



Design and Simulation of an Adaptive Neuro-controller for a Wire-driven Flexible Arm Robot

Mona Tahmasebi^{1*}, Mohammad Gohari²

¹Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension, Organization (AREEO), Arak, Iran.

²Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 10.09.2022

Revised: 01.12.2023

Accepted: 01.31.2023

Keyword:

Wire-driven Flexible Robot Arm
Kinematic Model
Dynamic Model
Inverse Dynamic
PID Controller
Adaptive Neuro-controller

*Corresponding Author:

Mona Tahmasebi

Email:

Tahmasebi.mona@gmail.com

ABSTRACT

Nowadays, robots are widely employed and utilized in many operations and occupations. They are not just luxury devices or entertainment tools, but used to reduce costs and increase the accuracy of functions such as robotic surgery or agricultural harvesting in countries with high labor costs. One type of robot is a wire-driven robot developed recently for industrial inspections, laparoscopic surgeries, and crop harvesting. This type of robot has a limited range of payload support and accuracy in positioning, but has a simple structure and adaptability by working space which has attracted the attention of researchers. The current paper introduces a wire-driven flexible robot where its kinematic and dynamic models are presented based on the Euler-Bernoulli beam theory. In regards the stated models, a proportional-derivative-integrator controller (PID) was employed for this dynamic system. In addition, an adaptive neuro-controller with two hidden layers and five neurons was established. Various functions such as step, ramp, sinusoidal, random, and square signals were exposed to both controllers as inputs to study their stability and accuracy. The adaptive neuro-controller responses were as good as the PID controller; however, in the case of random and sinusoidal inputs, it did not show better performance.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Recently robotics systems and manipulators have been employed in daily life and industry, particularly during a pandemic disaster. Three categories of robot arms are generated: continuum, discrete, and serpentine. Serial links and parallel robots are listed as discrete robots. They include several links and joints to provide motion in the desired workspace with definite payload and accuracy in positioning. They have a limited degree of freedom with large size. In contrast, continuum robots provide an infinite degree of freedom with compact size although their capacity in payload and accuracy is limited. Thus, they are proper for a confined environment. Nevertheless, their accuracy and payload capacity is not as much as rigid manipulators. Reports show that continuum robots are in the primary stage and it is an open area for researchers to develop for novel applications. Another kind of robot arm is a serpentine robot with greater rigidity but greater flexibility than discrete robots. They are applied in many different ways such as their use in laparoscopic surgery.

Wires and pulleys can be used as tendons which are flexible, lightweight, inexpensive, and strength for large tensile forces. The wire-driven mechanism is used by the robot arm and continuum robot. Building an effective continuum robot is still a challenge, and it is an open area for researchers to make enhanced robots for various purposes. On the other hand, artificial intelligent control methods were developed for robots and dynamic systems with a large range of variations in working conditions.

The present research aimed to present a simulation study on a wire-driven flexible robot based on governed kinematic and dynamic model, and design a generic controller based on them.

Methodology

First, the kinematic model of the WDFR was explained, and then the dynamic model established on beam theory was presented. In addition, the design of a generic controller for feedback control of WDFR was described. The performance of WDFR in positioning and tracking was assessed through a simulation study.

Kinematic model of WDFR

The structure of the proposed WDFR consisted of ten vertebrae with conical shapes. The vertebra as a segment of the kinematic chain was connected to other vertebrae. Four wires were passed through each vertebra. This chain was mounted to a base. By applying tension on each cable, bending occurred in the WDFR. The behaviour of WDFR was the same as a cantilever bar exposed to a bending moment. Therefore, by employing beam bending theory, the position of the end effector was reached with regard to the curvature created. Figure 2 shows the curvature radius of the cantilever bar as WDFR.

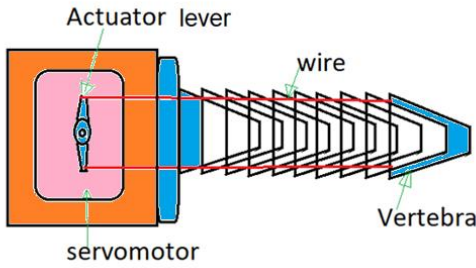


Figure 1. The WDFR components.

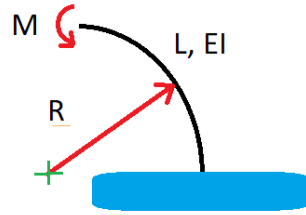


Figure 2. The curvature radius of a cantilever beam.

The location of the end effector is presented by P (x, y) in planar Cartesian space, and the radius of curvature is denoted by R. In reference to Figure 3, y can be reached by:

$$y = R - R \cos \alpha = R(1 - \cos \alpha) \tag{1}$$

And x is calculated by:

$$x = R \sin \alpha \tag{2}$$

where “ α ” is axe angle of created arc. Here, the curvature radius “R” is obtained by the bending moment as:

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \rightarrow R = \frac{EI}{M} \tag{3}$$

where E is the Young’s modulus and I is the second moment of area of the cantilever bar. To compute M, the dynamic model of WDFR must be presented based on the beam theory.

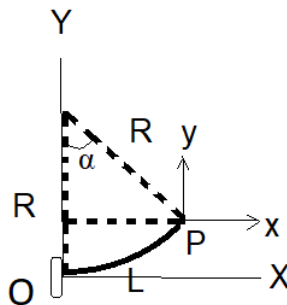


Figure 3. Position of end effector regards to bending.

Dynamic model of WDFR

In regards to the bended beam theory, the curvature radius can be acquired as:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M \quad (4)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (5)$$

On the other hand, the vertical deflection of the bended beam in its tip is calculated by:

$$y = \frac{ML^2}{2EI} \quad (6)$$

Thus, "y" is available:

$$y = \frac{FL^2}{2CAE} \quad (7)$$

Consequently, the dynamic model of the WDFR was developed in respect to the identified position from curvature radius and bending moment. The position of end effector and needed tension of the wire were presented and consequently the design of controller of the WDFR was carried out.

Simulation of WDFR

To study the accuracy and stability of the desired controller, simulation of the WDFR was conducted based on attained kinematic model and dynamic model. First, a block diagram was constructed in MATLAB/Simulink Software to simulate position of WDFR's end effector. Next, a block diagram was developed for the tendon actuator. Figure 4 exemplifies the closed loop diagram of the designed PID controller. The length of the WDFR was 18cm, and diameter of conical components was 3cm.

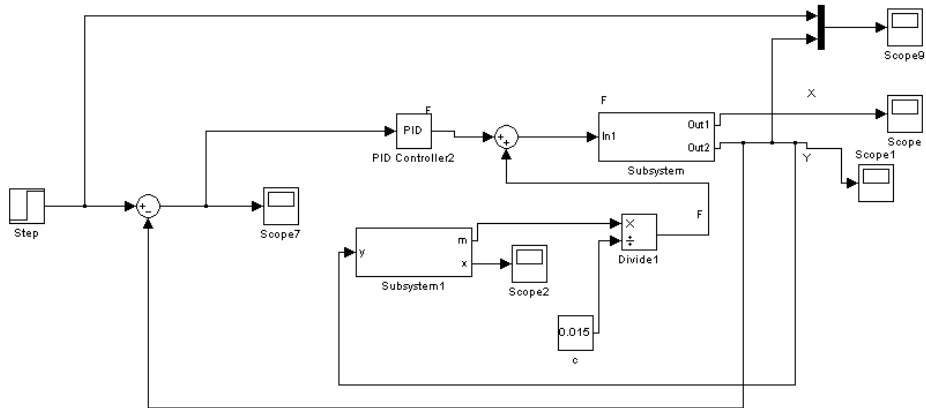


Figure 4. Block diagram of designed PID controller.

The subsystem included the dynamic model and subsystem 1 consisted of inverse dynamic used in controller. The step function and ramp function were applied in the system as desired values of end effector height. The output of simulated WDFR was reached to reduce error between actual output and desired output by tuning the PID. The PID coefficients were obtained as $K_p=700$, $K_i=10$, and $K_d=0.8$. The crude method was employed for PID tuning. Moreover, the random function was inserted to the WDFR controller because its variation was high, and the output of system could unveil robustness of controller in terms of stability and accuracy.

Results and discussion

The response of the WDFR was reached when the step function was applied to the manipulator. As can be observed in Figure 7, the closeness of output to desired input was very high. The error value was 0.01%. Moreover, the PID presented enhanced performance when a ramp function was considered as input. In this case, the error value obtained was 0.05%. Next, a random function was imported to the WDFR due to high variations in values. Similar to the mentioned input cases, the WDFR could follow trajectory with acceptable error and high accuracy. The error value was 0.03% as shown in Figure 8. Thus, accuracy of the WDFR implemented to the PID controller was properly acquired.

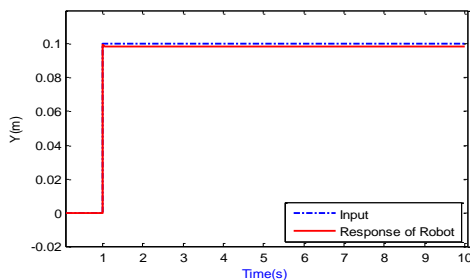


Figure 7. The WDFR response to step function.

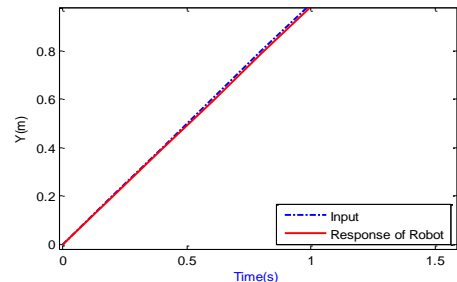


Figure 8. Convergence between WDFR response and ramp function as desired input.

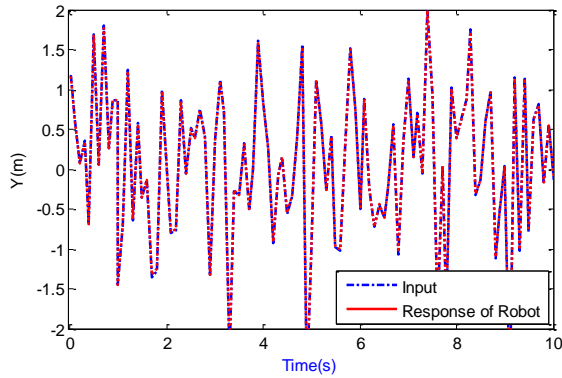


Figure 9. Correlation of WDFR output and random function.

Conclusion

Kinematic and Dynamic models of the WDFR were stated, and a simulation study conducted to evaluate its performance when exposed to different desired inputs. The designed PID for WDFR was tuned by crude method. The results demonstrated that the proposed PID provided proper control to the current WDFR in terms of accuracy with minimum error. Consequently, employing PID controller in this case was desired and low cost. In future research, based on this achievement, a test rig of WDFR will be introduced and used in various operations.

طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌گر تطبیقی شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای یک ربات انعطاف‌پذیر با محرک کابلی

منا طهماسبی^{*۱}، محمد گهری^۲

- ۱- استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران.
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

امروزه ربات‌ها کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند و در خیلی از کارها و مشاغل استفاده می‌شوند و دیگر به‌عنوان ابزارهای لوکس و یا سرگرم کننده نیستند بلکه جهت کاهش هزینه و یا افزایش دقت اجرا به‌کار می‌روند مانند: عمل‌های جراحی و یا برداشت محصولات کشاورزی در کشورهای با نیروی کار گران‌قیمت. یکی از انواع ربات‌ها، ربات‌های با محرک کابلی انعطاف‌پذیر هستند که اخیراً توسعه یافته‌اند تا در بازرسی‌های صنعتی، عمل جراحی لاپاراسکوپی و یا برداشت محصولات باغی استفاده شوند. این گونه از ربات‌ها محدوده بارپذیری و دقت مشخصی دارند اما سادگی ساختار آنها و تطبیق پذیری با محیط اطراف آنها را مرکز توجه محققان قرار داده است. در این تحقیق یک ربات انعطاف‌پذیر محرک کابلی معرفی می‌گردد و بر اساس تئوری خمش تیر اویلر-برنولی روابط سینماتیک و دینامیک آن نوشته شده است. طبق این مدل‌های معرفی شده، یک سیستم کنترلر تناسبی-مشتق‌گیر-انتگرال‌گیر (PID) طرح‌ریزی گردید. همچنین کنترل‌گر شبکه عصبی با دو لایه مخفی و پنج نرون به عنوان کنترل‌کننده تطبیقی برای ربات توسعه داده شد. توابع مختلفی مانند پله، شیب، تصادفی، سینوسی و موج مربعی به عنوان ورودی به هر دو سیستم کنترل وارد شد تا پایداری پاسخ و دقت آن بررسی گردد. سیستم کنترل‌گر شبکه عصبی پاسخی به‌خوبی کنترلر PID داشت هرچند که در مواجهه با ورودی تصادفی و سینوسی به‌خوبی کنترل‌کننده رقیب عمل نکرد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۱۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱

کلیدواژگان:

ربات انعطاف‌پذیر محرک کابلی
مدل دینامیک
مدل سینماتیک
دینامیک و سینماتیک معکوس
کنترل‌کننده تطبیقی
شبکه‌ی عصبی مصنوعی

*نویسنده مسئول: منا طهماسبی

پست الکترونیکی:

Tahmasebi.mona@gmail.com

مقدمه

در دوران اخیر ربات‌ها در صنعت‌های مختلف تولیدی و خدماتی کاربرد روزافزونی یافته‌اند و دیگر تجهیزات لوکس و سرگرمی محسوب نمی‌شوند. یکی از گونه ربات‌های کاربردی در عملیات‌های مختلف، ربات انعطاف‌پذیر با محرک سیمی^۱ (WDFR) است [۱] که توسط پژوهشگران در زمینه مهندسی جراحی پزشکی [۲-۵]، پایش توربین‌ها [۶]، زیر دریا [۷-۹] و برداشت و بسته‌بندی محصولات کشاورزی به‌کار رفته است [۱۰]. در اغلب موارد ذکر شده بازوی ربات باید فشرده، انعطاف‌پذیر و هندسه تطبیق‌پذیر داشته باشد تا بتواند کارایی بیشینه ارائه کند. ربات‌های WDFR مناسب این عملیات‌ها هستند اما ظرفیت بارپذیری و میزان دقت آنها محدود است. این ربات‌ها در مقایسه با ربات‌های مرسوم مفصلی امتیازاتی دارند مانند نیاز به تعداد کمتر عملگر یا موتور، سازه ساده‌تر و تطبیق‌پذیری با شرایط فضای عملیاتی. اگرچه در خلال فرآیند بازرسی، ظرفیت بارپذیری و دقت موقعیت‌یابی به اهمیت ربات‌های پزشکی و جراحی نیست اما در این ربات‌ها ارتعاشات وارد شده از محیط اطراف به عنوان اغتشاش مهم است چرا که باعث تغییر فرم بازو و کاهش دقت می‌گردد. در نقطه مقابل، در ربات‌های برداشت محصولات کشاورزی ظرفیت باربرداری برای چیدن میوه از دقت موقعیت‌یابی مهم‌تر است.

اغلب مدل‌های عددی و تحلیلی ارائه شده WDFR بر پایه خمش تیر یا تئوری تیر اویلر-برنولی است که در اثر اعمال نیروی کشش تاندوم‌های بازو و خمش ایجاد شده است [۱۱-۱۵]. همان‌طور که بیان شد در پژوهش‌ها، برای ارائه یک مدل خود-کالیبره شونده یک بازوی ربات انعطاف‌پذیر با محرک سیمی جدید زیستی [۱۲]، طراحی ستون فقرات پیوسته ربات‌های محور سیمی [۱۱]، فرمولاسیون تحلیلی برای سینماتیک، استاتیک، و بازگشت‌پذیرشونده شکل ربات‌های پیوسته چند ستونه از طریق انتگرال‌های بیضوی [۱۳]، طراحی، سینماتیک و کنترل کشش غیرفعال یک بازوی ربات محور سیمی گسسته با دیسک کشویی غیرفعال [۱۵]، طراحی و سینماتیک بازوی ربات پیوسته کابلی با ستون فقرات مجهز به مفصل گوی و کاسه‌ای [۱۴] از این تئوری استفاده شده است.

مدل‌های طرح شده برای پیش‌بینی تغییر شکل و جابجایی WDFR در اثر بار خارجی وارد شده عمل می‌کنند مانند [۱۶؛ ۱۷] که از ربات انعطاف‌پذیر پیوسته برای بیوپسی تومور و جراحی استفاده می‌کنند. اغلب شرایط بارگذاری ساده است بنابراین برای شرایط کاری واقعی نمی‌توان گفت کاملاً کاربردی هستند. لذا مدل‌های سینماتیکی و دینامیکی نیاز است که بتوانند حرکت WDFR را در بارگذاری‌های ترکیبی مانند ارتعاش و یا تحریک پایه مدل کنند. یک مدل‌سازی دقیق باید بتواند موقعیت‌یابی با محدوده دقت قابل قبول ارائه کرده و نیروی لازم محرک را با توجه به دینامیک معکوس محاسبه کند تا مکان دلخواه نقطه انتهایی ربات به‌دست آید. همچنین برای توسعه مدل‌های هوشمند کنترل که اخیراً کاربردی شده‌اند، ابتدا باید براساس شبیه‌سازی، پارامترهای سیستم کنترل استخراج گردد و سپس در پیش‌نمونه ساخته شده به‌کار گرفته شود. الگوریتم‌های هوشمند مانند شبکه عصبی [۱۸-۲۱]، یادگیری تدریجی [۲۲]، منطق فازی [۲۳]؛ [۲۴]، الگوریتم ژنتیک [۲۵-۲۷] در سیستم‌های دینامیکی متنوعی به‌کار گرفته شده‌اند. ترکیب تکنیک‌های هوش مصنوعی با WDFR می‌تواند عملکرد آن را بهبود بخشد، به‌ویژه در ربات‌های کشاورزی^۲ برای عملیات‌هایی مانند سمپاشی یا کاشت بذر، WDFR می‌تواند کارایی را بهبود بخشد.

این مطالعه قصد دارد ضمن ارائه یک مدل سینماتیک و دینامیکی از WDFR با کاربرد برداشت میوه، کارایی آن را با تجهیز کنترل‌گر شبکه عصبی و شبیه‌سازی آن بسنجد. نتایج این شبیه‌سازی می‌تواند برای مرحله بعدی یعنی ساخت سیستم کنترل‌گر به‌کار برده شود.

¹ Wire-driven flexible robot

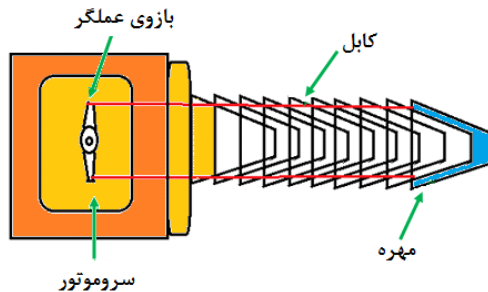
² Agribots

روش شناسی

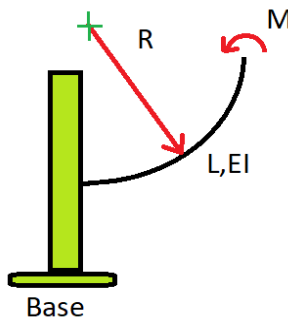
همان‌گونه که قبلاً بیان شد مدل سینماتیکی WDFR برای موقعیت‌یابی نقطه انتهایی باز و مورد نیاز است. بنابراین در این مقاله ابتدا مدل سینماتیک توضیح داده خواهد شد و سپس مدل دینامیکی بیان می‌گردد تا با استفاده از آن نیروی کشش لازم تاندوم‌ها برای رسیدن موقعیت مورد نظر محاسبه شود. این مراحل در ادامه به ترتیب شرح داده می‌شود.

مدل سینماتیکی WDFR

ربات WDFR سازه‌ای شبیه ستون خرطوم فیل و یا شاخک اختاپوس دارد و شامل سیم‌های تاندومی، مهره‌ها، موتورهای عملگر و پایه می‌باشد. فرم بخش مهره‌ها مانند مخروط ناقص است و مجموعه آنها به صورت یک زنجیره سینماتیکی در کنار یکدیگر قرار گرفته است. این پیکره باعث می‌شود که هر مهره بتواند در سه جهت دوران داشته باشد و مانند آن است که یک مفصل کروی با سه درجه آزادی بین مهره‌ها قرار دارد. چهار رشته کابل تاندوم از همه مهره‌ها گذشته و در انتها به سروموتورهای دورانی وصل شده‌اند. شکل ۱ این ساختار و پیکربندی WDFR را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. هرگاه که یکی از سیم‌ها تحت کشش قرار داده می‌شود سیم دوم توسط طرف دیگر اهرم سروموتور آزاد می‌گردد. این حرکت باعث ایجاد خمش WDFR شده و موقعیت مکانی نقطه انتهایی بازو تغییر می‌کند چرا که انحنای بازو یا همان تیر یکسر درگیر تغییر کرده است. در واقع مجموعه مهره‌ها مانند یک تیر یکسر درگیر دارای خیز انتهایی تفسیر شده است. شعاع انحنای این بازوی تیر شکل، از تئوری خمش تیر محاسبه می‌گردد. شکل ۲ خمش و شعاع انحنای ناشی از آن را نشان می‌دهد.

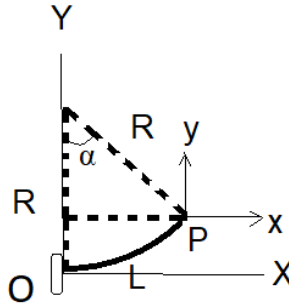


شکل ۱. اجزاء ربات WDFR در حرکت صفحه‌ای به صورت شماتیک.



شکل ۲. مقدار شعاع انحناء و میزان انحناء WDFR در اثر خمش اعمالی در انتهای تیر.

موقعیت مکانی انتهایی بازو توسط $P(x, y)$ مشخص شده است و مقدار شعاع انحنا نیز R نامیده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است، مؤلفه عمودی مکان نقطه انتهایی P یعنی y می‌تواند براساس روابط مثلثاتی از رابطه (۱) به‌دست آید:



شکل ۳. موقعیت مکانی انتهایی بازو و شعاع انحنا.

$$y = R - R \cos \alpha = R (1 - \cos \alpha) \quad (1)$$

همچنین، موقعیت افقی نقطه انتهایی یعنی x از انحنای کمان دایره شکل تیر توسط رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$x^2 + y^2 = R^2 \rightarrow x = \sqrt{R^2 - y^2} \quad (2)$$

در نتیجه با ترکیب رابطه ۱ و ۲، x به‌صورت تابعی از R به‌دست می‌آید:

$$x = R\sqrt{2 \cos \alpha - \cos^2 \alpha} \quad \text{or} \quad x = R \sin \alpha \quad (3)$$

که در رابطه‌ها، زاویه رأس کمان حادث شده توسط α نام‌گذاری گردیده است. بنابراین سینماتیک مکان انتهایی WDFR براساس تعیین مقدار شعاع انحنا به‌دست آمد. حال باید R بر اساس گشتاور خمشی M محاسبه گردد که در رابطه (۴) ارائه شده است:

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \rightarrow R = \frac{EI}{M} \quad (4)$$

که در آن E مدول الاستیسیته و I گشتاور دوم سطح مقطع تیر می‌باشد. در دینامیک مدل WDFR برای محاسبه M ضروری است که کشش کابل‌ها در محاسبه خمش دخالت داده شوند.

دینامیک مدل WDFR

در تیر خمیده شده، ارتباط بین گشتاور مکانیکی و شعاع انحنا از رابطه (۵) به‌دست می‌آید:

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (5)$$

که در حقیقت معکوس شعاع انحنای برابر با شیب است یعنی:

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (۶)$$

همچنین تنش عمودی وارده بر مقطع عرضی تیر (σ) توسط رابطه (۷) محاسبه می‌گردد:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (۷)$$

که در آن C مقدار شعاع سطح مقطع دایروی تیر و I گشتاور دوم سطح مقطع تیر می‌باشد. تنش عمودی در نتیجه تقسیم نیروی فشاری عمودی اعمال شده بر مقطع بازو در اثر کشش سیم (F) بر سطح مقطع عرضی تیر (A) به‌دست می‌آید:

$$\frac{F}{A} = \frac{Mc}{I} \rightarrow M = \frac{IF}{cA} \quad (۸)$$

از رابطه (۴) و (۸) میزان کشش سیم تاندوم (F) برای رسیدن به شعاع انحنای مطلوب R استفاده می‌گردد:

$$F = \frac{AcE}{R} \quad (۹)$$

در این عبارت A سطح مقطع تیر و C مقدار شعاع سطح مقطع دایروی تیر است. به علاوه در تیر یکسر گیردار به عنوان WDFR جابجایی عمودی انتهای تیر یا y حین اعمال گشتاور خمشی در انتهای تیر برابر است با:

$$y = \frac{ML^2}{2EI} \quad (۱۰)$$

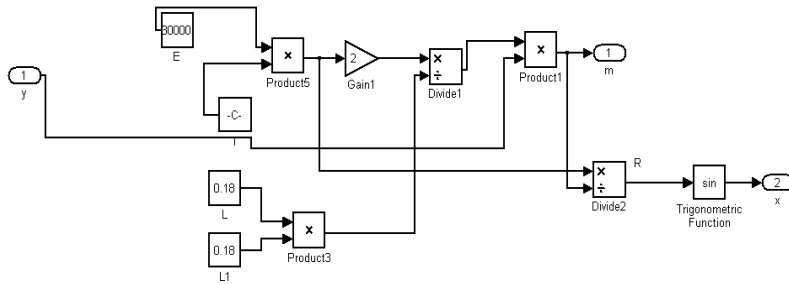
درنهایت، گشتاور اعمالی برابر با ضرب نیروی کشش تاندوم در شعاع مقطع تیر می‌باشد یعنی:

$$M = Fc \quad (۱۱)$$

بدین‌سان دینامیک مدل WDFR برای به‌دست آوردن موقعیت عملگر انتهایی بر اساس گشتاور تکمیل شد. حال که هر دو پارامتر موقعیت مکانی نقطه انتهایی و کشش لازم تاندوم برای رسیدن به مکان مطلوب دراختیار هستند، طراحی کنترل‌گر WDFR امکان‌پذیر می‌گردد.

روش انجام شبیه‌سازی

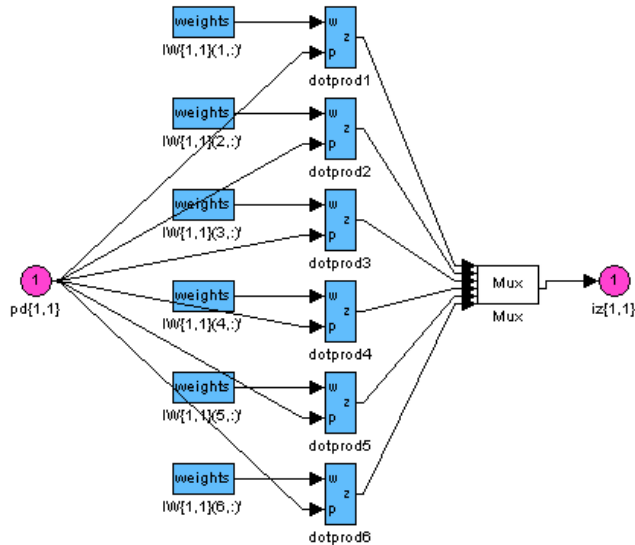
پس از استحصال مدل‌های دینامیک و سینماتیکی ربات، نیاز به طراحی کنترل‌گر می‌باشد. برای این منظور دو کنترل‌گر تناسبی-مشتق‌گیر-انتگرال‌گیر (PID) و کنترل‌گر تطبیقی شبکه عصبی استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی و مقایسه خروجی این دو کنترل‌گر می‌تواند در مرحله ساخت سامانه کنترل‌گر و سخت‌افزار مربوطه کمک شایانی کند.



شکل ۶. اجزای مدل دینامیک معکوس.

سیس یک کنترل‌گر از خانواده PID برای این سیستم دینامیکی به صورت حلقه بسته قرار داده شد. برای تنظیم مقادیر و داشتن خروجی پایدار و مقاوم، یک تابع پله به عنوان ورودی به سیستم اعمال شد. با روش سعی و خطا سعی گردید منحنی خروجی بسیار نزدیک به منحنی ورودی باشد تا بیشترین دقت بر حسب معیار کمترین مربعات خطا به دست آید. سپس دیگر توابع ورودی مانند تابع شیب و تابع تصادفی نیز به سیستم اعمال شد تا عملکرد کنترل‌گر PID مشاهده گرد. ضرایب کنترل‌کننده به قرار $K_p=700$ ، $K_i=10$ و $K_d=0.8$ با استفاده از روش سعی و خطا به دست آمد.

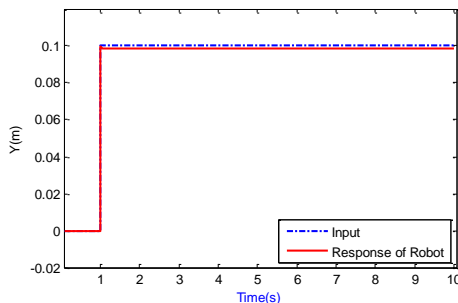
در ادامه یک کنترل‌کننده شبکه عصبی نیز پایه‌گذاری شد. این کنترل‌کننده‌ها وفقی بوده و می‌توانند با توجه به اغتشاشات مختلف، خروجی مناسبی را برای ربات حاصل کنند. در اصل کنترل‌کننده وفقی می‌تواند در شرایط جدید که کنترل‌کننده PID تنظیم نشده است، نیز کار کند. در این مطالعه از شبکه عصبی پیش‌خور-پسا انتشار (FFBP) دو لایه با ۵ نرون استفاده شد زیرا این مدل شبکه بهترین ضریب وابستگی را در مرحله آموزش ($R^2=0.98$) نشان داد. در این کنترل‌کننده شبکه عصبی نیز توابع پله، شیب و تصادفی وارد شدند تا بتوان نتایج آن را با کنترل‌کننده PID مقایسه کرد. سیگنال خطای موقعیت ورودی شبکه و خروجی آن سیگنال کنترل‌کننده جهت اعمال در عملگر است که در شکل ۷ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



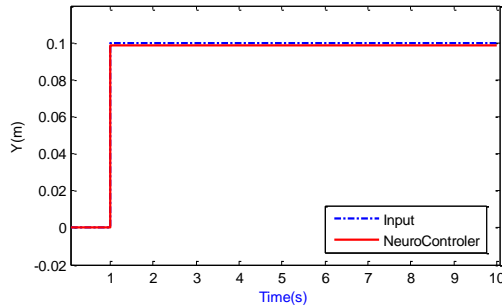
شکل ۷. شماتیک پیکربندی شبکه عصبی اجرا شده.

نتایج و بحث

پس از اجرای شبیه‌سازی برای هر دو کنترل‌گر PID و شبکه عصبی، نتایج خروجی کنترل‌گرها در اجرای فرمان ورودی به‌دست آمد. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب عملکرد کنترل‌گر PID و کنترل‌گر شبکه عصبی در پاسخ به تابع پله را نشان می‌دهند. هر دو کنترل‌گر به‌خوبی موقعیت خواسته شده را اجرا کردند اما کنترل‌گر شبکه عصبی واچشش کمتری نشان داد.

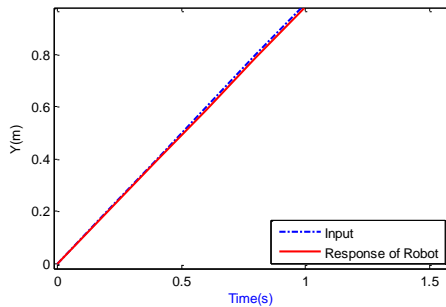


شکل ۸. نمودار پاسخ کنترل‌کننده PID.

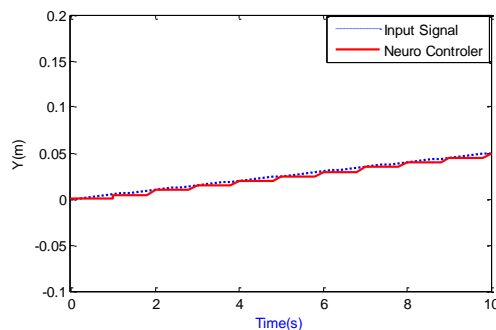


شکل ۹. پاسخ کنترل‌کننده وقفی شبکه عصبی.

همچنین در پاسخ به تابع شیب، خروجی‌های هر دو کنترل‌گر بررسی گردید. خروجی PID بهتر و پیوسته‌تر بود (شکل ۱۰) در حالی که خروجی کنترل‌گر شبکه عصبی کاملاً هم‌شیب و پیوسته با ورودی نیست (شکل ۱۱).

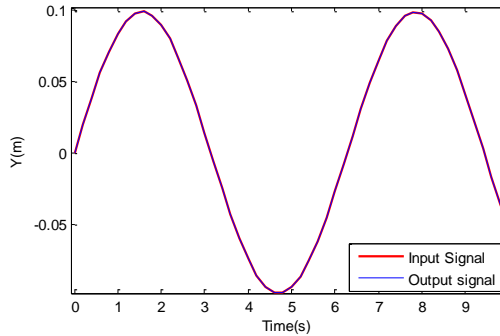


شکل ۱۰. پاسخ کنترل‌گر PID به تابع شیب.

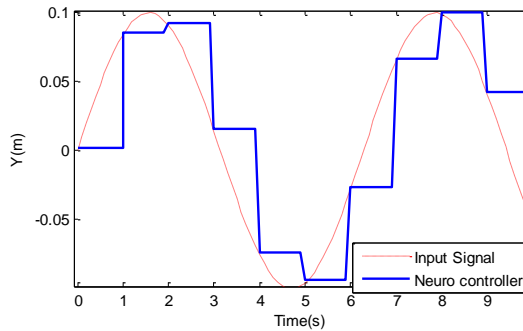


شکل ۱۱. پاسخ کنترل‌گر شبکه عصبی ربات WDFR به تابع شیب.

در بررسی‌های بیشتر، پاسخ ربات WDFR به تابع سینوسی نیز مطالعه شد. خروجی کنترل‌گر PID (شکل ۱۲) نسبت به کنترل‌گر شبکه عصبی تطابق بیشتری داشت هرچند که خطای کنترل‌گر وقفی شبکه عصبی ۶ درصد و قابل قبول است اما به صورت پله‌ای و ناپیوسته این امر را محقق می‌سازد (شکل ۱۳).

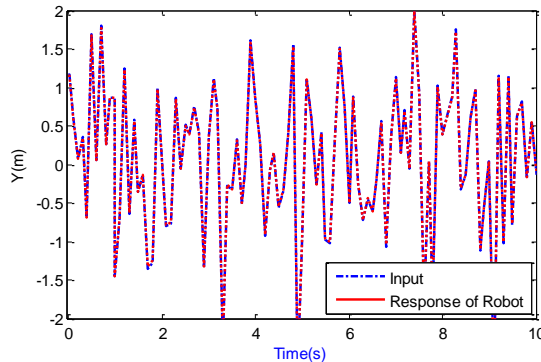


شکل ۱۲. خروجی کنترلر PID نسبت به تابع سینوسی.

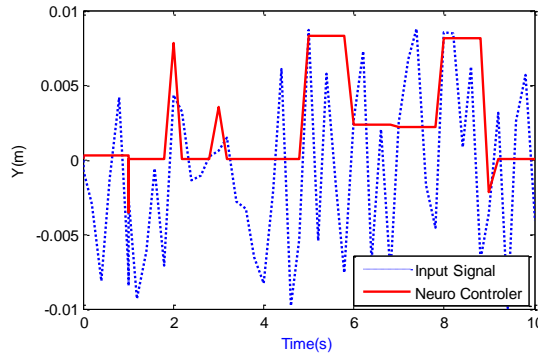


شکل ۱۳. خروجی کنترلر گر تطبیقی شبکه عصبی نسبت به تابع سینوسی.

همچنین تابع تصادفی نیز به عنوان ورودی مطلوب به ربات WDFR اعمال گردید. همانند تابع سینوسی، کنترلر PID همگرایی بیشتری بین تابع مطلوب ورودی و خروجی نشان داد. البته سرعت تغییرات ورودی زیاد بوده و این امر باعث وقفه در کنترل کننده شبکه عصبی می‌گردد. شکل ۱۴ نشان دهنده پاسخ سیستم مجهز شده به PID است و شکل ۱۵ پاسخ ربات WDFR به تابع تصادفی است هنگامی که کنترلر گر شبکه عصبی در آن به کار رفته است.

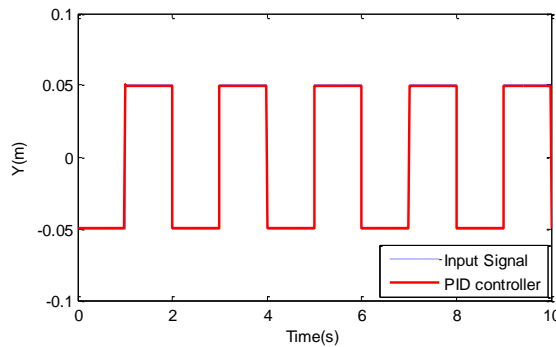


شکل ۱۴. خروجی کنترلر PID نسبت به تابع سیگنال تصادفی.

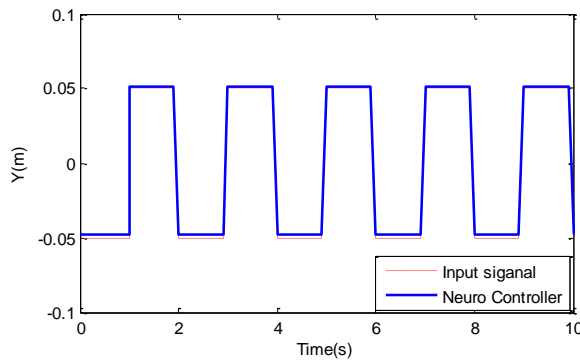


شکل ۱۵. خروجی کنترل‌کننده تطابقی شبکه عصبی نسبت به ورودی تابع تصادفی.

اما در پاسخ به تابع موج مربعی سیستم کنترل‌گر شبکه عصبی به خوبی سیستم کنترلر PID عمل کرده است (شکل ۱۶) و با خطای خیلی کمتر از ۲ درصد روند تغییرات ورودی را در خروجی تولید نموده است (شکل ۱۷).



شکل ۱۶. پاسخ ربات مجهز به کنترل‌کننده PID به موج مربعی.



شکل ۱۷. پاسخ تولید شده ربات مجهز به کنترل‌گر وفقی شبکه عصبی به موج مربعی.

نتیجه‌گیری

ربات WDFR پس از مدل‌سازی دینامیکی و سینماتیکی نیاز به طراحی کنترل‌گر مناسب دارد. دو طرح کنترل‌کننده PID و شبکه عصبی برای این منظور طراحی شده و با کمک شبیه‌سازی ارزیابی شدند. علت انتخاب این دو طرح کنترل‌گر، سادگی در اجرای سخت‌افزاری، دقت بالا و پایداری در برابر اغتشاشات ناخواسته بوده است. نتایج نشان داد که هر دو کنترل‌کننده به ورودی پله پاسخی مناسب و دقیق داشتند. همچنین در مواجهه با ورودی شیب نیز هر دو کنترل‌کننده عملکرد مطلوبی نشان دادند. اما با افزایش سرعت تغییرات در ورودی‌هایی مانند تابع سینوسی و تصادفی، کنترل‌کننده PID بهتر ظاهر شد هر چند که کنترل‌گر وقفی شبکه عصبی نیز پاسخ پایداری تولید کرد اما دقت آن کمتر بود. همچنین هر دو کنترل‌گر در رهگیری موقعیت مکانی موج مربعی به‌خوبی پاسخ دادند و این امر نشان می‌دهد وقتی سرعت تغییرات بالاست مانند ورودی موج تصادفی و سینوسی، کنترل‌گر شبکه عصبی دچار وقفه می‌گردد و به‌خوبی نمی‌تواند سیستم را کنترل کند.

References

- [1] Robinson, G., & Davies, J. B. C. (1999, May 10-15). *Continuum robots - a state of the art*. Proceedings 1999 Institute of Electrical and Electronics Engineers International Conference on Robotics and Automation Detroit, Michigan, USA. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.774029>
- [2] Dupont, P. E., Lock, J., Itkowitz, B., & Butler, E. (2010). Design and Control of Concentric-Tube Robots. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Robotics*, 26(2), 209-225. <https://doi.org/10.1109/TRO.2009.2035740>
- [3] Li, Z., Du, R., Lei, M. C., & Yuan, S. M. (2011, November 11-17). *Design and analysis of a biomimetic wire-driven robot arm*. American Society of Mechanical Engineers International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Denver, Colorado, USA. <https://doi.org/10.1115/IMECE2011-63482>
- [4] Sars, V. D., Haliyo, S., & Szweczyk, J. (2010). A practical approach to the design and control of active endoscopes. *Mechatronics*, 20(2), 251-264. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.12.001>
- [5] Yoon, W. J., Reinhall, P. G., & Seibel, E. J. (2007). Analysis of electro-active polymer bending: A component in a low cost ultrathin scanning endoscope. *Sensors and Actuators A: Physical*, 133(2), 506-517. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.04.037>
- [6] Idogaki, T., Tominaga, T., Senda, K., Ohya, N., & Hattori, T. (1996). Bending and expanding motion actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 54(1-3), 760-764. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)80053-2](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)80053-2)
- [7] Jones, B. A., & Walker, I. D. (2006). Kinematics for multisection continuum robots. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Robotics*, 22(1), 43-55. <https://doi.org/10.1109/TRO.2005.861458>
- [8] Laschi, C., Mazzolai, B., Mattoli, V., Cianchetti, M., & Dario, P. (2009). Design and Development of a Soft Actuator for a Robot Inspired by the Octopus Arm. In O. Khatib, V. Kumar, & G. J. Pappas (Eds.), *Experimental Robotics*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00196-3_4
- [9] Laschi, C., Mazzolai, B., Mattoli, V., Cianchetti, M., & Dario, P. (2009). Design of a biomimetic robotic octopus arm. *Bioinspiration & biomimetics*, 4(1), 015006. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/4/1/015006>

- [10] Dekker, R., Khajepour, A., & Behzadipour, S. (2006). Design and testing of an ultra-high-speed cable robot. *International Journal of Robotics and Automation*, 21(1), 25-34. <https://doi.org/10.2316/Journal.206.2006.1.206-2824>
- [11] Li, C., & Rahn, C. D. (2002). Design of continuous backbone, cable-driven robots. *Journal of Mechanical Design*, 124(2), 265-271. <https://doi.org/10.1115/1.1447546>
- [12] Mustafa, S. K., Yang, G., Yeo, S. H., Lin, W., & Chen, I. M. (2008). Self-Calibration of a Biologically Inspired 7 DOF Cable-Driven Robotic Arm. *Institute of Electrical and Electronics Engineers/American Society of Mechanical Engineers Transactions on Mechatronics*, 13(1), 66-75. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2007.915024>
- [13] Xu, K., & Simaan, N. (2010). Analytic formulation for kinematics, statics, and shape restoration of multibackbone continuum robots via elliptic integrals. *Journal of Mechanisms and Robotics* 2(1), 1-13. <https://doi.org/10.1115/1.4000519>
- [14] Yeshmukhametov, A., Koganezawa, K., & Yamamoto, Y. (2018, December 12-15). *Design and Kinematics of Cable-Driven Continuum Robot Arm with Universal Joint Backbone*. 2018 Institute of Electrical and Electronics Engineers International Conference on Robotics and Biomimetics, Kuala Lumpur, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2018.8665186>
- [15] Yeshmukhametov, A., Koganezawa, K., & Yamamoto, Y. (2019). A Novel Discrete Wire-Driven Continuum Robot Arm with Passive Sliding Disc: Design, Kinematics and Passive Tension Control. *Robotics*, 8(3), 51. <https://doi.org/10.3390/robotics8030051>
- [16] Gao, Y., Takagi, K., Kato, T., Shono, N., & Hata, N. (2020). Continuum Robot With Follow-the-Leader Motion for Endoscopic Third Ventriculostomy and Tumor Biopsy. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Biomedical Engineering*, 67(2), 379-390. <https://doi.org/10.1109/TBME.2019.2913752>
- [17] Rucker, D. C., Webster, R. J., Chirikjian, G. S., & Cowan, N. J. (2010). Equilibrium Conformations of Concentric-tube Continuum Robots. *The International Journal of Robotics Research*, 29(10), 1263-1280. <https://doi.org/10.1177/0278364910367543>
- [18] Gohari, M., Rahman, R. A., Raja, R. I., & Tahmasebi, M. (2012, February 27-28). *Bus seat suspension modification for pregnant women*. 2012 International Conference on Biomedical Engineering Penang, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/ICoBE.2012.6179047>
- [19] Gohari, M., Rahman, R. A., & Tahmasebi, M. (2014). Prediction head acceleration from hand and seat vibration via artificial neural network model. *Applied Mechanics and Materials*, 471, 161-166. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.471.161>
- [20] Gohari, M., Tahmasebi, M., & Nozari, A. (2014, October 29-30). *Application of machine learning for NonHolonomic mobile robot trajectory controlling*. 2014 4th International Conference on Computer and Knowledge Engineering Mashhad, Iran. <https://doi.org/10.1109/ICCKE.2014.6993354>
- [21] Tahmasebi, M., Gohari, M., & Emami, A. (2022). An Autonomous Pesticide Sprayer Robot with a Color-based Vision System. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 2(1), 115-123. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v2i1.480>
- [22] Tahmasebi, M., Rahman, R., Mailah, M., & Gohari, M. (2012). Sprayer boom active suspension using intelligent active force control. *Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6(8), 1277-1281. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1332344>
- [23] Kazemi, M. A., Masoumnezhad, M., & Askari, N. (2021). State Estimation of an Aviator Using Fuzzy Mixed Kalman/H-infinity Filter. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 61-80. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128396>

- [24] Rahbar Hadi Bigloo, R., & Movahedi, M. M. (2022). Knowledge-based Mechanical Arm Modeling of Bascule Lift with Simulation Method and Fuzzy Inference Approach. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(1), 403-428. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.294013.1608>
- [25] Komasilovs, V., Stalidzans, E., Osadcuks, V., & Mednis, M. (2013, November 19-21). *Specification development of robotic system for pesticide spraying in greenhouse*. 2013 IEEE 14th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics, Budapest, Hungary. <https://doi.org/10.1109/CINTI.2013.6705239>
- [26] Rahmatinejad, B., Abbasgholipour, M., & Mohammadi Alasti, B. (2021). Redesign of engine radiator based on number of optimal fans using a genetic algorithm. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 99-118. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128.398>
- [27] Taheri, N., Akbari, E., Askari, N., Ahmad Tajik, V., Orojlo, H., Kazemi, M. A., & Ghasemi, G. (2022). Supplementary Damping Controllers Design in VSC HVDC Systems and Wind Farms to Improve Stability and Energy Conversion in Wind Turbine Using Proposed Genetic-Bat Algorithm. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(1), 357-381. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.293314.1603>