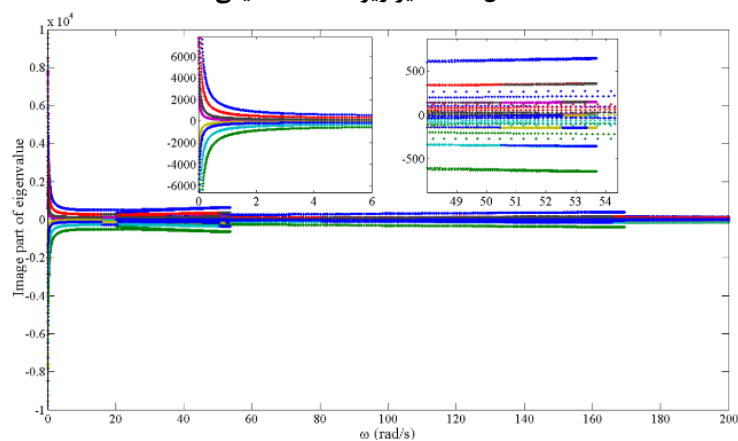
جدول ۲ مقایسه فرکانس‌های طبیعی

ω_3	ω_2	ω_1	Number of mode shapes	Method
۱۵۴/۲	۵۵/۸۹	۸/۹۹	*	Numerical
۱۵۴/۲	۵۵/۱۰	۸/۷۹	۳	Analytical [40]

اختلاف دو روش در فرکانس طبیعی اول ۲ درصد، فرکانس طبیعی دوم ۱/۴ درصد و در فرکانس طبیعی سوم تنها ۰/۳ درصد می‌باشد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ بررسی مقادیر ویژه مدل‌سازی غیرخطی را نشان می‌دهند [۴۰].

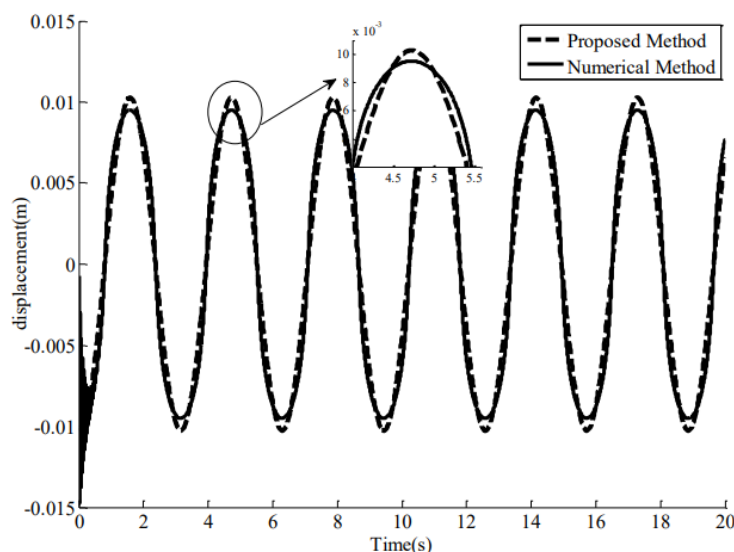


شکل ۱۱ مقادیر ویژه قسمت حقیقی



شکل ۱۲ مقادیر ویژه قسمت موهومی

در ادامه به منظور اطمینان از نتایج تحلیل استاتیکی در ثانیه ۱۰ام تحت تابع فشار ورودی (رابطه ۱۰)، خروجی مدل تحلیل شده به کمک نرم افزار انسیس با حل تحلیلی [۴۰] که توسط نتایج آزمایشگاهی [۴۲] اعتبارسنجی شد (شکل ۱۰) بررسی می شود. شکل ۱۳ نتایج حل تحلیلی استاتیکی عملگر را به نمایش می گذارد که منطبق با نتایج نرم افزاری گزارش شده در شکل ۸ می باشد.



شکل ۱۳ مقدار جابه جایی عملگر به روش نیمه تحلیلی [۴۰]

در گام انتهایی پس از اطمینان از نتایج تحلیل استاتیکی و ارتعاشاتی، با به کارگیری رویکرد پیشنهادی استفاده از فرکانس طبیعی در کاربردهای واقعی به بررسی امکان استفاده از این روش در ربات ماهی پرداخته شده است. همانطور که از شکل ۷ مشخص است، تابع فشار ورودی به عملگر رفتاری سینوسی دارد. این توزیع فشار قادر است جابه جایی عملگر را به صورت دو

جهته فراهم آورد. از جابه جایی حاصل شده در عملگر تحت فشار ورودی می توان مطابق رابطه لایتهیل

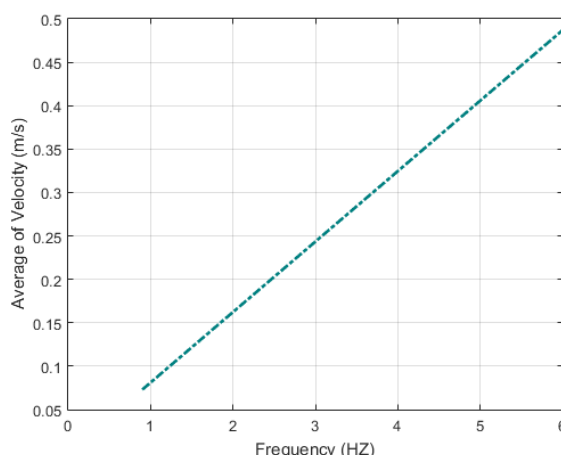
$$U = \sqrt{\frac{M(\frac{\partial w}{\partial t})^2}{M(\frac{\partial w}{\partial x})^2 + \rho_w A(L) C_D}}$$

نیروی پیشران مورد نیاز و سرعت را برای ربات ماهی را بدست آورد. در این رابطه M وزن ربات، ρ_w چگالی سیال، C_D ضریب پسا، $A(L)$ سطح مقطع نامی و w مقدار جابه جایی دم ربات می باشند. جدول ۳ مقادیر مفروض فوق را برای ربات در نظر گرفته شده به نمایش می گذارد.

جدول ۳ پارامترهای ربات ماهی

Value	Parameter
۰/۰۱۱	$A(L) (m^2)$
۰/۳۱۱	$M (Kg)$
۲۵	$L_f (mm)$
۱۰۰۰	$\rho_w (Kg/m^3)$
۰/۲۹۵	C_D

با جایگذاری مقادیر جدول ۳ در رابطه لایتهیل مقادیر میانگین سرعت بر حسب فرکانس دم زدن را می توان به صورت شکل ۱۳ یافت.



شکل ۱۳ مقدار سرعت ربات بر حسب فرکانس عملگر

با توجه به این که مدت زمان رسیدن به فرکانس دم زدن ۶ هرتز مطابق رابطه (۱۱) برابر با ۸ ثانیه می‌باشد، عدد استرومال $St = \frac{w\omega}{U}$ مربوطه که نشان‌دهنده مقدار نزدیکی رفتار ربات به ماهی بیولوژیکی می‌باشد در این فرکانس و سرعت برابر ۰/۳۱ می‌باشد که در محدوده ماهی بیولوژیکی یعنی ۰/۲۵ الی ۰/۴ قرار گرفته است [۴۳].

۴- بحث و بررسی نتایج

در این مقاله رفتار دینامیکی و استاتیکی یک عملگر نرم سیالاتی به کمک نرم‌افزار اجزای محدود انسیس مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج تغییر شکل عملگر تحت اثر نیروی سیال بررسی شد. این روش نسبت به روشهای دیگری نظیر نیوتن-اولر و لاگرانژ دارای پاسخهایی بسیار دقیق‌تر می‌باشد؛ چرا که شرایط مرزی مدل شده در این روش تطابق بسیار بیشتری با واقعیت، نسبت به فرضیات این روش‌ها را دارا می‌باشد. همچنین این روش به اثرات افت هد سیال در کانال‌ها نیز می‌پردازد که روش‌های پیشین این امر را به دلیل حجم بسیار بالای محاسبات در نظر نمی‌گیرند و از آن صرف‌نظر می‌کنند.

رویکرد اصلی این تحقیق بهره گرفتن از پدیده رزونانس طبیعی به منظور نزدیک کردن رفتار دینامیکی عملگر سیالاتی نرم به کاربردهای واقعی آن نظیر دم ربات ماهی بوده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که فرکانس طبیعی اول سیستم ۸/۹۹ هرتز می‌باشد. از طرفی با توجه به محدوده عدد استرومال، به منظور رسیدن به رفتار ماهی بیولوژیکی فرکانس بال زدن دم باید حداقل ۶ هرتز باشد که این امر از شروع ثانیه هشتم رخ می‌دهد. در صورتی که با نزدیک کردن فرکانس کاری سیستم به فرکانس طبیعی آن نه تنها رفتار سیستم از شروع حرکت مشابه ماهی واقعی خواهد بود بلکه افزایش دامنه نوسان در این حالت نیروی پیشران بیشتری نیز تولید می‌کند.

از سویی دیگر با دقت به جدول ۲ می‌توان دریافت نتایج حاصل از روش تحلیلی و عددی همبستگی بسیار قابل قبولی داشتند از این رو می‌توان نرم‌افزار انسیس را به عنوان یک ابزار مفید در تحلیل عملگرهای نرم سیالاتی به حساب آورد. همانطور که بیان شد استفاده از ابزار کامپیوتر نه تنها باعث صرفه‌جویی در زمان می‌شود، بلکه پاسخهایی با قابلیت اعتماد بیشتر را فراهم می‌آورد؛ زیرا امکان وجود خطا در روند محاسبات به حداقل می‌رسد. به کار بردن فرضیات نزدیک‌تری به واقعیت علاوه بر این که به بهینه شدن پاسخ کمک می‌کنند، از خطاهای ناشی از فرمول‌بندی پیچیده در روش‌های عددی نیز جلوگیری می‌نمایند. بنابراین استفاده از کامپیوترها به خصوص در کاربردهای صنعتی که از دست دادن کسری از زمان باعث کاهش میزان سودآوری شده بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به سینوسی بودن تغییر شکل به علت سینوسی بودن تابع فشار سیال ورودی به عملگر می‌توان دریافت که تنها ابزار کنترل این نوع عملگرها فشار ورودی به سیستم می‌باشد. بنابراین بهتر است که تابع فشار ورودی نه تنها تابع زمان بلکه تابع مکان هم باشد تا کنترل عملگر به بهترین نحو صورت پذیرد؛ زیرا تغییر شکل در این نوع عملگرها برخلاف عملگرهای سنتی در طول لینک‌ها اتفاق می‌افتد و کنترل لینک‌ها نیازمند کنترل دقیق فشار ورودی می‌باشد.

در ادامه پیشنهاد می‌شود، با توجه به اهمیت بسیار بالای کنترل دقیق ربات‌های نرم، به علت کاربردهای خاص این دسته از

ربات‌ها به کنترل برخط آن‌ها پرداخته شود. همچنین می‌توان بر روی بهینه‌سازی پارامترهای هندسی نظیر ابعاد کانال‌های سیال و یا به‌روزرسانی خواص مکانیکی سیستم از روش‌هایی نظیر الگوریتم ژنتیک برای افزایش بازدهی سیستم در کاربردهای واقعی نظیر دم ربات ماهی یا بال پرنده استفاده نمود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک عملگر نرم سیالی متشکل از شبکه‌ای از کانال‌های تعبیه‌شده در بدنه‌ی الاستیک، به‌عنوان یک عضله‌ی مصنوعی نرم و پیوسته مورد بررسی قرار گرفت. با اعمال فشار سیال، حفره‌های داخلی منبسط شده و تغییرشکل موردنظر در ساختار ایجاد می‌شود. با توجه به ماهیت غیرخطی مسئله و معادلات حرکت حاکم، دستیابی به یک حل دقیق و در عین حال کارآمد، چالش‌برانگیز است. از این‌رو، ابتدا توزیع فشار در طول عملگر در حوزه زمان محاسبه و سپس تغییرشکل‌ها و فرکانس‌های طبیعی سیستم استخراج شدند. برای ارزیابی دقت مدل، نتایج به‌دست‌آمده با نتایج یک مطالعه نیمه‌تحلیلی منتشرشده در سال ۲۰۲۲ مقایسه شد که تطابق مناسبی را نشان داد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر است معادلات حرکت غیرخطی را با دقت مناسب و هزینه محاسباتی پایین حل کند. افزون بر این، بهره‌گیری از پدیده تشدید باعث می‌شود عملگر از همان ابتدای حرکت، رفتاری نزدیک‌تر به شنای ماهی واقعی از خود نشان دهد. از یک سو نتایج نشان می‌دهد هنگامی که فرکانس بال زدن دم ربات ماهی به ۶ هرتز می‌رسد سرعت آن ۰/۴۷ متر بر ثانیه می‌باشد و عدد استروهاال متناظر آن ۰/۳۱ می‌باشد. از طرفی دیگر مطابق با این عدد هنگامی رفتار سیستم مطابق با رفتار ماهی واقعی می‌باشد که بزرگی آن در محدوده ۰/۲۵ الی ۰/۴ قرار گیرد. با توجه به اینکه مطالعات پیشین [۳۶] نشان می‌دهند فرکانس بال زدن دم پس از ۸ ثانیه به ۶ هرتز می‌رسد و عدد استروهاال با گذشت این زمان به محدوده ماهی بیولوژیکی می‌رسد، می‌توان با یکسان سازی فرکانس تحریک در رابطه (۱۰) با فرکانس طبیعی سیستم که در جدول ۲ گزارش شده است از ابتدا شروع به حرکت رفتاری مشابه با ماهی واقعی را شاهد باشیم.

Authorship Contribution Statement

Melika Mohammadi



Biography: She is pursuing B.Sc. of mechanical engineering at Ferdowsi University of Mashhad (FUM), and her foremost research interests are control and robotics.

Contribution Statement: Analysis, Writing – original draft, Review & editing.

Ahmad Karimi



Biography: Received his B.S., degree in 2020. He is a researcher with a Master's degree from Shahrood University of Technology. His expertise lies in bio-inspired robotics and FEM, and he is currently part of the dynamics and vibration team at Kavosh Sanat Toos Company (KSTC).

Contribution Statement: Simulation, Validation, Analysis & Writing – original draft.

Dr. Mahdi Bamdad



Biography: Received his B.S., M.S. degrees in mechanical engineering and Ph.D. degree in robotics. He is currently with the Computer Science and Engineering School at UNSW Sydney, Australia after he was the head of the mechatronics group at the School of Mechanical and Mechatronics Engineering in the Shahrood University of Technology, Iran. His research, bridging industrial expertise with robotics and mechatronics, has led to his recognition as an IEEE Senior Member and an Honorary Life Member of the Iranian Society of Engineering Education. His research interests are in the areas of design and optimization of robotic systems. He has published more than 50 articles in international journals and conference proceedings.

Contribution Statement: Supervision, Conceptualization and Methodology.

Dr. Seyyed Ali Sina



Biography: Seyyed Ali Sina received his Ph.D. in aerospace engineering from Sharif University of Technology (SUT) in 2013, Iran. He gained his master degree in aerospace structures from SUT in 2008. Currently, He is an assistant professor of the department of mechanical engineering of Shahrood University of Technology, Iran. His research interests are vibration, rotor dynamics and aeroelasticity.

Contribution Statement: Supervision, Review & editing.

۵- مراجع

- [1] Pourghasemi Hanza S, Ghafarirad H. Theoretical and Experimental Behavior Analysis of Continuous Soft Robots Consisting of Fiber-Reinforced Actuators. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2022;12(5):161-73.
- [2] Bamdad M, Mardany A. Design and analysis of a novel cable-driven backbone for continuum robots. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(3).
- [3] Haji BJ, Bamdad M. Nonlinear dynamic and stability analysis of soft fluidic robotic system with reduced computational cost. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2023;30(23):4862-81.
- [4] Bamdad M, Mardany A. Motion analysis of continuum robots structures with cable actuation. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(14).
- [5] Zhang YF, Zhang N, Hingorani H, Ding N, Wang D, Yuan C, Zhang B, Gu G, Ge Q. Fast-response, stiffness-tunable soft actuator by hybrid multimaterial 3D printing. *Advanced Functional Materials*. 2019;15(15):1806698.
- [6] Walker ID. Continuous backbone “continuum” robot manipulators. *International Scholarly Research Notices*. 2013;2013(1):726506.

- [7] Akbari, S., Namdar Ghelati, M.H., Ghaffari Rad, H., Rezaei, S.M., 2022. Modeling of soft pneumatic bending actuators under free condition and environmental interaction. Iranian Conference on Soft Robotics, Tehran, Iran.
- [8] Bamdad M, Karimi A. An efficient technique in dynamic modeling and analysis of soft fluidic actuator. Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2024;52(7):3925-50.
- [9] Pai MP. The canonical problem of the fluid-conveying pipe and radiation of the knowledge gained to other dynamics problems across applied mechanics. Journal of Sound and Vibration. 2008;310(3):462-92.
- [10] El-Atab N, Mishra RB, Al-Modaf F, Joharji L, Alsharif AA, Alamoudi H, Diaz M, Qaiser N, Hussain MM. Soft actuators for soft robotic applications: A review. Advanced Intelligent Systems. 2020;(10):2000128.
- [11] De Smet E, Migliorini L, Milana E, Milani P, Gorissen B. Electropneumatic Oscillators Using Nonlinear Inflatables. Advanced Intelligent Systems. 2025;(6):2400695.
- [12] Xavier MS, Fleming AJ, Yong YK. Finite element modeling of soft fluidic actuators: Overview and recent developments. Advanced Intelligent Systems. 2021;(2):2000187.
- [13] Blanc L, Delchambre A, Lambert P. Flexible medical devices: Review of controllable stiffness solutions. In Actuators 2017; 6(3):23. MDPI.
- [14] Chirikjian GS. Hyper-redundant manipulator dynamics: A continuum approximation. Advanced Robotics. 1994;9(3):217-43.
- [15] Mochiyama H. Hyper-flexible robotic manipulators. In IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2005:41-46. IEEE.
- [16] Renda F, Cianchetti M, Girelli M, Arienti A, Laschi C. A 3D steady-state model of a tendon-driven continuum soft manipulator inspired by the octopus arm. Bioinspiration & biomimetics. 2012;7(2):025006.
- [17] Tatlicioglu E, Walker ID, Dawson DM. Dynamic modelling for planar extensible continuum robot manipulators. In Proceedings 2007 IEEE international conference on robotics and automation 2007 (pp. 1357-1362). IEEE.
- [18] Gravagne IA, Rahn CD, Walker ID. Good vibrations: a vibration damping setpoint controller for continuum robots. In Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164) 2001 (Vol. 4, pp. 3877-3884). IEEE.
- [19] Liu X, Cai GP, Peng FJ, Zhang H, Lv LL. Nonlinear vibration analysis of a membrane based on large deflection theory. Journal of Vibration and Control. 2018;(12):2418-29.
- [20] Jeong S, Yoo HH. Flexibility modeling of a beam undergoing large deflection using the assumed mode method. International Journal of Mechanical Sciences. 2017;133:611-8.
- [21] Bamdad M, Bahri MM. Kinematics and manipulability analysis of a highly articulated soft robotic manipulator. Robotica. 2019;(5):868-82.
- [22] Thieffry M, Kruszewski A, Duriez C, Guerra TM. Control design for soft robots based on reduced-order model. IEEE Robotics and Automation Letters. 2018;4(1):25-32.
- [23] Sadati SH, Naghibi SE, Shiva A, Michael B, Renson L, Howard M, Rucker CD, Althoefer K, Nanayakkara T, Zschaler S, Bergeles C. TMTDyn: A Matlab package for modeling and control of hybrid rigid-continuum robots based on discretized lumped systems and reduced-order models. The International Journal of Robotics Research. 2021;(1):296-347.
- [24] Zheng T, Branson DT, Kang R, Cianchetti M, Guglielmino E, Follador M, Medrano-Cerda GA, Godage IS, Caldwell DG. Dynamic continuum arm model for use with underwater robotic manipulators inspired by octopus vulgaris. In 2012 IEEE international conference on robotics and automation 2012:5289-5294. IEEE.

- [25] Renda F, Cacucciolo V, Dias J, Seneviratne L. Discrete Cosserat approach for soft robot dynamics: A new piece-wise constant strain model with torsion and shears. In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 2016:5495-5502. IEEE.
- [26] Rosset S, Shea HR. Flexible and stretchable electrodes for dielectric elastomer actuators. *Applied Physics A*. 2013;110(2):281-307.
- [27] Karimi, A., Rahimzadeh, M., 2020. Updating the dynamic model of a flying-wing UAV using genetic algorithm in ANSYS. National Conference on Computational and Experimental Mechanics, Tehran, Iran.
- [28] Habibnejad Kavarim, M., 2001. Robotics software package for autonomous mobile robots. Tehran, Iran.
- [29] Hao M, Wang Y, Zhu Z, He Q, Zhu D, Luo M. A compact review of IPMC as soft actuator and sensor: current trends, challenges, and potential solutions from our recent work. *Frontiers in Robotics and AI*. 2019;6:129.
- [30] Wang W, Cheng X, Zhang M, Gong W, Cui H. Effect of the deformation of porous materials on the performance of aerostatic bearings by fluid-solid interaction method. *Tribology International*. 2020;150:106391.
- [31] Moon DH, Shin SH, Na JB, Han SY. Fluid-structure interaction based on meshless local Petrov-Galerkin method for worm soft robot analysis. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2020;(3):727-42.
- [32] Moon DH, Shin SH, Na JB, Han SY. Fluid-structure interaction based on meshless local Petrov-Galerkin method for worm soft robot analysis. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2020;(3):727-42.
- [33] Luo H, Scholp A, Jiang JJ. The finite element simulation of the upper airway of patients with moderate and severe obstructive sleep apnea hypopnea syndrome. *BioMed Research International*. 2017;2017(1):7058519.
- [34] Zhang C. Simulation analysis of bionic robot fish based on MFC materials. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019;2019(1):2720873.
- [35] Fouladi K, Coughlin DJ. CFD investigation of trout-like configuration holding station near an obstruction. *Fluids*. 2021;6(6):204.
- [36] Bamdad M, Karimi A, Sina S, Cruz F. Modeling and Dynamic Analysis of Fish Robot with Soft Fluidic Actuation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2024;111(1):2.
- [37] Karimi A, Bamdad M, Sina SA. A Bio-Mimetic Three-Dimensional Design and Modeling of a Fish-Like Robot. In 2022 10th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM) 2022;236-241. IEEE.
- [38] Janizadeh Haji B, Bamdad M. Steady-state dynamic analysis of a nonlinear fluidic soft actuator. *Journal of Vibration and Control*. 2023;7(8):1606-25.
- [39] Rao, S.S., 2019. *Vibration of Continuous Systems*. John Wiley & Sons.
- [40] Haji BJ, Bamdad M. Nonlinear modeling and analysis of a novel robot fish with compliant fluidic actuator as a tail. *Journal of Bionic Engineering*. 2022;3:629-42.
- [41] Polygerinos P, Wang Z, Overvelde JT, Galloway KC, Wood RJ, Bertoldi K, Walsh CJ. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators. *IEEE Transactions on Robotics*. 2015;31(3):778-89.
- [42] Gamus, B., Salem, L., Ben-Haim, E., Gat, A.D. and Or, Y., 2017. Interaction between inertia, viscosity, and elasticity in soft robotic actuator with fluidic network. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(1):81-90.
- [43] Shintake J, Cacucciolo V, Shea H, Floreano D. Soft biomimetic fish robot made of dielectric elastomer actuators. *Soft robotics*. 2018;5(4):466-74.