



Simulating the Behaviour of Nanobeams Using Adaptive Neural-fuzzy Inference System

Aslan Abbaslou^{1*}, Ahmad Mashayekhi², Yasser Taghipour Lahijani³

^{1,2}Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

³Department of Mechanical Engineering, Vali-e-asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 10.04.2023

Revised: 01.03.2024

Accepted: 01.30.2024

Keyword:

Nanobeam
Deflection
Neural Network
Fuzzy Logic
Neural-fuzzy Inference

*Corresponding Author:

Aslan Abbaslou

Email:

aslan.abbasloo@sirjantech.ac.ir

ABSTRACT

In the present research, the analysis of the behaviour of cantilever chromium nanobeams was investigated in the form of nanobeam calculations under static load. To simulate the behaviour and calculate the deflection of nanobeams, the adaptive neural-fuzzy inference system (ANFIS), which is a powerful combination of neural networks and fuzzy logic, was used. By using laboratory data, the mentioned system was trained and tested in three modes. In the first case, the system was trained with the laboratory results of two forces of 8 and 10.1 nanonewtons along the nanobeam with a thickness of 50 nm. Then, the system was tested by interpolation with 9.4 nanonewton forces. In the second case, the system was trained using the experimental 68 nm thick nanobeam for forces of 8 and 11 nanonewtons, and it was tested with 9.5 and 12.5 nanonewton forces in the form of interpolation and extrapolation. In the third case, with the laboratory results, the nanobeam with a thickness of 83 nm was used under a force of 8 nanonewtons at different points, one at a time, to train the system and to test the results of the system. In comparing the ANFIS results with the experimental results, the percentage error was found to be 2.88%. The results of this research showed that it is possible to accurately predict the nanobeam deflection with the adaptive neural-fuzzy inference system without the need to perform more experiments.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

An adaptive neural-fuzzy inference system or fuzzy inference system based on an adaptive network abbreviated as ANFIS is an adaptive and powerful combination of neural networks and fuzzy logic. This method is based on the Takagi-Sugeno fuzzy inference systems introduced by Zhang in 1983. By using neural and fuzzy networks, the presence of positive properties of both methods has resulted in their wide usage.

In the ANFIS method, neural network algorithm and fuzzy logic are combined in such a way that the advantages of both are used to train a new algorithm. Since laboratory data have a degree of accuracy, using fuzzy logic to express data is considered an advantage. On the other hand, the advantage of the neural network is that it is trained using primary data. These two advantages are collected in the ANFIS method. The ANFIS has been used in many practical and industrial problems.

The innovation of the present study is that according to the present study and in comparison with previous studies, it is clear that not much information is needed to train the neural-fuzzy inference model. Therefore, in problems where a lot of behavioural information is not available from the system, the neural-fuzzy inference model is very efficient, and this means reducing the need for the number of initial tests and thus reducing cost and time.

Methodology

The ANFIS has used a set of conditional rules whose characteristics have been modified using a neural network. In this method, the centre of membership functions, and their start and end points have been modified in an intelligent way using a neural network. For this collection, five different layers (as shown in Figure 1) are defined as below:

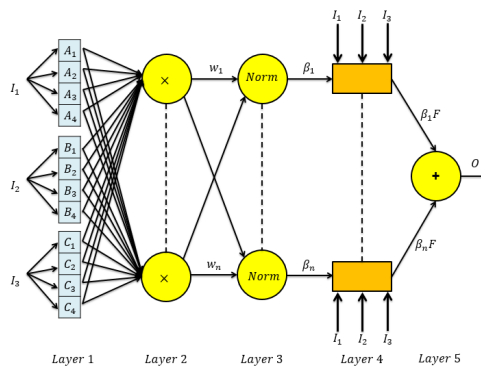


Figure 1. Schematic design of adaptive neural-fuzzy inference system.

The first layer is defined as the "input fuzzification layer". It converts the input values into a set of fuzzy rules using some membership functions. The second layer creates a power for the rules. That is, this layer is defined as the "law layer" and the output signal is calculated by multiplying the input signals with fuzzy operators. In the third layer, the

weight of each node is calculated and normalized. In the fourth layer, the fuzzy quantities are de-fuzzified. In the 5th layer, the output of the system is calculated based on the sum of all received signals.

Results and discussion

In this study, the ANFIS toolbox, available in MATLAB software, was used to calculate the deflection of the nanobeam. For this purpose, 3 triangular membership functions were used for each input. In addition, 35 nodes, 9 linear parameters, and 18 non-linear parameters were used. According to Figure 2, the force was introduced at a distance of a certain length, i.e. l , from the beginning of the beam, and the deflection, i.e. δ , was measured at the same point.

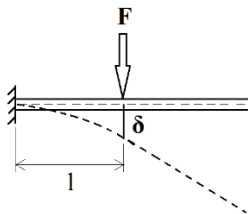
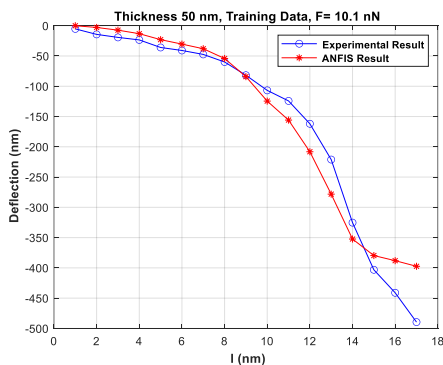


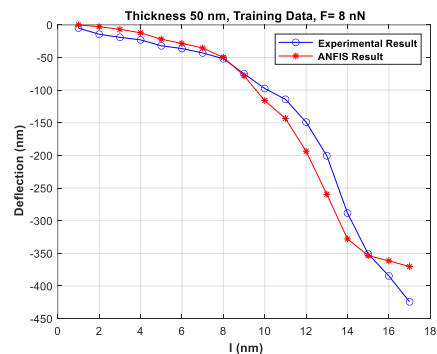
Figure 2. Loading F and deflection δ in the nano beam.

In this study, the toolbox of the ANFIS of MATLAB software was used. The system was taught and tested in three different modes.

In the first case, the system was trained with the laboratory results of transverse forces of 8 and 10.1 nanonewtons along the length of the nanobeam with a thickness of 50 nm (Figure 3). It was then tested with the values of the deflections corresponding to the force of 9.4 nanonewtons (Figure 4).



(a) Deflection of nanobeam under 10 nN force.



(b) Deflection of nanobeam under 8 nN force.

Figure 3. Comparison of the deflection of the ANFIS result (trained) and experiment data.

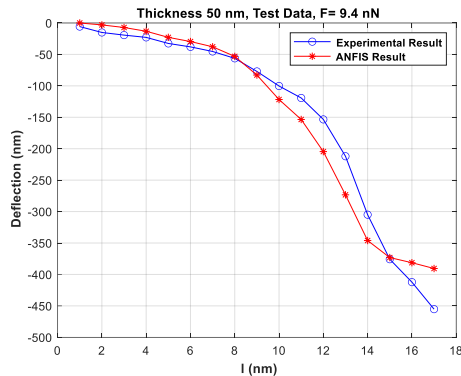


Figure 4. Comparison of the deflection of the ANFIS result (tested) and experiment data.

In the second case, the system was trained using 68 nm thick nanobeam laboratory deflections for forces of 8 and 11 nanonewtons and tested with deflections corresponding to forces of 9.5 and 12.5 nanonewtons. In the third case, with the laboratory results of applying a force of 8 nanonewtons, at different points of the nanobeam with a thickness of 83 nm, one at a time, it was used for training the system, and the rest of the results were used to test the results of the system.

Conclusion

In this study, the ANFIS, which is a powerful combination of neural network and fuzzy logic, was used to simulate the behaviour and calculate the deflection of nanobeams. By using laboratory data, the mentioned system was trained and tested in three modes. In the first case, the system was trained with the laboratory results of two forces of 8 and 10.1 nanonewtons along the nanobeam with a thickness of 50 nm. Then, the system was tested by interpolation with 9.4 nanonewton forces. In the second case, the system was trained using the experimental 68 nm thick nanobeam for forces of 8 and 11 nanonewtons, and it was tested with 9.5 and 12.5 nanonewton forces in the form of interpolation and extrapolation. In the third case, with the laboratory results, the nanobeam with a thickness of 83 nm was used under a force of 8 nanonewtons at different points, one at a time, to train the system and to test the results of the system. The error, comparing the results of the ANFIS with the experimental results, was found to be 2.88 %. The results of this research show that it is possible to accurately predict the nanobeam deflection with the ANFIS without the need to perform more experiments.

شبیه‌سازی رفتار نانوتیرها با استفاده از سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی

اصلان عباسلو^{۱*}، احمد مشایخی^۲، یاسر تقی‌پور لاهیجانی^۳

۱ و ۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

۳- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله تحلیل رفتار نانوتیرهای یکسرگردار از جنس کروم، به صورت محاسبه خیز نانوتیر تحت بار استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی رفتار و محاسبه خیز نانوتیرها از سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی^۱ (ANFIS) که ترکیبی قدرتمند از شبکه عصبی و منطق فازی است، استفاده شده است. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی انفیس در سه حالت، آموزش داده شده و مورد آزمون واقع شده است. در حالت اول، با نتایج آزمایشگاهی دو نیروی ۸ و ۱۰/۱ نانونیوتنی در طول نانوتیر با ضخامت ۵۰ نانومتر، سامانه آموزش داده شده است. سپس، سامانه با خیزهای مربوط به نیروی ۹/۴ نانونیوتنی به صورت درون‌یابی آزموده شده است. در حالت دوم، با استفاده از خیزهای آزمایشگاهی نانوتیر با ضخامت ۶۸ نانومتر به ازای نیروهای ۸ و ۱۱ نانونیوتن سامانه آموزش داده شده و با خیزهای مربوط به نیروهای ۹/۵ و ۱۲/۵ نانونیوتنی به صورت میان‌یابی و برون‌یابی آزموده شده است. در حالت سوم، با نتایج آزمایشگاهی نانوتیر با ضخامت ۸۳ نانومتر تحت نیروی ۸ نانونیوتن در نقاط مختلف آن، به صورت یک در میان، برای آموزش سامانه و برای آزمون نتایج سامانه به کار برده شده‌اند. درصد خطا در مقایسه نتایج انفیس با نتایج تجربی، ۲/۸۸ درصد به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان بدون نیاز به انجام آزمایش‌های بیشتر و صرف هزینه، خیز نانوتیر را با انفیس با دقت پیش‌بینی کرد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

کلید واژگان:

نانوتیر

خیز

شبکه عصبی

منطق فازی

استنتاج عصبی-فازی

*نویسنده مسئول: اصلان عباسلو

پست الکترونیکی:

aslan.abbasloo@sirjantech.ac.ir

¹ Adaptive neural-fuzzy inference system

مقدمه

سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی یا سامانه استنتاج فازی مبتنی بر شبکه تطبیقی یا به اختصار انفیس (ANFIS)، ترکیبی تطبیقی و قدرتمند از شبکه‌های عصبی و منطق فازی است. این روش بر اساس سامانه‌های استنتاج تاکاگی-سوگنو^۱ فازی است که توسط جانگ^۲ [۱] معرفی شده است. با استفاده از شبکه عصبی و فازی، کارایی هر دو روش به صورت هم‌زمان در سامانه انفیس ایجاد می‌شود و این باعث شده است که این روش در بسیاری از مسائل مهندسی که تئوری دقیق برای آنها وجود ندارد مورد استفاده قرار گیرد.

شبکه عصبی نوعی الگوریتم یادگیری ماشینی است که از مغز انسان الگوبرداری شده است. این شبکه، مجموعه‌ای از گره‌ها یا نورون‌های به هم پیوسته است که اطلاعات را به گونه‌ای پردازش می‌کند که عملکرد مغز را تقلید می‌کند. شبکه‌های عصبی در طیف وسیعی از کاربردها از جمله تشخیص تصویر، پردازش زبان طبیعی و تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده استفاده می‌شوند. آنها ابزار قدرتمندی برای حل مسائل پیچیده هستند و می‌توان آنها را برای تشخیص الگوها و پیش‌بینی نتایج بر اساس تعداد زیاد داده آموزش داد. در مطالعات متعددی از الگوریتم شبکه عصبی برای تحلیل ارتعاشات نانو تیرها [۲؛ ۳]، و بررسی خیز تیرهای FGM^۳ استفاده شده است [۴؛ ۵].

منطق فازی یک رویکرد ریاضی است که با استدلال تقریبی و نه دقیق سروکار دارد. این شکلی از منطق است که به جای مقادیر درست یا نادرست، درجه از درستی را می‌دهد. منطق فازی در هوش مصنوعی، سامانه‌های کنترل و فرآیندهای تصمیم‌گیری استفاده می‌شود که در آن منطق باینری (۰ و ۱) نامناسب است. بر اساس منطق فازی موضوعات می‌توانند تاحدی درست یا تاحدی نادرست باشند و درجه‌ای از عدم قطعیت در هر فرآیند تصمیم‌گیری وجود داشته باشد. منطق فازی اغلب در شرایطی استفاده می‌شود که داده‌ها ناقص یا نامطمئن هستند، بنابراین این منطق برای بررسی خیز نانو تیرها مناسب است و پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است، به عنوان مثال وثوقی و نیکو در سال ۲۰۱۸ ارتعاشات آزد نانو تیر با تکیه‌گاه الاستیک غیرخطی را بررسی کردند. آنها با استفاده از رویکرد فازی اثرات عدم قطعیت پارامترهای مقیاس کوچک را مدلسازی کردند [۶]. رجائی و همکارانش در سال ۲۰۲۲ یک کنترل‌کننده حالت لغزشی-فازی تطبیقی را برای کنترل ارتعاشات نانو تیر به کار گرفتند [۷].

در بین سازه‌های کوچک (در مقیاس میکرو و نانو)، نانو تیرها بسیار مورد توجه هستند. زیرا دارای کاربردهایی مانند محرک و حسگر در سامانه‌های نانو مکانیکی، نانو الکترومکانیکی و حسگرهای زیستی می‌باشند. برخی مطالعات با استفاده از تئوری غیرمحلی خواص مکانیکی نانو تیر را مورد بررسی قرار دادند [۸]. همچنین با استفاده از تئوری الاستیسته غیر محلی ارتعاشات ساختارهای کوچک را بررسی کردند [۹]، و رفتار مکانیکی نانومیله‌ها و نانولوله‌ها را با استفاده از روش‌های تجربی مختلف پیش‌بینی کردند [۱۰]. علاوه بر این، با استفاده از مدل دینامیک مولکولی رفتار نانولوله‌های گرافن را شبیه‌سازی کردند [۱۱]، و به منظور پیش‌بینی کیفیت ساختار میکرو با استفاده از روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی روش انفیس را مورد استفاده قرار دادند [۱۲].

در این مقاله سامانه انفیس برای محاسبه خیز استاتیکی نانو تیر کروی استفاده شده است.

در این روش، الگوریتم شبکه عصبی و منطق فازی به گونه‌ای ترکیب شده‌اند که از مزایای هر دو برای آموزش یک الگوریتم جدید بهره گرفته شده است. از آنجایی که داده‌های آزمایشگاهی دارای درجه‌ای از درستی هستند استفاده از منطق فازی برای بیان داده‌ها یک مزیت محسوب می‌شود. از طرفی مزیت شبکه عصبی در این است که با استفاده از داده‌های اولیه آموزش می‌بیند. این دو مزیت در روش انفیس جمع شده‌اند. از سامانه انفیس در بسیاری از مسائل کاربردی و صنعتی استفاده شده است، تعدادی از آنها به شرح ادامه است.

¹ Takagi-Sugeno-Kang

² Jang

³ Functional Graded Material

در سال ۲۰۱۳ سوگانتی^۱ و همکارش کیفیت فرآیند ساخت میکروسکوپی را با استفاده از انفیس پیش‌بینی کردند. انفیس و مدل‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی مبتنی بر انتشار برگشتی برای پیش‌بینی پاسخ‌های کیفیت خروجی در نظر گرفته شد و نتایج نشان داد که مدل انفیس کارایی بهتری دارد [۱۲].

در سال ۲۰۱۳ آیدین^۲ و همکارانش مدل انفیس را برای پیش‌بینی زبری سطح در فرآیند تراشکاری خشک فولاد زد زنگ به کار گرفتند. رویکرد پیشنهادی مبتنی بر یک سامانه‌ی انفیس با یادگیری بهینه‌سازی ازدحام ذرات بوده است. زبری سطح و دمای منطقه‌ی برش پیش‌بینی‌شده توسط سامانه‌ی انفیس مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات با مقادیر اندازه‌گیری شده حاصل از مجموعه‌ی داده‌های آزمایش مقایسه شده‌اند. نتایج آزمایش نشان داده که زبری سطح پیش‌بینی شده و دمای منطقه‌ی برش با زبری و دما اندازه‌گیری شده مطابقت خوبی داشته‌اند [۱۳].

در سال ۲۰۱۹ کومار^۳ و همکارانش از سامانه‌ی استنتاج عصبی- فازی تطبیقی برای بهینه‌سازی چند هدفه ساخت سیم‌های میکرو طی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی، حین ماشین‌کاری میکرو، استفاده کردند. برای بهبود بهره‌وری با پرداخت سطح بالاتر از آلیاژ تیتانیوم و با استفاده از سامانه‌ی انفیس، بهینه‌سازی چند پارامتری برای یافتن راه‌حل بهینه برای ماشین‌کاری انجام شده است. زبری سطح به عنوان پاسخ خروجی در نظر گرفته شد و عملکرد ماشین‌کاری توسط سامانه تحلیل شده است و حداقل میانگین درصد خطا را نشان داده است [۱۴].

در سال ۲۰۲۰ مؤیدی^۴ و همکارانش با هدف بهینه‌سازی سامانه‌ی انفیس با دو الگوریتم بهینه‌سازی، یعنی الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای محاسبه‌ی نسبت ظرفیت اصطکاک (α) در محورهای انتقال قدرت را بررسی کردند [۱۵].

در سال ۲۰۲۰ بهیرادی^۵ و همکارانش مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را با استفاده از مدل انفیس انجام دادند. ارتباط پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی میکرو، رفتاری غیرخطی دارند، بنابراین مدل‌سازی ریاضی کار دشواری است. بنابراین، برای غلبه بر این مشکل از انفیس استفاده شده است و این مدل در کاهش خطا در کیفیت سوراخ‌کاری، کارایی بسیار خوبی دارد [۱۶].

در سال ۲۰۲۱ زو^۶ و همکارانش انفیس را برای تخمین سایش ابزار پیشنهاد داده‌اند. این مدل با بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود یافته آموخته شده است. نتایج تجربی نشان داده که انفیس، عملکرد خوبی برای تخمین سایش ابزار در مقایسه با سایر مدل‌های هوشمند داشته است. مدل پیشنهادی به عنوان یک مدل هوشمند برای نظارت بر سایش ابزار در زمان واقعی استفاده شده است [۱۷].

در سال ۲۰۲۳ طهماسبی و گه‌ری با استفاده از شبکه‌ی عصبی، شبیه‌ساز کنترل‌گر تطبیقی برای یک بازوی انعطاف طراحی کردند [۱۸].

در سال ۲۰۲۳، جی^۷ و همکارانش با استفاده از انفیس عمق برش روی قطعه کار آلیاژ تیتانیوم طی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی با کمک ارتعاش را پیش‌بینی کردند [۱۹].

در سال ۲۰۲۳ محمدی و علی‌اصغری با استفاده از انفیس خواص حرارتی- مکانیکی در نانوکامپوزیتها را پیش‌بینی کردند [۲۰].

¹ Suganthi

² Aydin

³ Kumar

⁴ Moayedi

⁵ Bhiradi

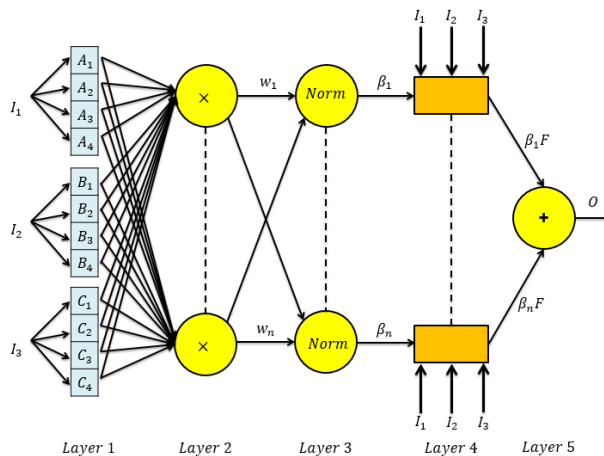
⁶ Xu

⁷ Ji

در این مقاله یک تیر یکسرگیردار کرومی در مقیاس نانو تحت نیروی منفرد قرار می‌گیرد، محل اعمال این نیرو در طول تیر جابجا می‌شود و خیز در محل اعمال نیرو به دست می‌آید (شکل ۲). با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی، سامانه انفیس آموزش داده می‌شود و با استفاده از آن، خیز نانو تیر با ویژگی و نیروهای مختلف محاسبه می‌شود. برای آموزش انفیس از نتایج آزمایشگاهی استفاده شده و نتایج نشان داده که پدیده $Overfitting$ رخ نداده است. نوآوری این مقاله این است که با استفاده از تعداد محدود داده تجربی، انفیس با دقت خوبی برای تحلیل خیز نانو تیر آموزش می‌بیند. بنابراین در مسائلی که اطلاعات رفتاری زیادی از سیستم در دسترس نباشد مدل انفیس کارآمد است و باعث کاهش نیاز به تعداد آزمایش‌های اولیه و کاهش هزینه و زمان می‌شود.

سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی

در روش انفیس، الگوریتم شبکه عصبی و منطق فازی به گونه‌ای ترکیب شده‌اند که از مزایای هر دو برای آموزش یک الگوریتم جدید بهره گرفته شده و در نهایت از آن برای پیش‌بینی نتایج استفاده می‌گردد [۲۱].



شکل ۱. طرح شماتیک مدل انفیس [۲۱].

مدل انفیس از مجموعه‌ای از قوانین شرطی استفاده کرده است که ویژگی آنها با استفاده از شبکه عصبی اصلاح شده است. در این روش مرکز توابع عضویت، نقاط شروع و پایان آنها به روشی هوشمند با استفاده از شبکه عصبی اصلاح گردیده است. برای این مجموعه پنج لایه مختلف (همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است) تعریف گردیده، که به شرح زیر است [۲۱]:

– **لایه اول** که به عنوان لایه فازی‌سازی ورودی تعریف شده است. مقادیر ورودی را با استفاده از برخی توابع عضویت به مجموعه‌ای از قوانین فازی تبدیل کرده است. به عنوان مثال، با استفاده از یک تابع زنگوله‌ای شکل عمومی برای ورودی‌ها، معادلات ۱ تا ۳ به ترتیب برای ورودی اول و سوم نوشته شده‌اند:

$$\mu A_i(I_1) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{I_1 - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \times b_i} \quad (1)$$

$$\mu B_i(I_2) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{I_2 - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \times b_i} \quad (2)$$

$$\mu C_i(I_3) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{I_3 - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \times b_i} \quad (3)$$

در این معادلات μA_i ، μB_i و μC_i توابع عضویت، I_1 ، I_2 و I_3 متغیرهای ورودی و a_i ، b_i و c_i پارامترهای متغیر در بازه (۱-۰) در نظر گرفته شده‌اند.

– **لایه دوم** ایجاد توان (وزن) برای قوانین را ایجاد کرده است. یعنی این لایه به عنوان “لایه قانون” تعریف شده و سیگنال خروجی با ضرب سیگنال‌های ورودی با عملگرهای فازی به صورت معادله ۴ محاسبه شده است:

$$w_i = \mu A_i(I_1) \times \mu B_i(I_2) \times \mu C_i(I_3); \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

که در آن w_i توابع وزن بوده و گره‌ها، گره‌های قانون نامیده شده‌اند.

– در **لایه سوم** وزن هر گره به صورت معادله ۵ برای هر نورون محاسبه و نرمال گردیده است:

$$N_i = \frac{w_i}{\sum w_i}; \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (5)$$

– در **لایه چهارم** کمیت‌های فازی، فازی زدایی شده‌اند. هر گره حاوی یک گره تطبیقی با یک تابع است که به صورت معادله ۶، قوانین فازی با توابع ترکیبی نشان داده شده است:

$$N_i \times F_i = N_i \cdot (p_i \cdot (I_1) + q_i \cdot (I_2) + r_i \cdot I_3); \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

که در آن N_i وزن گره نرمال شده، F_i قوانین فازی، p_i ، q_i و r_i مجموعه پارامترهای هر گره را نشان داده است.

– در **لایه ۵** خروجی سامانه بر اساس مجموع تمام سیگنال‌های دریافتی به صورت معادله ۷ محاسبه گردیده است:

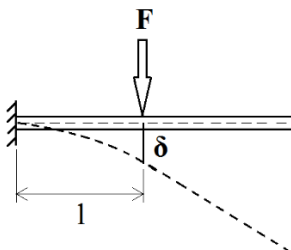
$$O = \sum_i N_i \times F_i \quad (7)$$

محاسبه خیز تیر با استفاده از جعبه ابزار انفیس در نرم‌افزار متلب

در این مقاله با استفاده از جعبه ابزار انفیس موجود در نرم افزار متلب برای محاسبه خیز نانوتیر استفاده شده است. برای این منظور از تعداد ۳ تابع عضویت مثلثی برای هر ورودی استفاده گردیده است. همچنین ۳۵ گره، ۹ پارامتر خطی، ۱۸ پارامتر غیرخطی نیز استفاده شده‌اند. برای بررسی خطا، از رابطه خطای میانگین جذر مربعات به صورت معادله ۸ استفاده شده است:

$$Error = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta_{E,i} - \delta_{A,i})^2} \quad (8)$$

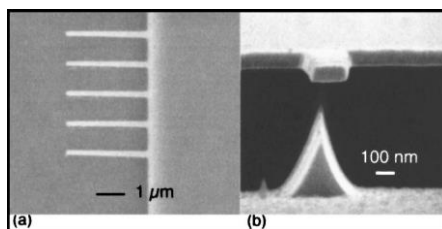
که در این رابطه n تعداد خیزهای مورد بررسی، δ_E خیز تجربی و δ_A خیز پیش‌بینی شده با مدل انفیس است. مطابق شکل ۲ نیرو در فاصله طول مشخص، یعنی l از ابتدای تیر وارد شده و خیز، یعنی δ در همان نقطه اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲. بارگذاری F و خیز δ در تیر نانو.

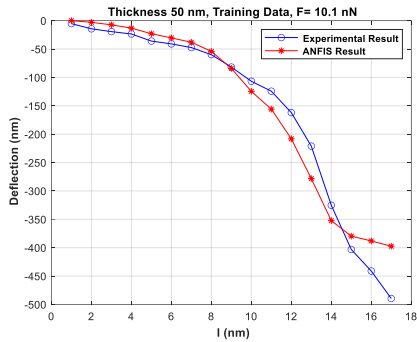
در این مدل‌سازی ابتدا یک نانوتیر با ضخامت 50 نانومتر در نظر گرفته شده است. با اعمال نیرو F در طول تیر و نتایج آزمایشگاهی سامانه انفیس آموزش داده شده و مورد آزمون واقع شده است. نیرو F در طول تیر جابجا شده و در همان نقطه خیز، یعنی δ با آزمایش به‌دست آمده است. خیز به‌دست آمده در شکل ۳ الف و ب با منحنی آبی رنگ نشان داده شده است.

در مرجع [۲۲]، نانوتیر یکسرگردار کرومی تحت نیروی جانبی قرار می‌گیرد و در محل اعمال نیرو، جابجایی جانبی تیر اندازه‌گیری می‌شود، این آزمایش توسط یک میکروسکوپ نیروی اتمی در تماس با نانوتیرهای کرومی نازک با ضخامت زیر 100 نانومتر انجام شده است (شکل ۳).

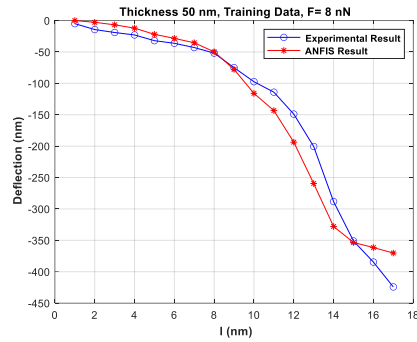


شکل ۳. نمای جانبی (a) و روبرو (b)، تماس میکروسکوپ نیروی اتمی با نانوتیرهای کرومی [۲۲].

بر اساس داده‌های آزمایشگاهی نانوتیر کرومی مرجع [۲۲]، مربوط به اعمال نیروهای 8 و $10/1$ نانونیوتن، سامانه انفیس آموزش دیده است. در ادامه، خیز محاسبه شده با استفاده از سامانه با منحنی قرمز در شکل ۴-الف و ب نشان داده است. به منظور اعتبارسنجی مدل در این مقاله، خیز حاصل از نیروی $9/4$ نانونیوتن در طول تیر با استفاده از مدل آموزش داده شده، محاسبه گردیده است (منحنی قرمز شکل ۵) و با نتایج آزمایشگاهی (منحنی آبی شکل ۵) مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که خطای انفیس، برای محاسبه خیزهای نانوتیر کرومی به ضخامت 50 نانومتر و به ازای نیروهای 8 ، $9/4$ و $10/1$ نانونیوتن، به ترتیب $4/71$ ، $4/99$ و $5/45$ درصد است.

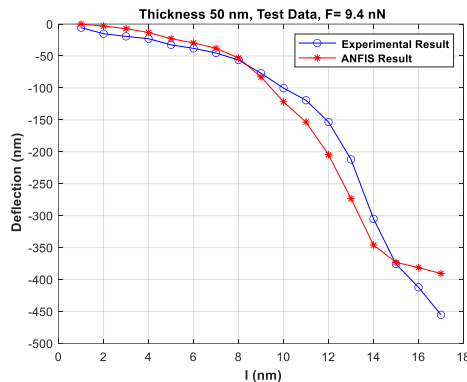


(ب)



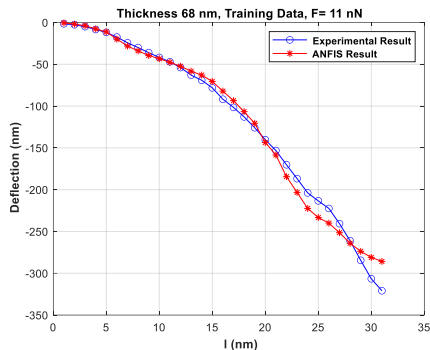
(الف)

شکل ۴. قیاس خیزهای سامانه انفیس (خط و دایره آبی رنگ) و داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده برای آموزش سامانه، برای نانوتیر با ضخامت تیر ۵۰ نانومتر، و نیروهای (الف) ۸ نانونیوتن، و (ب) ۱۰/۱ نانونیوتن.

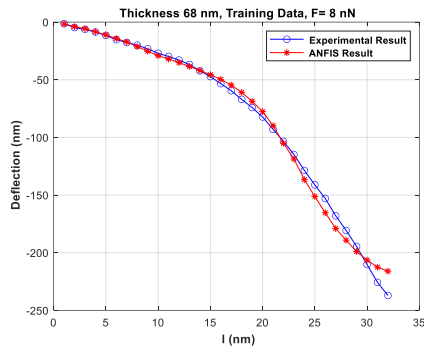


شکل ۵. قیاس خیزهای سامانه انفیس (خط و دایره آبی رنگ) و داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده برای آزمودن سامانه، برای نانوتیر با ضخامت تیر ۵۰ نانومتر، تحت نیروی ۹/۴ نانونیوتنی.

در ادامه این مقاله، یک نانوتیر با ضخامت ۶۸ نانومتر در نظر گرفته شده است. این نانوتیر تحت نیروهای ۸ و ۱۱ نانونیوتن قرار گرفته است. سپس، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی نانوتیرهای کرومی مرجع [۲۲]، سامانه انفیس آموزش دیده است. نتایج با داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۶ مقایسه شده‌اند. سپس با استفاده از این مدل نتایج نیروی ۹/۵ نانونیوتن برای آزمودن درون‌یابی استفاده شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند (شکل ۶ الف). همچنین، نتایج نیروی ۱۲/۵ نانونیوتن برای آزمودن برون‌یابی مورد استفاده قرار گرفته و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند (شکل ۶ ب). مقایسه نتایج نشان می‌دهد که درصد خطای انفیس، برای محاسبه خیزهای نانوتیر کرومی به ضخامت ۶۸ نانومتر و به ازای نیروهای ۸، ۹/۵، ۱۱ و ۱۲/۵ نانونیوتن، به ترتیب ۱/۴۱، ۱/۷۳، ۱/۷۶ و ۲/۳ درصد است.

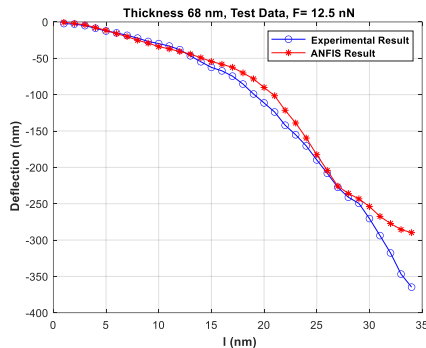


(ب)

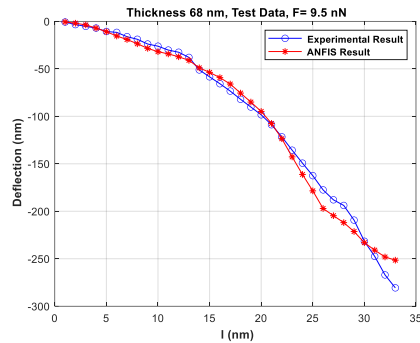


(الف)

شکل ۶. قیاس خیزهای سامانهٔ انفیس (خط و دایره آبی رنگ) و داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده برای آموزش سامانه، برای نانوتیر با ضخامت تیر ۶۸ نانومتری، و نیروی (الف) ۸ نانونیوتن، (ب) ۱۱ نانونیوتن.



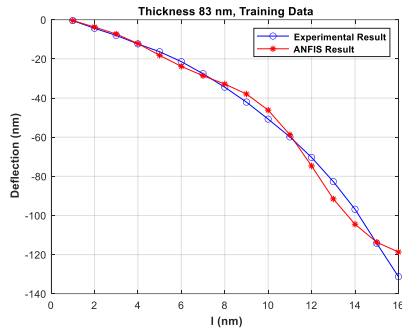
(ب)



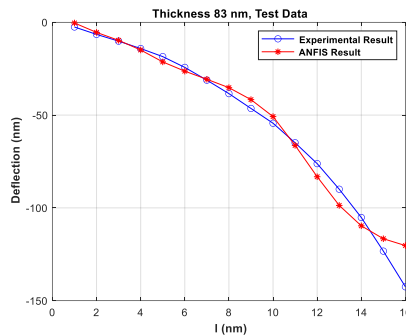
(الف)

شکل ۷. قیاس خیزهای سامانهٔ انفیس (خط و دایره آبی رنگ) و داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده برای آزمودن سامانه، برای نانوتیر با ضخامت تیر ۶۸ نانومتری، و (الف) نیروی ۹/۵ نانونیوتن، (ب) نیروی ۱۲/۵ نانونیوتن.

برای تکمیل روند مقایسه و اطمینان از نتایج، یک نانوتیر کرومی با ضخامت ۸۳ نانومتر، مطابق مرجع [۲۲] در نظر گرفته شده است. این نانوتیر تحت نیروی ثابت ۸ نانونیوتن قرار گرفته است و محل اعمال نیرو در طول تیر جابجا شده است. این جابجایی در ۳۲ نقطه در طول نانوتیر اعمال گردیده است. نتایج ۱۶ نقطه به صورت یکی در میان به منظور آموزش سامانهٔ انفیس استفاده شده است. در ادامه، با استفاده از آن، خیز ۱۶ نقطه دیگر محاسبه گردیده است. نتایج آزمایشگاهی نقاط با شماره فرد برای آموزش سامانه استفاده شده است و با نتایج سامانه مقایسه گردیده‌اند (شکل ۷). سپس، با استفاده از این مدل آموزش داده شده، خیز نقاط با شماره زوج محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند (شکل ۸). مقایسهٔ نتایج نشان می‌دهد که درصد خطای انفیس، برای محاسبهٔ خیزهای نانوتیر کرومی به ضخامت ۸۳ نانومتر، به ازای نیروی ۸ نانونیوتن و برای داده‌های مورد استفاده برای آموزش و آزمودن سامانه به ترتیب ۲/۴۵ و ۳/۱۷ درصد است.



شکل ۸. قیاس خیزهای سامانهٔ انفیس (خط و دایره آبی رنگ) و داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده برای آموزش سامانه، برای نانوتیر با ضخامت تیر ۸۳ نانومتری با اعمال نیروی ۸ نانونیوتنی.



شکل ۹. قیاس خیزهای سامانهٔ انفیس (خط و دایره آبی رنگ) و داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده برای آزمودن سامانه، برای نانوتیر با ضخامت تیر ۸۳ نانومتری با اعمال نیروی ۸ نانونیوتنی.

در جدول ۱ درصد خطای میانگین جذر مربعات پیش‌بینی داده‌های تجربی مربوط به آموزش و داده‌های تجربی مربوط به آزمودن سامانهٔ انفیس، در حالت‌های مربوط به هر ضخامت، آورده شده است. درصد خطای میانگین جذر مربعات کل برای همه ضخامت‌ها و همه داده‌ها مقدار ۲/۸۸ درصد بدست آمد.

جدول ۱. درصد خطای میانگین جذر مربعات سامانه انفیس در پیش‌بینی خیزهای تجربی نانوتیرهای کروی در دو حالت، الف) داده‌های استفاده شده برای آموزش سامانه و ب) داده‌های استفاده شده برای آزمودن سامانه.

ضخامت نانوتیر (nm)	میانگین درصد خطای پیش‌بینی داده‌های آموزش (٪)	میانگین درصد خطای پیش‌بینی داده‌های آزمودن (٪)
۵۰	۴/۸۷	۴/۷۹
۶۸	۱/۶۱	۲/۶۶
۸۳	۲/۴۵	۳/۱۷

نتیجه گیری

در این مقاله رفتار نانتیرهای کرومی یکسر گیردار، به شکل محاسبه خیز نانتیرها در اثر نیروی متمرکز، بررسی شده است. برای محاسبه خیز نانتیرها به دلیل شرایط تکیه گاهی خاص و عدم قطعیت در تحلیل رفتار آن، روش های هوشمند در کنار آزمایش می تواند منجر به کاهش هزینه و زمان در محاسبه نتایج مشابه گردند. برای محاسبه نتایج در این مقاله از جعبه ابزار انفیس متلب استفاده شده است. به سه حالت مختلف، انفیس آموزش داده شده و مورد آزمون واقع گردیده است.

در **حالت اول**، با نتایج آزمایشگاهی به ازای دو نیروی مختلف، سامانه انفیس آموزش داده شده است، سپس از آن سامانه برای محاسبه خیز نانتیر با ضخامت ۵۰ نانومتر (به صورت درون یابی) استفاده شده است. در این حالت درصد خطای میانگین ۴/۸۴ درصد به دست آمد.

در **حالت دوم**، با استفاده از خیزهای آزمایشگاهی نانتیر به ضخامت ۶۸ نانومتر، به ازای دو نیروی مختلف -سامانه آموزش داده و با استفاده از آن، خیزهای مربوط به دو نیروی دیگر، به صورت میان یابی و برون یابی محاسبه شده است. درصد خطا، در این حالت ۱/۷۶ درصد به دست آمد.

در **حالت سوم**، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، در نقاط مختلف، نانتیر به ضخامت ۸۳ نانومتر، به صورت یک در میان، برای آموزش سامانه استفاده شده و مابقی نتایج خیز برای آزمون سامانه به کار برده شده است. درصد خطا در این حالت، ۲/۷۵ درصد به دست آمد.

دلیل کاهش خطا با افزایش ضخامت، به این علت است که با افزایش ضخامت نانتیر، خیزها کاهش می یابند و در نتیجه خطا هم کمتر می شود و به صورت مشابه با افزایش نیرو خطاها بیشتر می شوند (به دلیل افزایش مقادیر خیز). مقایسه نتایج و بررسی خطاهای مدل انفیس، در پیش بینی خیزهای نانتیرهای کرومی، اعتبار و دقت قابل قبول آن را نشان می دهد. از خطاهای ذکر شده در جدول ۱ می توان دریافت که خطای پیش بینی خیز نانومتر، هم در مرحله آموزش و هم در مرحله آزمون دارای خطایی کم، مشابه و قابل قبول است.

References

- [1] Jang, J. S. R. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), 665-685. <https://doi.org/10.1109/21.256541>
- [2] Di Carlo, S., Bonvicini, G., Althubiti, N. A., Ayad, R., De La Cruz-Burelo, E., Domínguez, I., El Bashir, B. O., Farhat, H., Flanagan, J., Gillard, R., Gamez, S. I., Kanazawa, K., Kumara, K., Liventsev, D., Podesta-Lerma, P. L. M., Ricalde-Herrmann, D., Perez, D. R., Tejada-Muñoz, G., Tobiyama, M., & De La Cruz, I. H. (2022). A Neural Network approach to reconstructing SuperKEKB beam parameters from beamstrahlung. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1042(1), 167453. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167453>
- [3] Karlik, B., Özkaya, E. A., Aydin, S., & Pakdemirli, M. (1998). Vibrations of a beam-mass systems using artificial neural networks. *Computers & Structures*, 69(3), 339-347. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00126-6)
- [4] Cheng, X., Al-Khafaji, S. H., Hashemian, M., Ahmed, M., Eftekhari, S. A., Alanssari, A. I., diaa, N. M., Karim, M. M., Toghraie, D., & Alawadi, A. H. (2023). Statistical analysis and Neural Network Modeling of functionally graded porous nanobeams vibration in an elastic medium by considering the surface effects. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, 106313. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106313>

- [5] Zheng, Y., Chu, L., Dui, G., & Zhu, X. (2023). The deflection platform phenomenon of functionally graded flexoelectric simply supported nanobeam. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 34(12), 1406-1423. <https://doi.org/10.1177/1045389x221142088>
- [6] Vosoughi, A., & Nikoo, M. (2018). A new mixed method for nonlinear fuzzy free vibration analysis of nanobeams on nonlinear elastic foundation. *Journal of Vibration and Control*, 24(24), 5765-5773. <https://doi.org/10.1177/1077546316648491>
- [7] Rajaei, A., Chizfahm, A., Vatankhah, R., & Montazeri, A. (2022). Adaptive self-organizing fuzzy sliding mode controller for a nonlocal strain gradient nanobeam. *European Journal of Control*, 65, 100626. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2022.100626>
- [8] Jiang, Y., Li, L., & Hu, Y. (2022). A nonlocal surface theory for surface–bulk interactions and its application to mechanics of nanobeams. *International Journal of Engineering Science*, 172, 103624. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2022.103624>
- [9] Nuhu, A. A., & Safaei, B. (2022). State-of-the-Art of Vibration Analysis of Small-Sized Structures by using Nonclassical Continuum Theories of Elasticity. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(7), 4959-5147. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09754-3>
- [10] Wong, E. W., Sheehan, P. E., & Lieber, C. M. (1997). Nanobeam Mechanics: Elasticity, Strength, and Toughness of Nanorods and Nanotubes. *Science*, 277(5334), 1971-1975. <https://doi.org/10.1126/science.277.5334.1971>
- [11] Houshmand, F. (2023). Study of the Behavior of Graphdiyne Nanotubes in an Aqueous Environment: Car-Parrinello Molecular Dynamics Simulation. *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, 20(3), 683-699. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.382432.2433>
- [12] Suganthi, X. H., Natarajan, U., Sathiyamurthy, S., & Chidambaram, K. (2013). Prediction of quality responses in micro-EDM process using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(1), 339-347. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4731-5>
- [13] Aydın, M., Karakuzu, C., Uçar, M., Cengiz, A., & Çavuşlu, M. A. (2013). Prediction of surface roughness and cutting zone temperature in dry turning processes of AISI304 stainless steel using ANFIS with PSO learning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(1), 957-967. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4540-2>
- [14] Kumar, S., Dhanabalan, S., & Narayanan, C. S. (2019). Application of ANFIS and GRA for multi-objective optimization of optimal wire-EDM parameters while machining Ti–6Al–4V alloy. *Springer Nature Applied Sciences*, 1(4), 298. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0195-z>
- [15] Moayedi, H., Raftari, M., Sharifi, A., Jusoh, W. A. W., & Rashid, A. S. A. (2020). Optimization of ANFIS with GA and PSO estimating α ratio in driven piles. *Engineering with Computers*, 36(1), 227-238. <https://doi.org/10.1007/s00366-018-00694-w>
- [16] Bhiradi, I., Raju, L., & Hiremath, S. S. (2020). Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS): modelling, analysis, and optimisation of process parameters in the micro-EDM process. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 6(1), 133-145. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2019.1709309>
- [17] Xu, L., Huang, C., Li, C., Wang, J., Liu, H., & Wang, X. (2021). Estimation of tool wear and optimization of cutting parameters based on novel ANFIS-PSO method toward

- intelligent machining. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(1), 77-90. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01559-0>
- [18] Tahmasebi, M., & Gohari, M. (2023). Design and Simulation of an Adaptive Neuro-Controller for a Wire Driven Flexible Arm Robot. *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, 20(1), 243-262. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.361179.2280>
- [19] Ji, M., Muthuramalingam, T., Saravanakumar, D., Karmiris-Obratański, P., Karkalos, N. E., & Zhang, W. (2023). Predicting depth of cut in vibration-assisted EDM cutting on titanium alloy using adaptive neuro fuzzy inference system. *Measurement*, 219(5), 113245. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113245>
- [20] Mohamadi, M., & Aliasghary, M. (2023). Adaptive neuro-fuzzy inference system approach to predict dynamic thermo-mechanical responses of poly (vinylidene fluoride) blend-based nanocomposites. *Polymer Bulletin*, 80(6), 6989-7010. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04384-y>
- [21] Rao, T. B. (2023). Prediction of EDMed micro-hole quality characteristics using hybrid bio-inspired machine learning-based predictive approaches. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* 17(2), 747-764. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-01117-3>
- [22] Nilsson, S. G., Borrisé, X., & Montelius, L. (2004). Size effect on Young's modulus of thin chromium cantilevers. *Applied Physics Letters*, 85(16), 3555-3557. <https://doi.org/10.1063/1.1807945>