



طراحی کنترل کننده مد لغزشی ترمینال زمان محدود هوشمند با کاربرد در میکروسکوپ نیروی اتمی

یاسر نیکو¹، بهروز رضایی^{2*}، زهرا رحمانی³

- 1- کارشناس ارشد، مهندسی برق - کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
 2- استادیار، مهندسی برق - کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
 3- استادیار، مهندسی برق - کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
 * بابل، صندوق پستی 484، brezaie@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 04 آبان 1394
 پذیرش: 22 آذر 1394
 ارائه در سایت: 23 دی 1394

کلید واژگان:

کنترل ارتعاشات
 کنترل مد لغزشی ترمینال
 سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی
 الگوریتم زنبور
 میکروسکوپ نیروی اتمی برای دستکاری نانو

چکیده

در این مقاله، یک کنترل کننده مقاوم هوشمند برای کنترل کلاسی از سیستم‌های غیرخطی دارای عدم قطعیت و اغتشاشات خارجی کراندار با دامنه محدود پیشنهاد می‌شود. روش پیشنهادی براساس ترکیب کنترل مد لغزشی ترمینال و سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی با آموزش مبتنی بر الگوریتم زنبور استوار است. برای این منظور، ابتدا یک سطح لغزش غیرخطی بر اساس روش کنترل مد لغزشی ترمینال سریع طراحی می‌گردد. این سطح لغزش به عنوان ورودی برای کنترل کننده هوشمند که یک سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی است، در نظر گرفته می‌شود و به کمک آن، قانون کنترل مد لغزشی ترمینال بدون در نظر گرفتن بخش سوئیچینگ تقریب زده می‌شود. در روش پیشنهادی، از الگوریتم زنبور عسل برای به روزرسانی وزن‌ها در سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی استفاده می‌گردد. از مزایای کنترل کننده پیشنهادی نسبت به کنترل کننده مد لغزشی ترمینال سریع، می‌توان به قوام کنترل کننده پیشنهادی در برابر عدم قطعیت و اغتشاش، ساختار ساده کنترل کننده، سرعت همگرایی بالاتر نسبت به روش‌های مرسوم مشابه و عدم وجود پدیده چترینگ در تلاش کنترلی اشاره نمود. روش مورد مطالعه بر روی سیستم میکروسکوپ نیروی اتمی که برای دستکاری نانو کاربرد دارد، شبیه‌سازی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی قوام و عملکرد مناسب روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

Designing an intelligent finite-time terminal sliding mode controller with application to atomic force microscope

Yasser Nikoo, Behrooz Rezaie*, Zahra Rahmani

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

* P.O.B. 484, Babol, Iran, brezaie@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 26 October 2015
 Accepted 13 December 2015
 Available Online 13 January 2016

Keywords:

Vibration control
 Terminal sliding mode control
 Adaptive neuro-fuzzy inference system
 Bee's algorithm
 Atomic force microscope for nano manipulation

ABSTRACT

In this paper, an intelligent robust controller is proposed for a class of nonlinear systems in presence of uncertainties and bounded external disturbances. The proposed method is based on a combination of terminal sliding mode control and adaptive neuro-fuzzy inference system with bee's algorithm training. For this purpose, a sliding surface is firstly designed based on terminal sliding control method. This sliding surface is considered as input for the intelligent controller which is an adaptive neuro-fuzzy inference system and using it, terminal sliding mode control law without the switching part is approximated. In the proposed method, an intelligent bee's algorithm is also used for updating the weights of the adaptive neuro-fuzzy inference system. Compared with fast terminal sliding mode control, the proposed controller provides advantages such as robustness against uncertainty and disturbance, simplicity of controller structure, higher convergence speed compared with similar conventional methods and chattering-free control effort. The method is applied to an atomic force microscope for nano manipulation. The simulation results show the robustness and effectiveness of the proposed method.

1- مقدمه

یکی از روش‌های پرکاربرد در کنترل غیرخطی، روش کنترل مد لغزشی (SMC) است. این روش، به عنوان یک روش مقاوم با کارایی کنترلی قابل قبول در محدوده وسیعی از سیستم‌های غیرخطی، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [1-4]. از مشکلات عمده در روش کنترل مد

لغزشی پدیده چترینگ است که می‌تواند باعث عملکرد نامناسب سیستم و گاهی آسیب به سیستم شود و مشکل دیگر عدم پایداری مجانبی زمان محدود است [1]. در سال 1993 میلادی، کنترل مد لغزشی ترمینال (TSMC)¹ به منظور حل مشکل پایداری مجانبی در زمان محدود پیشنهاد

1- Terminal Sliding Mode Control

Please cite this article using:

Y. Nikoo, B. Rezaie, Z. Rahmani, Designing an intelligent finite-time terminal sliding mode controller with application to atomic force microscope, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 269-279, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Y. Nikoo, B. Rezaie, Z. Rahmani, Designing an intelligent finite-time terminal sliding mode controller with application to atomic force microscope, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 269-279, 2016 (in Persian)

شد [5-7].

آموزش و به‌روزرسانی پارامترها در ANFIS مشابه یک سیستم عصبی در بیشتر موارد مبتنی بر روش گرادیان نزولی است، اما مشکل اصلی در روش گرادیان این است که ممکن است منجر به مینیمم محلی شود. معمولاً همگرایی پارامترها در این روش، بسیار آهسته و وابسته به شرایط اولیه پارامترها است و همچنین پیدا کردن بهترین نرخ یادگیری نیز به طور معمول کاری بسیار دشوار است [24]. برای رفع این مشکل، روش‌های متفاوتی برای به‌روزرسانی وزن‌ها در ANFIS پیشنهاد گردیده است [25-30]. شوره‌دلی و همکاران⁸ روش‌های ترکیبی متفاوتی براساس ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)⁹ و گرادیان نزولی [25]، حداقل مربعات بازگشتی (RLS)¹⁰ [26] و نیز فیلتر کالمن گسترش یافته (EKF)¹¹ [27] برای آموزش در ANFIS پیشنهاد نموده‌اند. تورکی و همکاران¹² [28] بهینه‌سازی کلیه پارامترهای ANFIS را با استفاده از الگوریتم PSO پیشنهاد نمودند. در [29] یک روش جدید برای آموزش در ANFIS براساس الگوریتم‌های سیر تکاملی دیفرانسیلی¹³ معرفی گردید. در [30] نیز برای به‌روزرسانی وزن‌ها در ANFIS از الگوریتم کلونی مورچه¹⁴ استفاده شد.

در این مقاله، به منظور دستیابی به پایداری مجانبی در زمان محدود برای یک کلاس از سیستم‌های غیرخطی، برای اولین بار روش کنترل مد لغزشی ترمینال سریع با روش ANFIS با آموزش مبتنی بر الگوریتم زنبور ترکیب می‌گردد. در روش پیشنهادی، سطح لغزش ترمینال به صورت غیرخطی مشخص می‌گردد و این سطح به عنوان ورودی ANFIS در نظر گرفته می‌شود، که باعث می‌شود همگرایی زمان محدود به دست آید. آموزش و به‌روزرسانی وزن‌ها در ANFIS، مبتنی بر الگوریتم زنبور است. به‌علاوه ANFIS برای تقریب قانون کنترل ناشی از کنترل مد لغزشی ترمینال سریع به کار می‌رود و به کمک این سیستم، به راحتی می‌توان به نامعینی و اغتشاشات موجود در سیستم غلبه نمود. پایداری زمان محدود نیز بر اساس قضیه پایداری لیپانوف تأمین می‌گردد. از مزایای روش ارائه شده در این مقاله می‌توان به قوام روش در مقابل عدم قطعیت و اغتشاشات کراندار، همگرایی زمان محدود خطا و عدم وجود چترینگ در تلاش کنترلی اشاره نمود. از آنجایی که فقط سطح لغزش ترمینال به عنوان ورودی ANFIS استفاده می‌شود، ساختار ANFIS ساده است و روش پیشنهادی برای حالتی که دینامیک سیستم در دسترس نمی‌باشد و یا نامعلوم است، به راحتی قابل استفاده است. روش پیشنهادی برای شبیه‌سازی در میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)¹⁵ برای دستکاری نانو به کار برده می‌شود و مقایسه‌ای بین روش کنترل مد لغزشی معمولی، کنترل مد لغزشی ترمینال و روش پیشنهادی نیز صورت می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مناسب روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

به طور کلی نوآوریهای مقاله عبارتند از:

- ترکیب روش FTSMC با ANFIS برای کسب مزایای دو روش مانند همگرایی زمان محدود و سریع، عدم وابستگی به مدل، قوام در برابر نامعینی و اغتشاش، کاهش چترینگ و سادگی
- افزایش دقت تقریب ANFIS با الگوریتم زنبور برای تنظیم پارامترهای ANFIS و در نتیجه کاهش مضاعف چترینگ

کنترل مد لغزشی ترمینال براساس طراحی یک سطح لغزشی غیرخطی بازگشتی که همگرایی زمان محدود را تضمین می‌نماید، بنا نهاده شده است. روش کنترل مد لغزشی ترمینال اولیه دارای مشکلاتی از قبیل منفرد بودن سطح لغزش و سرعت همگرایی پایین، وقتی که حالت‌های اولیه از نقطه تعادل دور هستند، می‌باشد. به همین علت، روش‌های دیگری که از ایده اولیه کنترل لغزشی ترمینال نشأت می‌گرفت، پیشنهاد گردید. از جمله این روش‌ها می‌توان به کنترل مد لغزشی ترمینال غیرمنفرد (NTSMC)¹ [8]، کنترل مد لغزشی ترمینال سریع (FTSMC)² [9] و کنترل مد لغزشی ترمینال غیرمنفرد و سریع (FNTSMC)³ [10] اشاره نمود. هر کدام از روش‌های کنترل مد لغزشی ترمینال با توجه به اهداف مورد نظر در طراحی استفاده می‌شود. به عنوان مثال اگر پاسخ سریع برای سیستم مد نظر باشد و درجه سیستم بالا نباشد، کنترل مد لغزشی ترمینال سریع برای اهداف طراحی مناسب خواهد بود.

البته یکی از مشکلات روش کنترل مد لغزشی، همان‌گونه که عنوان شد، پدیده چترینگ است که به دلیل ناپیوسته بودن قانون کنترل به وجود می‌آید و در کنترل مد لغزشی ترمینال هم وجود دارد. پدیده چترینگ باعث بروز برخی مشکلات از جمله به اشباع رفتن محرک‌های سیستم و داغ شدن قطعات مکانیکی می‌شود. یکی از راه‌های رفع این مشکل، استفاده از تئوری‌های هوش مصنوعی در روش کنترل مد لغزشی است.

معمولاً از کنترل کننده مبتنی بر منطق فازی (FLC)⁴ می‌توان برای کنترل در سیستم‌های غیرخطی و دارای عدم قطعیت بهره برد. FLC می‌تواند دانش تجربی را در قالب فرمول ریاضی ارائه کند. تعداد زیادی از محققان برای بهبود بخشیدن به عملکرد سیستم کنترل، از روش مد لغزشی در کنترل کننده فازی (SMFC)⁵ استفاده کرده‌اند [11-13] و از روش SMFC برای کاهش قوانین فازی و بهبود عملکرد سیستم حلقه بسته بهره برده‌اند. در مقابل تعدادی از محققان از روش‌های مبتنی بر منطق فازی، در کنترل کننده مد لغزشی برای کاهش پدیده چترینگ و خطا که در روش لغزشی وجود دارد، استفاده نموده‌اند و روش حاصل، به نام روش کنترل مد لغزشی فازی (FSMC)⁶ شناخته می‌شود [14-20].

یکی از سیستم‌های فازی پرکاربرد، سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS)⁷ است که دارای ساختاری مشابه یک شبکه عصبی است. یکی از کاربردهای این سیستم فازی، مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی است. در [21-23]، از ترکیب کنترل مد لغزشی کلاسیک و یا ترمینال و ANFIS استفاده گردیده است. در این مراجع قانون کنترل دارای دو بخش است که یک قسمت آن توسط کنترل مد لغزشی برای تأمین پایداری حلقه بسته و قسمت دیگر آن مبتنی بر روش ANFIS است که برای غلبه بر اغتشاش استفاده شده است. روش کنترل مد لغزشی دارای یک سطح لغزش معمولاً خطی می‌باشد که پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین می‌کند. با تنظیم پارامترهای کنترل کننده مد لغزشی می‌توان سرعت همگرایی پاسخ را سریعتر نمود، اما در این حالت بهره کنترلی افزایش پیدا خواهد کرد که باعث ایجاد چترینگ و بالطبع تلاش کنترلی خواهد شد.

8- Shoorehdeli et al.
9- Particle Swarm Optimization
10- Recursive Least Square
11- Extended Kalman Filter
12- Turki et al.
13- Differential Evolution Algorithm
14- Ant Colony Optimization Algorithm
15- Atomic Force Microscope

1- Nonsingular Terminal Sliding Mode Control
2- Fast Terminal Sliding Mode Control
3- Fast Nonsingular Terminal Sliding Mode Control
4- Fuzzy Logic Controller
5- Sliding Mode Fuzzy Controller
6- Fuzzy Sliding Mode Control
7- Adaptive Networked Fuzzy Inference System

ترمینال که دارای پاسخ سریعی است، کنترل مد لغزشی ترمینال سریع است که در این قسمت به معرفی این روش می‌پردازیم [9]. یک سیستم SISO غیرخطی دارای عدم قطعیت و اغتشاش کراندار را به صورت رابطه (1) در نظر بگیرید و فرض کنید خطای دنبال‌یابی به صورت رابطه (2) تعریف شود. در آن صورت دینامیک خطای دنبال‌یابی به صورت رابطه (4) قابل بیان خواهد بود:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = e_3 \\ \vdots \\ \dot{e}_n = f(x) + u + \Delta f(x) + d(t) \end{cases} \quad (4)$$

بنابراین هدف کنترلی پایدار سازی دینامیک خطای فوق می‌باشد.

مطابق روش TSMC، برای سیستم غیرخطی فوق، سطوح لغزش به صورت (5) تعریف می‌شوند:

$$\begin{cases} s_1 = \dot{s}_0 + \alpha_0 s_0 + \beta_0 s_0^{\frac{m_0}{n_0}} \\ s_2 = \dot{s}_1 + \alpha_1 s_1 + \beta_1 s_1^{\frac{m_1}{n_1}} \\ \vdots \\ s_{n-1} = \dot{s}_{n-2} + \alpha_{n-2} s_{n-2} + \beta_{n-2} s_{n-2}^{\frac{m_{n-2}}{n_{n-2}}} \end{cases} \quad (5)$$

در رابطه (5)، s_i ها نشان‌دهنده سطوح لغزش و $s_0 = e_1$ است. در این رابطه $n_i < m_i$ است و m_i و n_i اعدادی مثبت و فرد هستند. همچنین $\alpha_i \geq 0, \beta_i \geq 0$ برای $i = 0, 1, \dots, n-2$ فرض می‌گردند.

قضیه 1: برای سیستم (4)، در صورتی که سطوح لغزش به صورت (5) در نظر گرفته شوند و قانون کنترل به صورت رابطه (6) باشد:

$$u = -(f(x) + \sum_{i=0}^{n-2} (\alpha_i \frac{d^{n-i-1}}{dt^{n-i-1}}(s_i) + \beta_i \frac{d^{n-i-1}}{dt^{n-i-1}}(s_i^{\frac{m_i}{n_i}})) - \dot{x}_{dn}) + l \text{sign}(s_{n-1}) = u_{eq} + l \text{sign}(s_{n-1}) \quad (6)$$

که در این رابطه $l + \delta_1 + \delta_2 < 0$ و $l \in R^-$ است، آن‌گاه سیستم (4) در زمان محدود، t_n (زمان همگرایی)، به سطح لغزش $s_{n-1} = 0$ میل خواهد کرد و بر روی آن باقی خواهد ماند.

اثبات: جزئیات اثبات همگرایی به سطح لغزش در مرجع [9] آورده شده است. برای آن که حالت‌ها به سطح لغزش میل می‌نمایند، در این مرجع تابع لیاپانوف به صورت $V = \frac{1}{2} s_{n-1}^2$ انتخاب شده است و نشان داده شده است که زمان همگرایی t_n در نامساوی (7) صدق می‌کند:

$$t_n \leq \frac{|s_{n-1}(0)|}{-(l + \delta_1 + \delta_2)} \quad (7)$$

رابطه بالا نشان می‌دهد که حالت‌های سیستم (4) در زمان محدود t_n ، به سطح لغزش $s_{n-1} = 0$ میل خواهد کرد و بر روی آن باقی خواهد ماند. پاسخ سریع TSMC توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده است. اما یکی از اشکالات عمده آن که در کاربرد عملی بیشتر به چشم می‌خورد، پدیده چترینگ است. این اثر ممکن است رفتار نامطلوب بر روی سیستم کنترل شده داشته باشد و حتی موجب تخریب کامل آن شود. اشکال دیگر آن وابستگی به معادلات دینامیکی دقیق است. لذا برای رفع این مشکلات، در بخش بعد ترکیب روش کنترل مد لغزشی سریع و ANFIS برای اولین بار در این مقاله پیشنهاد می‌گردد.

3-2 ترکیب کنترل مد لغزشی ترمینال سریع و ANFIS

همان‌طور که گفته شد، مشکلات اصلی روش کنترل مد لغزشی ترمینال

• اعمال روش پیشنهادی به سیستم AFM

ساختار این مقاله به این صورت است که در بخش دوم، فرمول‌بندی مسأله مورد بحث در این مقاله آورده شده است. بخش سوم شامل توصیف روش کنترل مد لغزشی ترمینال سریع و بررسی پایداری این روش برای سیستم مورد نظر است. سپس چگونگی ترکیب کنترل‌کننده مبتنی بر ANFIS با کنترل مد لغزشی ترمینال سریع شرح داده می‌شود و پایداری روش اثبات می‌گردد. پس از آن الگوریتم زنبور و چگونگی اعمال آن به سیستم برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده پیشنهادی بیان می‌گردد. در بخش چهارم ابتدا سیستم مورد نظر برای شبیه‌سازی معرفی می‌گردد و سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده می‌شود و در نهایت نتیجه‌گیری مقاله در بخش پنجم آورده می‌شود.

2- فرمول‌بندی مسأله

در این مقاله یک کنترل‌کننده بر مبنای ترکیب روش سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی و کنترل مد لغزشی ترمینال برای یک کلاس از سیستم‌های غیرخطی که دارای ساختاری به صورت (1) است، پیشنهاد می‌گردد:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f(x) + u + \Delta f(x) + d(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه $x = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T \in R^n$ نشان‌دهنده بردارهای حالت سیستم می‌باشد، $y \in R, u \in R$ به ترتیب نشان‌دهنده ورودی و خروجی سیستم است. $f(x)$ تابع پیوسته، غیرخطی و مشتق‌پذیر است. همچنین Δf بیانگر عدم قطعیت کراندار و $d(t)$ بیانگر اغتشاش خارجی کراندار است، به طوری که $|\Delta f| \leq \delta_1$ و $|d(t)| \leq \delta_2$ که در آن $\delta_1, \delta_2 \in R^+$ کران‌های مربوطه هستند.

هدف کنترلی برای سیستم (1) این است که قانون کنترل را به گونه‌ای تعیین کنیم که با وجود اغتشاش و عدم قطعیت در سیستم، بردار حالت‌های سیستم بتواند بردار حالت‌های دلخواه $x_d = [x_{d1}(t), \dots, x_{dn}(t)]^T$ را دنبال نماید.

بردار خطای دنبال‌یابی به صورت (2) قابل تعریف است:

$$e(t) = x(t) - x_d(t) = [e_1(t) \ e_2(t) \ \dots \ e_n(t)]^T = [x_1(t) - x_{d1}(t), \dots, x_n(t) - x_{dn}(t)]^T \quad (2)$$

بنابراین می‌توان هدف کنترلی را برای سیستم (1) به صورت (3) بیان نمود:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - x_d(t)\| \rightarrow 0 \quad (3)$$

3- روش پیشنهادی

در این بخش، ابتدا روش کنترل مد لغزشی ترمینال شرح داد می‌شود، سپس ترکیب کنترل مد لغزشی ترمینال و روش ANFIS تشریح شده و پس از آن نحوه به‌کارگیری الگوریتم زنبور عسل در ANFIS بیان می‌شود.

3-1 کنترل مد لغزشی ترمینال سریع

یکی از معایب اصلی روش SMC همان‌طور که عنوان گردید، این است که نمی‌تواند همگرایی مجانبی زمان محدود را تضمین کند. از همین رو برای حل این مشکل، روش TSMC پیشنهاد شد. یکی از روش‌های کنترل مد لغزشی

$$u = u_{ANFIS} + l \operatorname{sign}(s_{n-1}) \quad (10)$$

قضیه 2: برای سیستم (4)، اگر قانون کنترل به صورت رابطه (10) باشد، با سطوح لغزش تعریف شده در (5)، اگر $l + \varepsilon < 0$ به طوری که $l \in R^-$ باشد، آن گاه سیستم (4) در زمان محدود، به سطح لغزش $s_{n-1} = 0$ میل خواهد کرد و بر روی آن باقی خواهد ماند.

اثبات: به منظور نشان دادن پایداری سیستم (4) تابع لیپانوف به صورت (11) انتخاب می‌گردد:

$$V = \frac{1}{2} s_{n-1}^2 \quad (11)$$

مشتق این تابع به صورت (12) است:

$$\dot{V} = \dot{s}_{n-1} s_{n-1} \quad (12)$$

با استفاده از رابطه (5) می‌توان رابطه (13) را نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{s}_{n-1} &= \ddot{s}_{n-2} + \alpha_{n-2} \frac{d}{dt} s_{n-2} + \beta_{n-2} \frac{d}{dt} s_{n-2}^{\frac{m_{n-2}}{n_{n-2}}} \\ &= \ddot{s}_{n-3} + \alpha_{n-3} \frac{d^2}{dt^2} s_{n-3} + \beta_{n-3} \frac{d^2}{dt^2} s_{n-3}^{\frac{m_{n-3}}{n_{n-3}}} \\ &\quad + \alpha_{n-2} \frac{d}{dt} s_{n-2} + \beta_{n-2} \frac{d}{dt} s_{n-2}^{\frac{m_{n-2}}{n_{n-2}}} \\ &= \dots \dots \dots \\ &= s_0^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-2} \left[\alpha_i \frac{d^{n-i-1}}{dt^{n-i-1}} (s_i) + \beta_i \frac{d^{n-i-1}}{dt^{n-i-1}} \left(s_i^{\frac{m_i}{n_i}} \right) \right] \\ &= \dot{x}_n - \dot{x}_{dn} + \sum_{i=0}^{n-2} \left[\alpha_i \frac{d^{n-i-1}}{dt^{n-i-1}} (s_i) + \beta_i \frac{d^{n-i-1}}{dt^{n-i-1}} \left(s_i^{\frac{m_i}{n_i}} \right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{s}_{n-1} &= u_{ANFIS} + f(x) - \Delta f(x) - d(x) - \dot{x}_{dn} \\ &\quad + \sum_{i=0}^{n-2} \left[\alpha_i \frac{d^{n-i-1}}{dt^{n-i-1}} (s_i) + \beta_i \frac{d^{n-i-1}}{dt^{n-i-1}} \left(s_i^{\frac{m_i}{n_i}} \right) \right] \\ &\quad + l \operatorname{sign}(s_{n-1}) \end{aligned} \quad (14)$$

بنابراین با جایگذاری (6) در (14) رابطه (15) به دست می‌آید:

$$\dot{s}_{n-1} = -u_{eq} + u_{ANFIS} - \Delta f(x) - d(x) + l \operatorname{sign}(s_{n-1}) \quad (15)$$

همچنین با جایگذاری رابطه (15) در (12) می‌توان روابط زیر را نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (-u_{eq} + u_{ANFIS} - \Delta f(x) - d(x) \\ &\quad + l \operatorname{sign}(s_{n-1})) s_{n-1} \\ &= (-u_{eq} + u_{ANFIS} - \Delta f(x) - d(x)) s_{n-1} \\ &\quad + l |s_{n-1}| \end{aligned}$$

در نتیجه:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq (|-u_{eq} + u_{ANFIS} - \Delta f(x) - d(x)| + l) |s_{n-1}| \\ &\quad \text{بنابراین با توجه به رابطه (9) خواهیم داشت:} \\ \dot{V} &< (l + \varepsilon) |s_{n-1}| \\ &< 0 \end{aligned} \quad (16)$$

بنابراین سیستم (4) با قانون کنترل به صورت رابطه (10) پایدار است و حالت‌ها به سطح لغزش همگرا می‌گردند. بنابراین با حل معادله دیفرانسیل $s_{n-1} = 0$ توسط قانون کنترلی (10) و با توجه به آن که s_{n-1} بر حسب e_1 می‌باشد، $e_1 = 0$ حتماً یکی از جواب‌های معادله دیفرانسیل $s_{n-1} = 0$ می‌باشد، لذا دنبال‌یابی مسیر به خوبی صورت می‌گیرد.

سریع، چترینگ و وابستگی کامل آن به معادلات دینامیکی سیستم است. برای غلبه بر این مشکلات در این بخش، ترکیب ANFIS با کنترل مد لغزشی ترمینال سریع پیشنهاد می‌گردد تا علاوه بر کاهش پدیده چترینگ، وابستگی روش به مدل دقیق نیز حذف شود.

منطق فازی و شبکه عصبی را می‌توان به عنوان تقریب‌زننده یک مدل یا تابع در نظر گرفت چراکه اینگونه روش‌ها توانایی مقابله با عدم قطعیت، اغتشاش و نویز را دارند. ANFIS در واقع یک سیستم فازی است که آموزش داده‌های آن مشابه یک سیستم عصبی قابل انجام است (توضیحات بخش‌های مختلف ANFIS در پیوست الف آورده شده است).

در این بخش نشان داده می‌شود که چگونه می‌توان روش کنترل مد لغزشی ترمینال سریع را با ANFIS ترکیب نمود، تا از طریق تطابق وزن‌ها به یک کنترل‌کننده معادل دست پیدا کرد. در این صورت، در کنترل‌کننده حاصل، مزایای کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال سریع و سیستم ANFIS وجود دارد. برای این منظور سطح لغزشی غیرخطی s_{n-1} تعریف شده در رابطه (5)، به عنوان ورودی سیستم ANFIS در نظر گرفته می‌شود و قسمتی از قانون کنترل که شامل u_{eq} ، نامعینی و اغتشاش است، توسط ANFIS تقریب زده می‌شود. این کار باعث کاهش قابل توجه بهره کنترلی بخش ناپیوسته قانون کنترل یعنی l می‌گردد. به عبارت دیگر، جبران اثر نامعینی و اغتشاش به جای افزایش جمله $l \operatorname{sign}(s_{n-1})$ توسط ANFIS جبران می‌شود و بنابراین چترینگ به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

از طرف دیگر، مهمترین مسأله در ANFIS تنظیم ضرایب آن، برای دستیابی به بهترین نتیجه با حفظ همگرایی است. در این مقاله، از یک الگوریتم سیر تکاملی به نام الگوریتم زنبور برای به‌روزرسانی تمامی پارامترهای ANFIS استفاده می‌شود (توضیحات الگوریتم زنبور در پیوست ب آورده شده است).

همان‌طور که در بخش 1-3 عنوان شد، تابع لیپانوفی که همگرایی به سطح لغزش را تضمین می‌کند، به صورت $V = \frac{1}{2} s_{n-1}^2$ در نظر گرفته می‌شود، سطوح لغزش (5) و قانون کنترل (6) شرایط لازم برای همگرایی به سطح لغزش را فراهم می‌کند. برای آن که نیاز به معادلات دینامیکی سیستم (1)، از بین برود، از ساختار شکل 1 که بر اساس ANFIS است، استفاده می‌گردد. ساختار ANFIS نشان داده شده در شکل 1 دارای یک ورودی و یک خروجی و با پنج قاعده به صورت زیر است:

IF s_{n-1} is A_i THEN $u = p_i s_{n-1} + q_i$, $i = 1, \dots, 5$
بر اساس رابطه (24) در پیوست الف، برای یک سیستم یک ورودی و یک خروجی با پنج قاعده فازی، می‌توان خروجی ANFIS را به صورت رابطه (8) نوشت:

$$\begin{aligned} u_{ANFIS}(s_{n-1}) &= \sum_{i=1}^5 \bar{w}_i f_i = \sum_{i=1}^5 \bar{w}_i (p_i s_{n-1} + q_i) \\ &= \frac{\sum_{i=1}^5 w_i (p_i s_{n-1} + q_i)}{\sum_{i=1}^5 w_i} \end{aligned} \quad (8)$$

طبق قضیه تقریب جامع¹ [31]، رابطه‌ای به صورت (9) بین قسمت

$$u_{eq}, \text{ نامعینی و اغتشاش موجود در مدل سیستم با } u_{ANFIS} \text{ برقرار است:} \quad (9)$$

در رابطه (9)، $\varepsilon \in R^+$ می‌باشد. حال نشان می‌دهیم که سیستم (4) با u_{ANFIS} رابطه (8) و قانون کنترل به صورت رابطه (10) پایدار است:

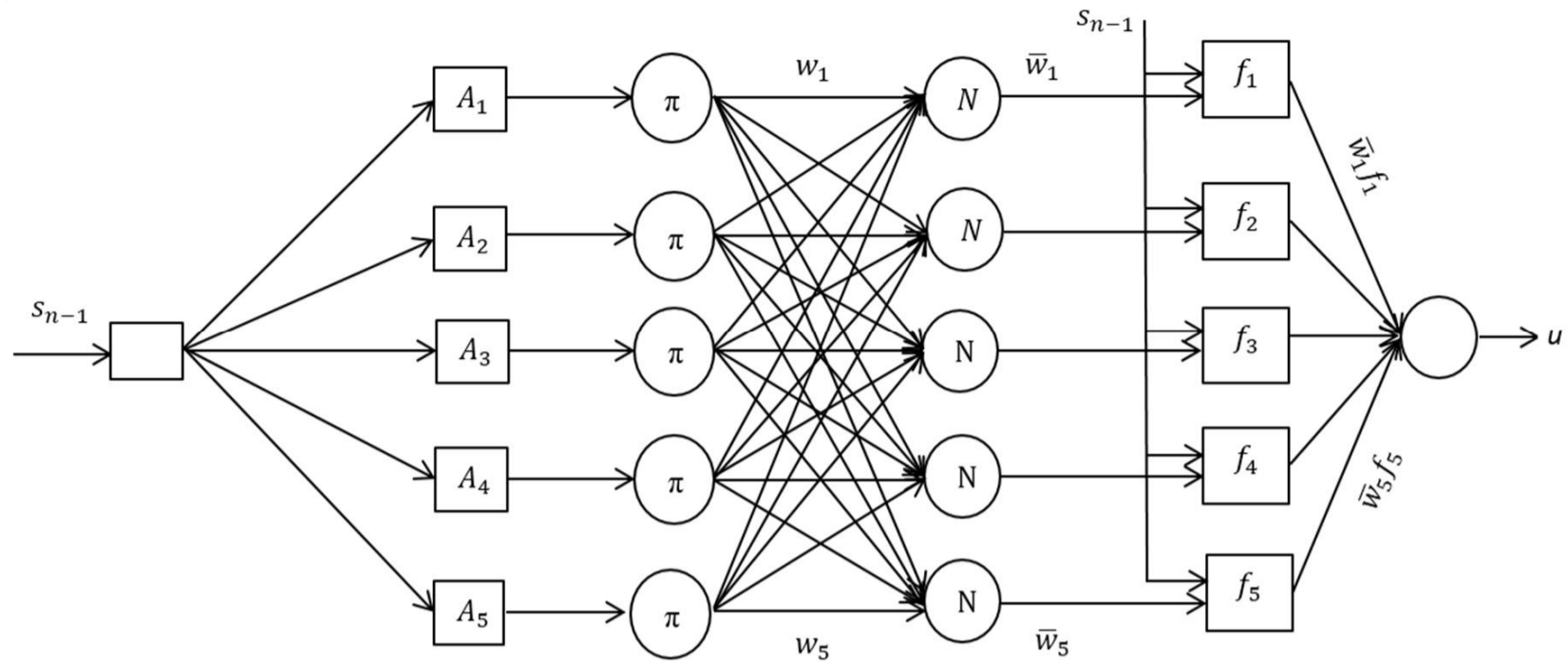


Fig. 1 Structure of proposed ANFIS for the studied method with one input-one output

شکل 1 ساختار ANFIS پیشنهاد شده برای روش مورد مطالعه با یک ورودی - یک خروجی

تغییر می‌دهد. همچنین شرایط پایداری در قضیه 2، که به صورت $l + \varepsilon < 0$ می‌باشد، با اجرای الگوریتم نقض نمی‌گردد (ε و l به ترتیب مقادیر حقیقی مثبت و منفی هستند). اگر میزان خطای دقت تغییر یافته $\hat{\varepsilon}$ باشد ($\hat{\varepsilon} < \varepsilon$)، باز هم نامساوی $l + \hat{\varepsilon} < 0$ برقرار است. حتی می‌توان اندازه بهره کنترلی l کمتری را اختیار نمود. کاهش اندازه l باعث کاهش پدیده چترینگ می‌شود. هر چقدر ε کمتر شود، یعنی امکان کاهش l بیشتر است.

4- شبیه‌سازی

یکی از اهداف فناوری نانو، کنترل مواد با دقت زیاد در مقیاس نانو برای تشکیل یک عملکرد ویژه در مواد، دستگاه‌ها و سیستم‌ها می‌باشد. از اینرو کنترل ارتعاشات نوک AFM و ساخت آن برای دستکاری ذرات در مقیاس نانو بسیار مهم است. به عنوان رایج‌ترین روش رباتیک دستکاری نانو، از یک نوک تیز پروب AFM برای فشار، کشش، برش، دندان کردن مواد و سطح آنها استفاده می‌شود. AFM شامل یک تیر یکسر گیردار¹ با نوک تیز یا پروب برای اسکن یک سطح نمونه است. در شکل 2 طرز عملکرد این دستگاه نشان داده شده است. مدل ریاضی این سیستم به صورت (17) است [33]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\omega_n^2 x_1 - 2\xi\omega_n x_2 + h(x_1, \delta) + \tilde{d} \cos(\Omega t) + u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (17)$$

در این رابطه x_1, x_2 به ترتیب موقعیت و سرعت نوک تیر یکسر گیردار می‌باشند و y نشان‌دهنده مقدار اندازه‌گیری شده موقعیت نوک تیر یکسر گیردار است، ω_n فرکانس طبیعی تیر یکسر گیردار است، ξ میرایی سیستم و $u(t)$ کنترل ورودی سیستم و $h(\cdot)$ بیانگر تابع اثر متقابل نیروی بین سطح و نوک تیر یکسر گیردار است، δ پارامتری برای تعیین فاصله بین نمونه و نوک تیر یکسر گیردار در غیاب نمونه می‌باشد و عبارت $\tilde{d} \cos(\Omega t)$ اغتشاش خارجی با دامنه محدود است. یک مدل برای تابع $h(\cdot)$ که معمولاً برای نشان دادن اثر متقابل یک زوج بین مولکولی استفاده می‌شود، به صورت (18) است [33]:

$$h(x_1, \delta) = -\frac{\gamma_1}{(\delta + x_1)^2} + \frac{\gamma_2}{(\delta + x_1)^8} \quad (18)$$

$$\delta_{\min} < \delta < \delta_{\max}$$

3-3- آموزش ANFIS مبتنی بر الگوریتم زنبور

یکی از مسائل اصلی در ANFIS آموزش و به‌روزرسانی پارامترهای آن می‌باشد. در این بخش، نحوه به‌روزرسانی پارامترهای ANFIS بر مبنای الگوریتم زنبور [32] شرح داده می‌شود.

یک سیستم ANFIS (همان‌طور که در پیوست الف آورده شده است) شامل دو نوع از پارامترهای قابل تنظیم، پارامترهای اولیه و پارامترهای نتیجه‌گیری است. پارامترهای اولیه متعلق به توابع عضویت می‌باشند و همان‌طور که در معادله (19) نشان داده شده است، هر تابع عضویت دارای سه نوع پارامتر a_i, b_i و c_i برای $i = 1, \dots, 5$ است، لذا تعداد کل پارامترهای مقدماتی برابر با تعداد کل همه پارامترهای توابع عضویت می‌باشد و با در نظر گرفتن سه پارامتر برای هر تابع عضویت در مجموع 15 پارامتر در بخش مقدماتی ANFIS وجود خواهد داشت. پارامترهای نتیجه‌گیری متعلق به لایه غیرفازی‌ساز ANFIS می‌باشد. همان‌طور که شکل 1 نشان می‌دهد، پارامترهای نتیجه‌گیری شامل مجموعه قابل تنظیم p_i و q_i برای $i = 1, \dots, 5$ می‌باشد. به عبارتی 10 پارامتر قابل تنظیم در بخش نتیجه‌گیری وجود دارد. لذا در مجموع 25 پارامتر قابل تنظیم در بخش مقدماتی و بخش نتیجه‌گیری ANFIS وجود خواهد داشت که بر اساس الگوریتم زنبور باید تنظیم شوند. در واقع، به منظور رسیدن به قانون کنترلی $u_{ANFIS}^*(s_{n-1})$ با هدف دستیابی به حداقل خطا در تقریب قانون کنترل، انتخاب بهترین مقدار ممکن برای پارامترها در ANFIS به کمک الگوریتم زنبور صورت می‌گیرد.

برای رسیدن به حداقل خطا، در این الگوریتم از تابع هزینه به صورت $error = \int |e_1(t)| dt + \int |s_{n-1}(t)| dt$ استفاده می‌گردد.

بنابراین در فضای جستجو، بهترین پارامترهای ANFIS که به ازای آنها این معیار کمترین مقدار را داراست، انتخاب می‌گردند. کمینه شدن معیار فوق به معنی کاهش $|s_{n-1}|$ به سمت صفر خواهد بود و مطابق رابطه (15) باعث نزدیک شدن مقدار u_{ANFIS} به مقدار $u_{eq} + \Delta f(x) + d(x)$ یا کاهش مقدار ε در رابطه (9) خواهد بود.

بنابراین تنظیم دقیق پارامترهای ANFIS با استفاده از الگوریتم زنبور موجب می‌گردد مقدار ε در رابطه (9) کاهش یابد که نشان‌دهنده دقت تقریب بالاتر است. به عبارت دیگر، انتخاب پارامترهای مختلف برای ANFIS خللی در قضیه تقریب جامع در رابطه (9) ایجاد نمی‌کند و فقط دقت خطا را

جدول 1 پارامترهای الگوریتم زنبور در اجراهای مختلف

Table 1 Parameters of bee's algorithm in different runs

پارامترها	1	2	3	4
a_1	-1.3836	-1.3831	-1.9103	-1.7054
b_1	-0.6293	-1.2248	-1.8530	-1.2042
c_1	-0.6141	-0.9412	-1.6954	-1.0164
a_2	-0.8683	0.8556	-1.4053	-1.9275
b_2	-0.4775	-0.1928	-0.8187	-1.3348
c_2	-0.1780	-0.1049	-0.3915	-0.5957
a_3	-0.1389	-0.2399	-0.9388	-0.5174
b_3	-0.0209	-0.0175	0.1677	0.4947
c_3	0.3955	0.3381	0.8032	0.9449
a_4	0.1499	0.1905	0.1897	0.0870
b_4	0.2119	0.4798	0.5018	0.5965
c_4	0.4823	0.9942	1.7629	1.7593
a_5	0.6230	0.7605	1.3223	1.3963
b_5	0.7549	1.2713	1.5364	1.8779
c_5	1.4032	1.2715	1.8090	1.9949
p_1	0.69	0.83	0.8007	0.4086
q_1	0.1879	0.5529	0.9203	0.8595
p_2	0.1524	0.6684	0.1749	0.6245
q_2	0.3368	0.3914	0.0205	0.6221
p_3	0.3657	0.6073	0.1168	0.7003
q_3	0.3396	0.5258	0.6487	0.7113
p_4	0.1927	0.8018	0.5001	0.8832
q_4	0.4420	0.2461	0.6503	0.8635
p_5	0.1382	0.3101	0.0434	0.1333
q_5	0.7928	0.1449	0.8515	0.1884
error	305.2849	315.6459	282.7005	284.9512

$$\text{error} = \int |e_1(t)| dt + \int |s_{n-1}(t)| dt$$

جدول 2: مقایسه کمی سه روش به کار رفته پیشنهاد شده

Table 2 Qualitative comparison of three methods used in this paper

روش	میزان چترینگ	مقدار خطای ماندگار (nm)	میانگین خطای مطلق (nm)
کنترل لغزشی معمولی	زیاد	± 0.001	0.964
کنترل مد لغزشی ترمینال	متوسط	± 0.00001	0.06
روش پیشنهادی در مقاله	کم	± 0.014	0.09

دنبالیابی کامل صورت گرفته است. از آنجایی که در این روش مشکل پایداری مجانبی در زمان محدود حل نمی‌شود، لذا به سیستم مورد نظر، کنترل مد لغزشی ترمینال اعمال می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی در شکل 4 با روش کنترل مد لغزشی ترمینال سریع برای سیستم مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به شکل 4 هم خروجی نسبت به روش کنترل مد لغزشی در زمان کوتاهی همگرا شده است و هم پایداری مجانبی در زمان محدود به دست می‌آید. البته در این روش به معادلات دقیق دینامیکی سیستم نیز نیاز است.

در کلیه شبیه‌سازی‌ها و در کلیه روش‌ها از تابع $\text{sat}(\cdot)$ به جای $\text{sign}(\cdot)$ استفاده شده است. مشخصه تابع $\text{sat}(\cdot)$ به صورت زیر است:

$$\text{sat}\left(\frac{t}{\rho}\right) = \begin{cases} \text{sign}(t) & \text{if } \left|\frac{t}{\rho}\right| \geq 1 \\ \frac{t}{\rho} & \text{if } \left|\frac{t}{\rho}\right| < 1 \end{cases}$$

البته این روش در باند محدودی چترینگ را کاهش می‌دهد ولی در صورت خروج از آن محدوده مشکل چترینگ حل نخواهد شد. با توجه به این که روش کنترل مد لغزشی سریع نیز دارای چترینگ و وابستگی به مدل است، در ادامه شبیه‌سازی روش پیشنهادی که ترکیب کنترل مد لغزشی ترمینال و ANFIS است، برای سیستم معرفی شده اعمال می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی در شکل 5 آورده شده است.

در این رابطه $\gamma_1, \gamma_2 \in R$ است. این مدل هم دافعه و هم جاذبه بین مولکولی را نشان می‌دهد. پارامتر δ را می‌توان به عنوان یک عدم قطعیت در مدل در نظر گرفت. برای دستیابی به اهداف دستکاری نانو، نوک تیر یکسر گیردار AFM باید قادر باشد که یک سیگنال مرجع را با وجود اغتشاش و عدم قطعیت دنبال کند. در این شبیه‌سازی ورودی پله بعنوان سیگنال مرجع در نظر گرفته شده است.

پارامترهای سیستم (17) با تابع $h(\cdot)$ در (18) به صورت فرض می‌شود [33]:

$$\omega_n = 1, \quad \xi = 0.02, \quad \alpha_1 = 0.1481 \\ \alpha_2 = 3.6e^{-6}, \quad \delta_{\min} = 0.8, \quad \delta_{\max} = 1.2 \\ \tilde{d} = 0.2, \quad \Omega = 1$$

برای شبیه‌سازی سیستم بالا، از پنج تابع عضویت مثلثی در بازه $[-2, 2]$ که دارای رابطه‌ای به صورت رابطه (19) هستند، استفاده شده است. $\{a_i, b_i, c_i\}$ برای $i = 1, \dots, 5$ مجموعه پارامترهای لایه مقدماتی که شکل توابع عضویت را تغییر می‌دهند، هستند.

$$\mu_{A_i}(x) = \text{trimf}(x, a_i, b_i, c_i) = \max\left(\min\left(\frac{x-a_i}{b_i-a_i}, \frac{c_i-x}{c_i-a_i}\right), 0\right) \quad (19)$$

همچنین $\{p_i, q_i\}$ برای $i = 1, \dots, 5$ پارامترهای لایه نتیجه‌گیری هستند که مطابق با رابطه (8) تعیین کننده خروجی ANFIS هستند. $(p_i, q_i \in [0, 1])$

کلید این پارامتر که در بالا معرفی شدند، با استفاده از الگوریتم زنبور محاسبه شده‌اند، مقادیر این پارامترها برای بعضی از اجراها در جدول 1 آورده شده‌اند.

نتایج بررسی کمی بین سه روش در جدول 2 آورده شده‌اند. در این جدول مقدار خطای مطلق از رابطه (20) انجام شده است.

$$e_{\text{absolute}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e_1(i)| \quad (20)$$

در رابطه (20)، N بیانگر تعداد عناصر بردار خطا در هر نمونه برداری است.

در شبیه‌سازی، پارامتر δ در هر لحظه به صورت مقداری تصادفی در بازه $[0.8, 1.2]$ انتخاب می‌گردد و $d(t) = \tilde{d} \cos(\Omega t)$ به عنوان اغتشاش خارجی در مدل در نظر گرفته می‌شود و ورودی سیستم به صورت پله است.

ابتدا روش کنترل لغزشی معمولی کلاسیک برای مدل AFM شبیه‌سازی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی در شکل 3 نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل 3 دیده می‌شود، سیگنال کنترل ورودی دارای چترینگ است، اما

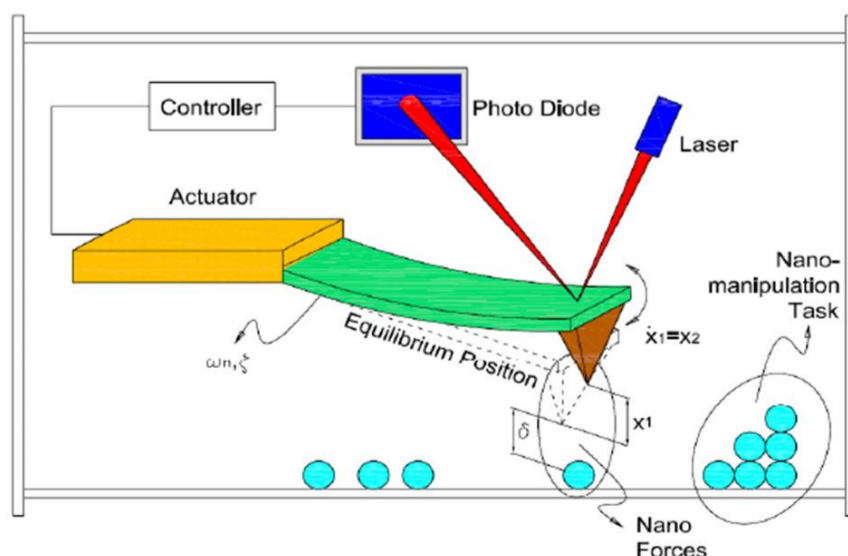


Fig. 2 Overall schematic of atomic force microscope tip [33]

شکل 2 شمای کلی از عملکرد نوک میکروسکوپ نیروی اتمی [33]

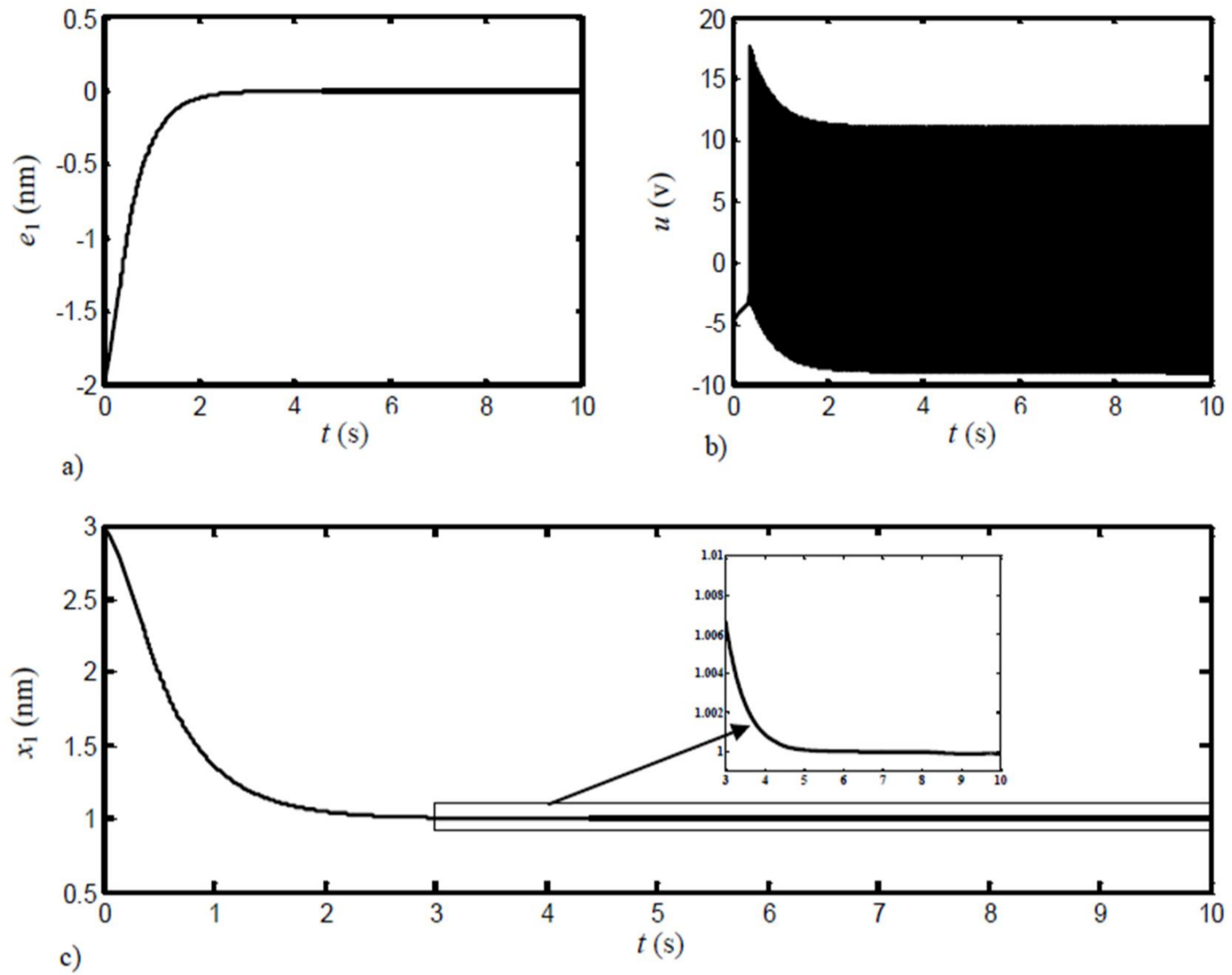


Fig. 3 Simulation results of conventional sliding mode control in AFM model a) error of tip position (e_1), b) control input (u), c) AFM tip position (x_1).

شکل 3 نتایج شبیه‌سازی کنترل مد لغزشی معمولی در مدل AFM (a) خطای موقعیت نوک AFM (e_1), (b) تلاش کنترلی (u), (c) موقعیت نوک AFM (x_1).

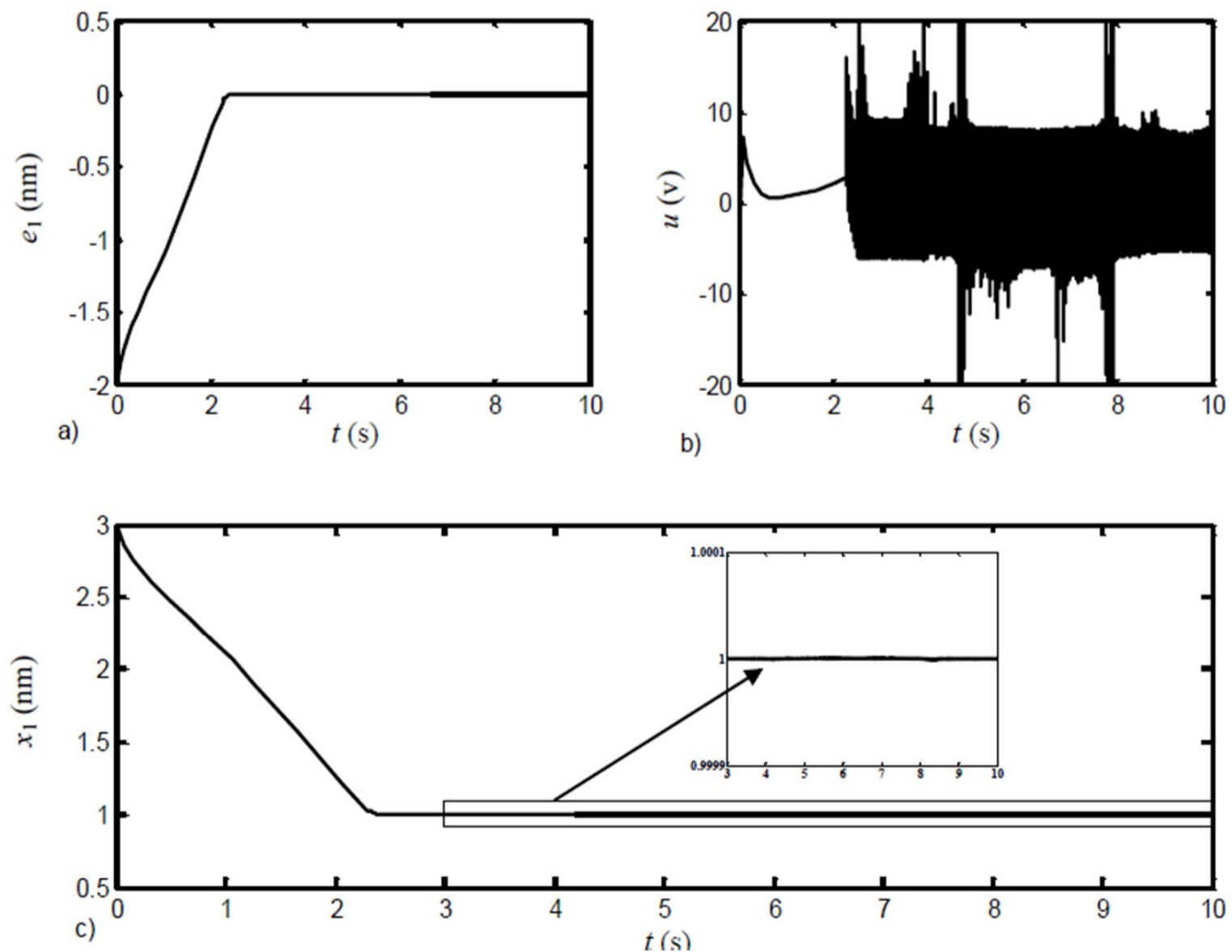


Fig. 4 Simulation results of terminal sliding mode control in AFM model a) error of tip position (e_1), b) control input (u), c) AFM tip position (x_1).

شکل 4 نتایج شبیه‌سازی کنترل مد لغزشی ترمینال سریع در مدل AFM (a) خطای موقعیت نوک AFM (e_1), (b) تلاش کنترلی (u), (c) موقعیت نوک AFM (x_1).

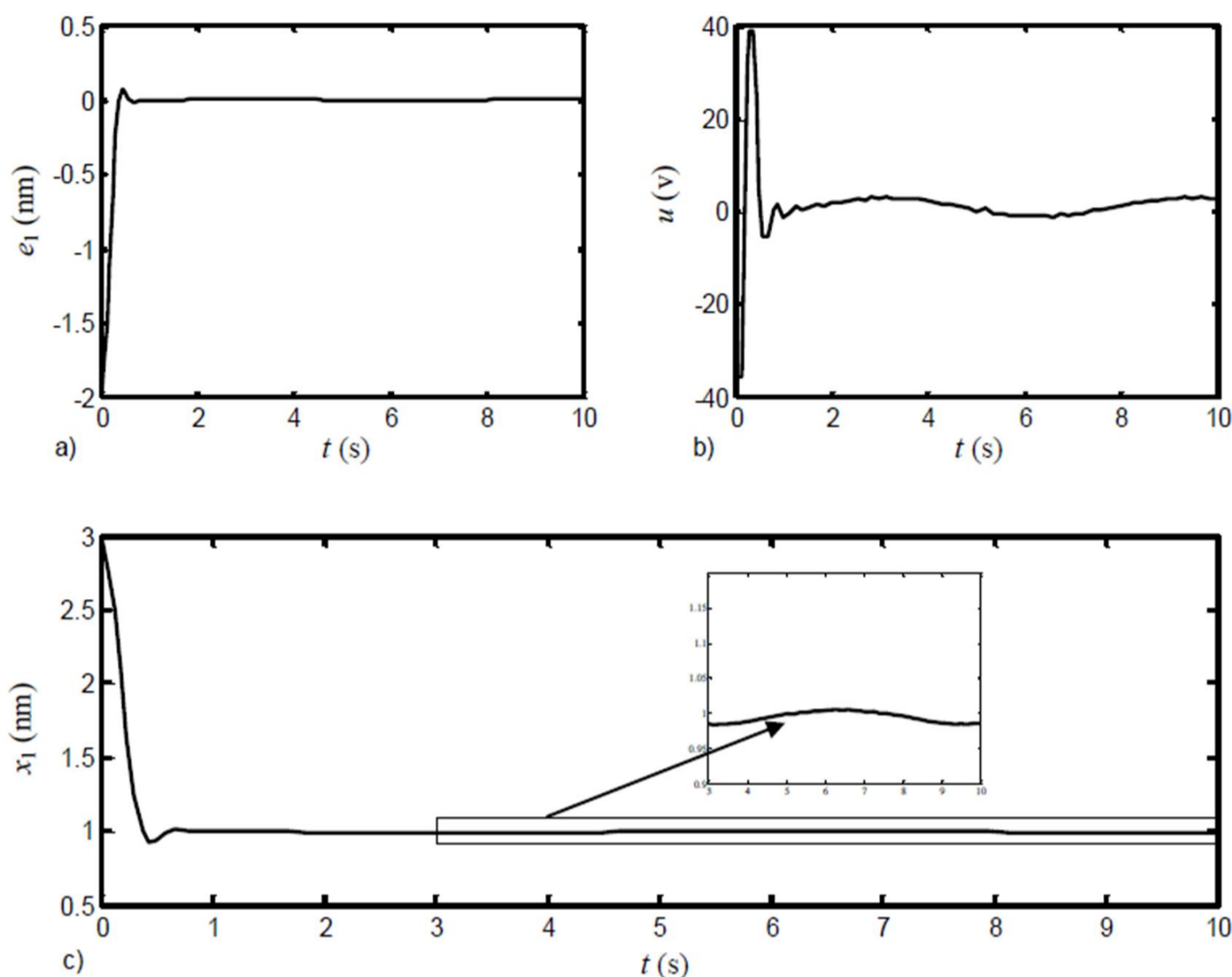


Fig. 5 Simulation results of proposed method in AFM model a) error of tip position (e_1), b) control input (u), c) AFM tip position (x_1).

شکل 5 نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی در مدل AFM (a) خطای موقعیت نوک AFM (e_1)، (b) تلاش کنترلی (u)، (c) موقعیت نوک AFM (x_1).

اغتشاشات وارده به سیستم و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم به دلیل عدم وابستگی روش به مدل سیستم است.

6- فهرست علائم

پارامترهای مقدماتی ANFIS	a_i, b_i, c_i
اغتشاش خارجی کراندار	$d(t)$
اغتشاش خارجی با دامنه محدود	$\tilde{d}\cos(\Omega t)$
بردار خطای دنباله‌یابی	$E = [e_1(t) \dots e_n(t)]^T$
تابع هزینه خطا در الگوریتم زنبور	error
توابع غیرخطی پیوسته و مشتق‌پذیر	$f(\cdot), g(\cdot)$
تابع اثر متقابل نیروی بین سطح و نوک	$h(\cdot)$
تیر یکسر گیردار	l
ضریب قسمت سوئیچینگ تلاش کنترلی	$l\text{sign}(s_{n-1})$
قسمت سوئیچینگ تلاش کنترلی	m_i, n_i
ضرایب مثبت و فرد سطوح لغزش	N
تعداد نمونه‌ها در بردار خطا	n_s
تعداد کل زنبورهای کاوشگر	n_e
تعداد زنبورهای نخبه	n_b
تعداد زنبورهای با بالاترین برازندگی	n_{re}
تعداد زنبورهای کاوشگر درهمسایگی	
زنبورهای نخبه	

همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، روش پیشنهادی علاوه بر داشتن سرعت همگرایی بالا، از قوام خوبی در مقابل اغتشاشات وارده به سیستم و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم برخوردار است. همچنین با استفاده از این روش پدیده چترینگ به طور چشمگیری حذف شده است. این موضوع به خاطر کاهش بهره کنترلی قسمت سوئیچینگ و جبران اثر نامعینی و اغتشاش با سیستم ANFIS است. همچنین به دلیل عدم استفاده از تابع غیرخطی در کنترل پیشنهادی، وابستگی به مدل سیستم کاهش یافته است.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش کنترل ترکیبی مبتنی بر سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی و کنترل مد لغزشی ترمینال برای حذف چترینگ تلاش کنترلی، داشتن پایداری مجانبی در زمان محدود و عدم نیاز به داشتن معادلات دقیق دینامیکی سیستم و کاهش قوانین فازی برای یک کلاس از سیستم‌های غیرخطی پیشنهاد شد و برای به‌روزرسانی پارامترهای ANFIS از الگوریتم زنبور استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی نشان‌دهنده آن است که چترینگ نسبت به روش کنترل مد لغزشی معمولی و کنترل مد لغزشی ترمینال به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است و همچنین روش پیشنهادی همگرایی سریعتری نسبت به دو روش دیگر که در این مقاله شبیه‌سازی گردید، دارد. البته در مقابل میزان میانگین خطا در روش پیشنهادی نسبت به دو روش دیگر کمی بیشتر است و بسته به تصمیم طراحی در خصوص وضعیت مطلوب، طراح می‌تواند روش دوم یا روش اول را انتخاب کند. نتایج شبیه‌سازی به خوبی بیانگر قوام روش پیشنهادی در مقابل

$$\mu_{B_i}(x) = \text{trimf}(x, \bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i) = \max\left(\min\left(\frac{x - \bar{a}_i}{\bar{b}_i - \bar{a}_i}, \frac{\bar{c}_i - x}{\bar{c}_i - \bar{a}_i}\right), 0\right)$$

$$o_i^1 = \mu_{A_i}(x), o_{i+2}^1 = \mu_{B_i}(x), i = 1, 2 \quad (21)$$

لایه دوم:

این لایه، لایه قواعد نامیده می‌شود. این لایه نشان‌دهنده وزن‌دهی سیگنال‌های ورودی، که در لایه فازی ساز تولید شده است، می‌باشد.

$$o_i^2 = w_i = \mu_{A_j}(x) \cdot \mu_{B_j}(y), i = 1, \dots, 4, j = 1, 2 \quad (22)$$

لایه سوم:

این لایه، لایه نرمالیزاسیون نامیده می‌شود. این لایه، وزن‌دهی سیگنال‌ها را برای هر ورودی نرمالیزه می‌نماید. رابطه نرمالیزاسیون به صورت رابطه (22) است.

$$o_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^4 w_i}, i = 1, \dots, 4 \quad (23)$$

لایه چهارم:

این لایه، لایه غیرفازی‌ساز نامیده می‌شود. خروجی هر گره در این لایه با ضرب وزن نرمالیزه در یک چند جمله‌ای به دست می‌آید. خروجی این لایه به صورت (24) محاسبه می‌شود:

$$o_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), i = 1, \dots, 4 \quad (24)$$

خروجی لایه نرمالیزه شده می‌باشد. پارامترهای $\{p_i, q_i, r_i\}$ در این لایه، پارامترهای نتیجه‌گیری هستند. لایه پنجم:

این لایه، لایه جمع نهایی نامیده می‌شود. این لایه از جمع کل سیگنال‌های دریافتی بدست می‌آید.

$$o^5 = u_{\text{ANFIS}} = \sum_{i=1}^4 \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i f_i}{\sum_{i=1}^4 w_i} = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i (p_i x + q_i y + r_i)}{\sum_{i=1}^4 w_i}, i = 1, \dots, 4 \quad (25)$$

پیوست ب: الگوریتم زنبور

الگوریتم زنبور عسل [32] الهام گرفته از رفتار زنبور عسل در طبیعت می‌باشد. زنبورها به طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند. زنبورهای کارگر، که از یک منبع غذایی کشف‌شده غذا می‌آورند. این زنبورها اطلاعاتی نظیر فاصله، جهت و میزان سود بخشی مکان را با خود به کندو آورده و این اطلاعات را با دیگر زنبورها به اشتراک می‌گذارند. زنبورهای تماشاگر، این زنبورها از یک سیستم ارتباطی پیچیده‌ای استفاده می‌کنند، این سیستم آنها را قادر می‌سازد که اطلاعاتی در مورد محل و کیفیت منابع غذایی خارج از کندو بدست آورند.

ارتباط بین زنبورها توسط نمایش رقص انجام می‌گیرد که حاوی اطلاعاتی در مورد کیفیت منبع غذایی، مکان و موقعیت آن می‌باشد. زنبورهای دیده‌بان (پیشاهنگ) که به صورت تصادفی در اطراف کندو به دنبال غذا می‌گردند.

این زنبورها به صورت تصادفی از گلزاری به گلزار دیگر حرکت می‌کنند. زنبورها برای پرواز به انرژی بالایی احتیاج دارند، بنابراین آنها سعی می‌کنند کوتاه‌ترین و بهترین راه را در بین شبکه‌ای از گل‌ها پیدا می‌کنند.

تعداد زنبورهای کاوشگر همسایگی	n_{rb}
اندازه همسایگی	n_{gh}
خروجی‌های لایه‌های ANFIS	o_i^j
پارامترهای نتیجه‌گیری ANFIS	p_i, q_i, r_i
سطوح لغزش	s_0, \dots, s_{n-1}
زمان همگرایی (s)	t_n
ورودی (v)	u
تلاش کنترلی مبتنی بر ANFIS (v)	u_{ANFIS}
تلاش کنترلی معادل (v)	u_{eq}
تابع لیاپانف	V
توابع وزنی ANFIS	w_i, \bar{w}_i
بردار حالت سیستم	$X = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T$
بردار حالت‌های دلخواه	$X_d = [x_{d1}(t), \dots, x_{dn}(t)]^T$
موقعیت و سرعت نوک تیر یکسر	x_2, x_1
گیردار (nm/s و nm)	y
خروجی موقعیت نوک تیر یکسر	
گیردار (nm)	

علائم یونانی

سطوح لغزش	α_i, β_i
ضرایب تابع $h(\cdot)$	γ_1, γ_2
عدم قطعیت کراندار	Δf
پارامتر تعیین فاصله بین نمونه و موقعیت تعادل از نوک تیر یکسر	δ
گیردار	
کران نامعینی	δ_1
کران اغتشاش	δ_2
مقدار حداکثر δ	δ_{\max}
مقدار حداقل δ	δ_{\min}
ضریب خطای تقریب با u_{ANFIS}	ε
تابع عضویت فازی	$\mu_{A_i}(x)$
میرایی سیستم	ξ
فرکانس طبیعی تیر یکسر گیردار	ω_n

7- پیوست

پیوست الف: ساختار ANFIS

در این پیوست جزئیات ساختار ANFIS شرح داده می‌شود. در شکل 6 ساختار ANFIS که شامل 5 لایه است، نشان داده شده است. این شکل یک ساختار ANFIS که دارای دو ورودی و یک خروجی و براساس چهار قاعده ساخته شده است را نشان می‌دهد.

لایه اول:

این لایه، لایه فازی ساز نام دارد. این لایه توابع عضویت هر یک از ورودی‌ها را تولید می‌کند. در این مقاله از تابع عضویت مثلثی با پارامترهای $a_i, b_i, c_i, \bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i$ استفاده شده است. پارامترهای این لایه پارامترهای مقدماتی نامیده می‌شوند.

$$\mu_{A_i}(x) = \text{trimf}(x, a_i, b_i, c_i) = \max\left(\min\left(\frac{x - a_i}{b_i - a_i}, \frac{c_i - x}{c_i - a_i}\right), 0\right)$$

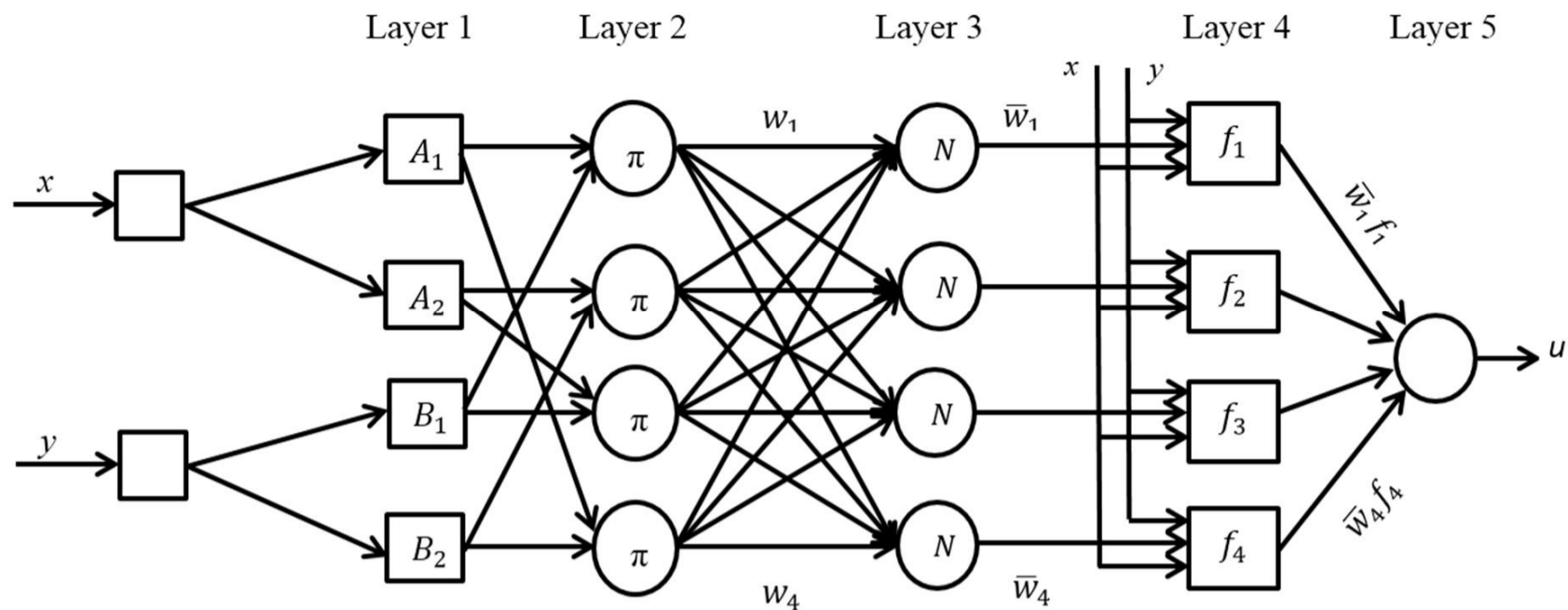


Fig. 6 Structure of ANFIS with two inputs and one output [31]

شکل 6: ساختار ANFIS با دو ورودی و یک خروجی [31]

برازندگی، برای جستجوی محلی انتخاب می‌شود. هریک از زنبورهای کاوشگر که از مکان برتر باز می‌گردند، رقص چرخشی انجام می‌دهند که این کار باعث می‌شود، زنبورهای پیرو برای جستجوی محلی مکان‌های برتر آگاه شوند. زنبورهای پیشاهنگی که اولین مکان نخبه را از میان مکان برتر شناسایی نمودند، n_{re} زنبور پیرو را برای جستجوی همسایگی ارسال می‌کنند.

همچنین زنبورهایی که $n_b - n_e$ مکان باقیمانده را شناسایی کردند، n_{rb} زنبور کارگر، با شرط $n_{rb} < n_{re}$ برای جستجوی محلی ارسال می‌کنند.

طبق مراحل بیان شده، با ارسال زنبورهای اضافی به اطراف n_e مکان بالاترین رتبه، جستجوی محلی در اطراف این n_e مکان بیشتر از مکان‌های دیگر انجام می‌شود. زیرا این مکان‌ها محتمل‌ترین نقاط در فضای حل مسئله می‌باشد.

جستجوی محلی:

برای هریک از n_b مکان انتخاب شده، زنبورهای کارگر به طور تصادفی و با احتمال یکنواخت، در همسایگی مکان‌هایی با رتبه بالا قرار می‌گیرند. برای هر گلزار، رتبه مکان‌های مشاهده شده توسط زنبورهای کارگر محاسبه می‌شود. اگر یکی از زنبورهای کارگر از لحاظ رتبه در جایگاه بالاتری نسبت به زنبور پیشاهنگ قرار داشته باشد، آن زنبور کارگر به عنوان زنبور پیشاهنگ جدید انتخاب می‌شود. در نهایت، تنها زنبوری با بهترین رتبه برای هر گلزار باقی می‌ماند. این زنبورها به عنوان نمایندگان گلزارها انتخاب می‌شوند و برای انجام رقص چرخشی به کندو باز می‌گردند.

جستجوی سراسری:

در این مرحله، $n_s - n_b$ زنبور به طور تصادفی و به عنوان زنبورهای پیشاهنگ برای یافتن گلزارهای جدید، در فضای کلی حل مسئله پراکنده می‌شوند. این جستجوی سراسری نشان‌دهنده کارایی الگوریتم زنبور در حل مسئله می‌باشد زیرا فضاهای جدیدی غیر از گلزارهای فعلی را برای یافتن بهترین حل ممکن مورد جستجو قرار می‌دهد.

به‌روزرسانی جمعیت:

در آخر هر تکرار از برنامه، جمعیت جدید کلونی زنبور از دو گروه تشکیل می‌شوند. اولین گروه شامل n_b زنبور پیشاهنگ که به عنوان مراکز و نماینده

در الگوریتم‌های سیر تکاملی، هدف اصلی به حداقل رساندن تابع هزینه، است. این الگوریتم برای جستجوی و بهینه‌سازی مسئله با الهام گرفتن از رقص زنبورها، به جستجو نقاط بهینه در فضای جستجوی خود می‌پردازد. هر نقطه در فضای جستجو به عنوان یک منبع غذایی در نظر گرفته می‌شود، زنبور دیده‌بان به صورت تصادفی در فضا از طریق تابع برازش با نمونه‌برداری از مکان‌های بازدید شده، آنها را از لحاظ کیفیت رتبه‌بندی کرده و دیگر زنبورها بهترین نقاط رتبه‌بندی شده تابع برازش را کاوش می‌کنند. زنبورهای واقع در الگوریتم، نویدبخش بهترین راه حل و حداقل ساختن تابع هدف با توجه به اندازه‌گیری تابع هزینه می‌باشند.

فضای داده شده به صورت زیر مفروض است:

$$U = \{X \in R^n; \min_i < x_i < \max_i, i = 1, \dots, n\}$$

برای حل این الگوریتم، یک تابع برازش $f(X): U \rightarrow R$ ، برای هر حل به عنوان یک بردار n بعدی از متغیرهای $X = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T \in R^n$ بیان می‌شود. پارامترهای اصلی این الگوریتم در جدول 3 آورده شده است.

اصول کار الگوریتم به صورت زیر می‌باشد:

مقدار دهی اولیه:

تعداد کل زنبورهای کاوشگر، n_s است که در فضای حل مسئله با احتمال یکنواخت، پراکنده می‌شوند. هر زنبور کاوشگر یک محل مشاهده شده را از طریق تابع هزینه ارزیابی می‌کند.

رقص چرخشی:

n_s مکان مشاهده شده توسط زنبورهای کاوشگر، طبق تابع هزینه درجه‌بندی می‌شوند و n_b مکان برتر با مقدار حداقل هزینه یا بالاترین

جدول 3 پارامترهای الگوریتم زنبور عسل

Table 3 Parameters of bee's algorithm

پارامتر	توصیف
n_s	تعداد کل زنبورهای کاوشگر
n_e	تعداد زنبورهای نخبه
n_b	تعداد زنبورهای با بالاترین برازندگی
n_{re}	تعداد زنبورهای کاوشگر در همسایگی زنبورهای نخبه
n_{rb}	تعداد زنبورهای کاوشگر همسایگی
n_{gh}	سایز همسایگی

- [15] M. Sarailoo, Z. Rahmani, B. Rezaie, Fuzzy sliding mode control for hyper chaotic Chen system, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, Vol. 12, pp. 85-90, 2012.
- [16] C. W. Tao, L. S. Taur, M. L. Chan, Adaptive fuzzy terminal sliding mode controller for linear systems with mismatched time-varying uncertainties, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, Vol. 34, No. 1, pp. 255-262, 2004.
- [17] S. L. Tzou-Hseng, H. Yun-Cheng, MIMO adaptive fuzzy terminal sliding mode controller for robotic manipulators, *Information Science*, Vol. 180, No. 23, pp. 4641-4660, 2010.
- [18] V. Nekoukar, A. Erfanian, Adaptive fuzzy terminal sliding mode control for a class of MIMO uncertain nonlinear systems, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 179, No. 1, pp. 34-49, 2011.
- [19] S. S. D. Xu, Y. K. Liu, 2014, Study of Takagi-Sugeno fuzzy-based terminal-sliding mode fault-tolerant control, *IET Control Theory and Applications*, Vol. 8, No. 9, pp. 667-674, 2014.
- [20] S. Khari, Z. Rahmani, B. Rezaie, Design of intelligent integral sliding mode control based on a new sliding surface and fuzzy control for controlling chaos in plasma torch system, *Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Tehran, Iran, pp. 1066-1071, 2015 (in Persian فارسی).
- [21] Y. J. Mon, C. M. Lin, ANFIS-based integral terminal sliding mode control for disturbance chaotic system, *Journal of Intelligent and Fuzzy systems*, Vol. 27, No. 1, pp. 443-450, 2014.
- [22] Y. J. Mon, ANFIS based terminal sliding mode control design for nonlinear system, *International Journal of Computational Engineering Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 287-290, 2013.
- [23] Y. J. Mon, Sliding mode ANFIS-Based MIMO fuzzy neural network control for robotic systems, *International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 10, No. 2, pp. 83-87, 2013.
- [24] K. Astrom, B. Wittenmark, *Adaptive Control*, Reading, Addison Wesley, pp. 186-194, 1995.
- [25] M. A. Shoorehdeli, M. Teshnehlab, A. Sedigh, Identification using ANFIS with intelligent hybrid stable learning algorithm approaches, *Neural Computing and Applications*, Vol. 18, No. 2, pp. 157-174, 2009.
- [26] M. A. Shoorehdeli, M. Teshnehlab, A. Sedigh, Novel hybrid learning algorithms for tuning ANFIS parameters using adaptive weighted PSO, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, London, U.K., pp. 1-6, 2007.
- [27] M. A. Shoorehdeli, M. Teshnehlab, A. Sedigh, Training ANFIS as an identifier with intelligent hybrid stable learning algorithm based on particle swarm optimization and extended Kalman filter, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 160, No. 7, pp. 922-948, 2009.
- [28] M. Turki, S. Bouzaida, A. Sakly, F. M. Sahli, Adaptive control of nonlinear system using neuro-fuzzy learning by PSO algorithm, *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Yasmine Hammamet, Tunisia, pp. 519-523, 2012.
- [29] A. Z. Zangeneh, M. Mansouri, M. Teshnehlab, A. Sedigh, Training ANFIS system with DE algorithm, *IEEE International Workshop on Advanced Computational Intelligence (IWACI)*, Wuhan, China, pp. 308-314, 2011.
- [30] F. Cus, J. Balic, U. Zuperl, Hybrid ANFIS-ants system based optimization of turning parameters, *Journal of Achievements in Materials*, Vol. 36, No. 1, pp. 79-86, 2009.
- [31] J. S. Jang, C. T. Sun, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, New Jersey: Prentice Hall, pp. 342-345, 1997.
- [32] D. T. Pham, E. Koc, A. Ghanbarzadeh, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi, The bees algorithm - a novel tool for complex optimisation problems, in *Proceedings of International Virtual Conference on Intelligent Production, Machines and Systems (IPROMS)*, Oxford: Elsevier, pp. 454-459, 2006.
- [33] M. Basso, G. Bagni, Controller synthesis for stabilization oscillations in tapping-mode atomic force microscopes, *IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design*, Taipei, Taiwan, pp. 372-377, 2004.

هر گلزار و نشان دهنده نتایج جستجوی محلی الگوریتم می باشند. دومین گروه، $n_s - n_b$ زنبور پیشاهنگ می باشند که به صورت تصادفی در فضای حل مسأله تولید می شوند و نتایج جستجوی سراسری الگوریتم را نشان می دهند.

شرط توقف:

شرط توقف الگوریتم می تواند یکی از این موارد رسیدن مقدار تابع هزینه به مقداری مشخص و از پیش تعیین شده و یا رسیدن تعداد تکرار الگوریتم به حد معلوم باشد.

8- مراجع

- [1] J. J. E. Slotine, W. Li., *Applied nonlinear control*, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, pp. 276-307, 1991.
- [2] I. V. Utkin, *Sliding mode in control optimization*, New York: Springer-Verlag, pp. 237-277, 1992.
- [3] H. N. Jordanov, B. W. Surgenor, Experimental evaluation of the robustness of discrete sliding mode control versus linear quadratic control, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 254-260, 1997.
- [4] K. Zare, H. R. Koofgar, Adaptive second order sliding mode controller for two input-two output uncertain nonlinear systems and application to a 2-DOF helicopter model, *Moddars Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 189-199, 2015 (in Persian فارسی).
- [5] S. T. Venkataraman, S. Gulati, Control of nonlinear systems using terminal sliding modes, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 115, No. 3, pp.554-560, 1993.
- [6] M. Zhihong, A. P. Paplinski, H. R. Wu, A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 39, No. 12, pp.2464-2469, 1994.
- [7] M. Zhihong, X. Y. Yu, Terminal sliding mode control of MIMO linear systems, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, Vol. 44, pp. 1065-1070, 1997.
- [8] Y. Feng, X. Yu, Z. Man, Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators, *Automatica*, Vol. 38, No. 12, pp. 2159-2167, 2002.
- [9] X. Yu, Z. Man, Fast terminal sliding mode control design for nonlinear dynamic systems, *IEEE Transactions on Circuits Systems I: Fundamental Theory and Applications*, Vol. 49, No. 2, pp. 261-264, 2002.
- [10] L. Yang, J. Yang, Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 21, No. 16, pp.1865-1879, 2011.
- [11] M. Benbrahim, N. Essounbouli, A. Hamzaoui, Adaptive type-2 fuzzy sliding mode controller for SISO nonlinear systems subject to actuator faults, *International Journal of Automation and Computing*, Vol.10, No. 4, pp. 335-342, 2013.
- [12] M. Hamerlain, Robust control with reduced knowledge of unmodeled dynamics using sliding mode application to robot manipulators, in *Proceedings of IEEE Symposium on Intelligent Control*, Monterey, C.A., USA, pp. 261-268, 1995.
- [13] J. H. Hwang, J. H. Kwak, G. Park, Adaptive interval type-2 fuzzy sliding mode control for unknown chaotic system, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 63, No. 3, pp. 491-502, 2011.
- [14] S. Khari, Z. Rahmani, B. Rezaie, Designing fuzzy logic controller based on combining combination of terminal sliding mode and state feedback controllers for stabilizing chaotic behavior in rod-type plasma torch system, *Transactions of the Institute Measurement and control*, Vol. IMEC 2015, pp. 1-15, 2015.