



طراحی سیستم کنترلی ANFIS با روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک جهت کنترل ارتعاشات تیر

رضا آزادیان^۱ و احمد باقری^۲^۱ کارشناس ارشد، دانشگاه گیلان^۲ استاد، دانشگاه گیلان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۲/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۱۱

چکیده

یکی از ملاحظات مهم در طراحی سازه‌ها، تحلیل ارتعاشات سازه و کنترل آن می‌باشد. از این‌رو نحوه کنترل و فرونشاندن ارتعاشات، یکی از مسائل مهم در طراحی سازه‌ها می‌باشد. همچنین وابستگی بین خواص مکانیکی و الکتریکی مواد پیزوالکتریک باعث شده تا استفاده از این مواد به عنوان حسگر و عملگر برای کنترل پاسخ سازه‌ها بسیار مناسب باشد. در کار حاضر از سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی به همراه روش بهینه سازی ژنتیک استفاده شده است. از روش مذکور می‌توان به عنوان یکی از شیوه‌های نوین، برای تحلیل و طراحی سیستم‌های پیچیده و غیر دقیق استفاده نمود. جهت مدلسازی سازه از روش اجزاء محدود بر اساس تئوری تیر اویلر برنولی و تئوری خطی مواد پیزوالکتریک انجام شده است. سهم لایه‌های حسگر و عملگر بر روی جرم و سختی تیر در مدلسازی کامل سازه در نظر گرفته شده است. به عنوان نتیجه، روش پیشنهادی زمان نشست و فراجاهش پاسخ تیر را به مقدار قابل توجهی کاهش داده است. کلیه محاسبات و رسم نمودارها توسط نرم افزار متلب انجام شده است.

کلمات کلیدی: کنترل ارتعاشات؛ ANFIS؛ الگوریتم ژنتیک، تیر اویلر برنولی؛ روش اجزاء محدود.

Design of ANFIS Control System Using Genetic Algorithm Optimization Method to Vibration control on a Beam

R. Azadian¹, A. Bagheri²¹ MA. Student, Mech. Eng., Guilan Univ., Rasht, Iran² Professor, Mech. Eng., Guilan Univ., Rasht, Iran

Abstract

One of the most important considerations in structures design are analysis and control of structure vibrations. Structures experience undesired and unexpected vibrations due to the perturbation sources, swinging loads and dynamic forces in the operating conditions. Vibrations caused result in Various injuries such as crack growth, fatigue and instability of structure, In addition to Sound pollution. Hence how to control and suppress vibrations is one of the important issue in the design of structures. Also, The dependence between mechanical and electrical properties of piezoelectric materials has led to the use of these materials as sensors and actuator to control the structural response is very good. In this paper, we use adaptive neural-fuzzy inference system with genetic algorithm to dampen the vibrations. The above method can be used as a novel approach for control of complex and inaccurate systems. Finite element modeling of structure has been carried out on the basis of Euler Bernoulli beam theory and the theory of linear piezoelectric materials. As a result, the proposed method significantly reduces the settling time and Maximum overshoot. All calculations and plotting graphs in MATLAB software is done.

Keywords: Vibration Control; ANFIS; Genetic Algorithm; Euler Bernoulli Beam; Finite Element Method.

۱- مقدمه

در این مقاله یک تیر فولادی با ضخامت و ابعاد مشخص به گونه ای در نظر گرفته می شود که از یک طرف گیردار شده است. از یک لایه پیزوالکتریک به عنوان حسگر و یک لایه به عنوان عملگر که روی سطوح فوقانی و تحتانی تیر نصب شده اند استفاده شده است. مدلسازی اجزاء محدود تیر به همراه لایه های پیزوالکتریک بر اساس تئوری تیر اویلر برنولی و تئوری خطی مواد پیزوالکتریک انجام شده و معادله دینامیکی حرکت سازه با در نظر گرفتن جرم و سختی لایه های پیزوالکتریک بدست می آید. از تاثیرات دما بر روی خواص مکانیکی و الکتریکی مواد پیزوالکتریک و کوپلینگ بین آنها در فرمول سازی اجزاء محدود صرف نظر شده است. با حل معادله مذکور به روش عددی نیومارک^۱ و محاسبه تغییر مکان و سرعت هر گره از المان در گام های مختلف زمانی، ولتاژ تولید شده توسط سنسور در اثر کرنش ایجاد شده در تیر و تغییرات آن محاسبه می شود. سپس ولتاژ و تغییرات آن به عنوان دو متغیر ورودی وارد سیستم کنترلی شده و سیستم کنترلی بر اساس آنها سیگنال مناسبی در هر لحظه به لایه پیزوالکتریک عملگر وارد نموده که در نهایت منجر به دفع ارتعاش تیر می شود.

مرجع [۱] کنترل ارتعاشات جانبی تیر را با تکنیک جابدهی قطب و کنترل فیدبک خروجی انجام داده است. مراجع [۲ و ۳] به ترتیب کنترل ارتعاشات تیر را با روش کنترل فازی بهینه شده بوسله PSO و استفاده از روش بهینه سازی تجمعی ذرات مورد بررسی قرار داده است. در [۴] با تبدیل مدل المان محدود به فضای حالت و استفاده از یک قانون کنترلی فیدبک به بررسی کنترل ارتعاشات تیر دو سر مفصل و محل قرارگیری محرک پرداخته است. در [۵] تاثیر دما بر خواص مکانیکی و الکتریکی را در نظر گرفته و از کنترلر مشتق گیر و کنترل بهینه LQR جهت کنترل ارتعاشات استفاده نموده است. مرجع [۶] کنترل ارتعاشات تیر را با در نظر گرفتن سهم جرم و سفتی لایه های پیزوالکتریک در مدلسازی کل سازه انجام داده است. در [۷] با معرفی شاخصی به عنوان شاخص کنترل پذیری، محل بهینه قرارگیری عملگرها را مشخص شده است. مرجع [۸]

کنترل فعال ارتعاشات یک تیر یک سرگیردار را با استفاده از روش فازی مورد بررسی قرار داده است. در این روش نیز معادلات الکترومکانیکی به روش اجزاء محدود و براساس تئوری تیر اویلر برنولی و تئوری خطی مواد پیزوالکتریک بدست آمده است.

۲- مواد پیزوالکتریک

اثر پیزوالکتریک در سال ۱۸۸۰ به وسیله پیرکوری و ژاک کوری^۲ کشف شد. همچنین در سال ۱۸۸۱ خاصیت معکوس پیزوالکتریک توسط گابریل لیب من^۳ کشف شد. در حالت حسگری، تغییر شکل های مکانیکی یا حرارتی ایجاد شده در سازه را می توان با اندازه گیری پتانسیل الکتریکی ایجاد شده در ماده پیزوالکتریک بدست آورد، که به آن خاصیت مستقیم پیزوالکتریک گفته می شود. در حالی که در حالت عملگری تغییر شکل یا کرنش سازه را می توان با اعمال پتانسیل الکتریکی مناسب به ماده پیزوالکتریک کنترل نمود (خاصیت معکوس). بنابراین با بکار بردن لایه های پیزوالکتریک به عنوان حسگر و عملگر امکان طراحی سازه هایی با مقاومت بالا، سختی زیاد و وزن کم همراه با خاصیت خود بازیابی و خود کنترلی وجود دارد. این تکنولوژی اخیراً کاربرد زیادی در کنترل فعال ارتعاشات، کنترل تغییر شکل سازه ها، صنایع هوافضا و... پیدا کرده است. برای ماده پیزوالکتریک خطی، با توجه به [۹] روابط (۱) و (۲) که معادلات بنیادین نامیده می شوند، رابطه ای بین متغیرهای مکانیکی و الکتریکی را بیان می کنند.

$$\sigma = c^E S - e^T \quad (1)$$

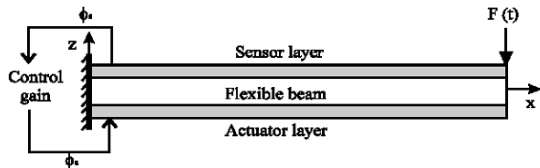
$$D = eS + \varepsilon^S \quad (2)$$

σ تنش مکانیکی، D چگالی بار (بار در واحد سطح)، S کرنش مکانیکی، C^E سختی مکانیکی، e ثابت کرنشی پیزوالکتریک، E میدان الکتریکی و گذردهی الکتریکی می باشد. بالوندهای E و S به ترتیب نشان دهنده مقادیر اندازه گیری شده در میدان الکتریکی ثابت و کرنش ثابت می باشند. اولین معادله، بیانگر اثر معکوس پیزوالکتریک بوده و دومین معادله اثر مستقیم پیزوالکتریک را نشان می دهد.

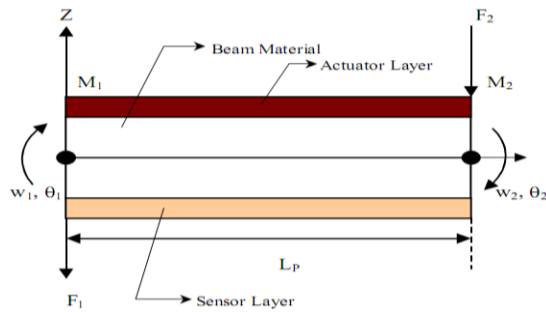
² Jacques Curie

³ Gabriel Lippmann

¹ Newmark



شکل ۱- تیر یکسر گیردار به همراه لایه‌های پیزوالکتریک



شکل ۲- المان تیر به همراه لایه‌های پیزوالکتریک

$$V = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left[\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \right]^2 dx = \frac{1}{2} \dot{u}^T [k] \dot{u} \quad (9)$$

سپس با توجه به معادلات تغییر مکان عرضی تیر، انرژی جنبشی و انرژی کرنشی خمشی تیر ماتریس‌های جرم و سختی المان به صورت زیر حاصل می‌شوند.

$$M_e = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$K_e = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

همچنین ماتریس جرم و سختی کل برای المان تیر به همراه لایه‌های پیزوالکتریک نصب شده در بالا و پایین سطوح با استفاده از روابط ۱۲ تا ۱۵ محاسبه می‌شود. اندیس‌های b و p به ترتیب معرف تیر و پیزوالکتریک می‌باشند.

$$M_{tot} = M_b + 2M_p \quad (12)$$

$$K_{tot} = \frac{EI_{eq}}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$EI_{eq} = E_b I_b + 2E_p I_p \quad (14)$$

$$I_p = \frac{bt_p^3}{12} + bt_p \left(\frac{t_b + t_p}{2} \right)^2 \quad (15)$$

همچنین ماتریس کوپلینگ الکترومکانیکی و ماتریس ضرایب دی الکتریک پیزوالکتریک بر اساس تئوری تیر اویلر برنولی برای هر المان با توجه به [۱۱] به صورت زیر بدست آمده است:

۳- مدل سازی مجموعه تیر و لایه‌های پیزوالکتریک

به روش اجزاء محدود

مسئله ای که در این قسمت به آن اشاره می‌شود، تعیین مدل دینامیکی برای یک تیر یکنواخت یک سرگیردار با دو لایه پیزوالکتریک که به عنوان سنسور و عملگر در بالا و پایین تیر چسبیده شده است، می‌باشد.

شکل ۱ یک تیر لایه گذاری شده با مواد پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. فرض می‌شود که لایه‌های پیزوالکتریک به صورت کامل بر سطوح تیر چسبیده شده اند و همچنین ضخامت لایه‌های چسب ناچیز در نظر گرفته می‌شود. بنابراین سهم لایه‌های چسب در جرم و سختی تیر قابل اغماض می‌باشد. ولیکن سهم لایه‌های سنسور و عملگر در جرم و سختی تیر در نظر گرفته می‌شود.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، المان تیر با دو گره در المان و دو درجه آزادی در هر گره (درجات آزادی مربوط به تغییر مکان در جهت z و چرخش حول محور y) در نظر گرفته می‌شود.

میدان جابجایی تیر به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\{u\} = [N]^T \{u^e\} = [N_1(x) \ N_2(x) \ N_3(x) \ N_4(x)] \begin{bmatrix} w_1 \\ \theta_1 \\ w_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$N(x)$ بردار توابع شکل و $w_1, \theta_1, w_2, \theta_2$ درجه آزادی گره‌های یک و دو می‌باشد. توابع شکل المان با در نظر گرفتن یک معادله درجه سوم به عنوان تغییر مکان عرضی نقاط داخلی این المان بر حسب x و اعمال شرایط مرزی به صورت زیر بدست می‌آیند [۱۰].

$$N_1(x) = 1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3} \quad (4)$$

$$N_2(x) = x - \frac{2x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2} \quad (5)$$

$$N_3(x) = \frac{3x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3} \quad (6)$$

$$N_4(x) = -\frac{x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2} \quad (7)$$

همچنین انرژی جنبشی و انرژی کرنشی خمشی به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^l \rho A \left[\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \right]^2 dx = \frac{1}{2} \dot{u}^T [m] \dot{u} \quad (8)$$

$$[M^{uu}]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K^{uu}]\{u\} = \{F_m\} + \{F_c\} \quad (20)$$

$$[K^{u\phi}]\{u\} + [K^{\phi\phi}]\{\phi\} = \{F_q\} \quad (21)$$

$$\{F_c\} = [K^{u\phi}]\{\phi\} \quad (22)$$

در این روابط، M^{uu} ماتریس جرم عمومی، C ماتریس میرایی عمومی، K^{uu} ماتریس سختی عمومی، $K^{u\phi}$ ماتریس کوپلینگ الکترومکانیکی و $K^{\phi\phi}$ ماتریس ضرایب دی‌الکتریک پیژوالکتریک می‌باشد. بردار U میدان جابجایی و بردار ϕ میدان پتانسیل الکتریکی می‌باشد. F_m نیروی خارجی اعمال شده بر سازه و F_c نیروی کنترلی می‌باشد. برای ارتعاشات آزاد F_m برابر با صفر است. حال معادله حرکت سازه را به روش عددی نیومارک با اعمال نیروی تحریک اولیه حل کرده و به کنترل ارتعاشات آن می‌پردازیم.

۴- طراحی کنترل کننده

در شکل ۳ بلوک دیاگرام کنترل ارتعاش تیر نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود ولتاژ تولید شده در سنسور و تغییرات آن به عنوان دو سیگنال ورودی وارد کنترلر شده، آنگاه کنترلر با پردازش آنها، سیگنال کنترلی مناسبی را در هر لحظه به عملگر ارسال می‌کند.

۵- سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی^۲

هدف از منطق فازی، استخراج نتایج دقیق با استفاده از مجموعه‌ای از قوانین اگر- آنگاه فازی است که توسط افراد خبره و متخصص تعریف شده است. از طرفی شبکه عصبی قابلیت آموزش و یادگیری داشته و می‌تواند با استفاده از داده‌های مشاهده شده، پارامترهای شبکه را به نحوی تعیین کردند که به ازای ورودی دلخواه، خروجی مطلوب حاصل شود.

ANFIS یک شبکه عصبی پنج لایه مبتنی بر سیستم‌های فازی است که ساختار آن در شکل ۴ نشان داده شده است. مدل فازی TSK^۳ مرتبه اول را می‌توان بر اساس مجموعه‌ای از قوانین اگر - آنگاه فازی به صورت زیر نشان داد:

$$K_{u\phi} = e_{31} b r \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$K_{\phi\phi} = \varepsilon b l_e \begin{bmatrix} \frac{1}{t_p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{t_p} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$r = \frac{t_b + t_p}{2} \quad (18)$$

در روابط بالا l طول المان مورد نظر، A سطح مقطع المان، ρ دانسیته جرمی، E مدول الاستیسیته، I ممان اینرسی دوم سطح مقطع، b عرض تیر، t ضخامت، e_{31} ثابت تنش پیژوالکتریک، ε ضریب دی‌الکتریک و r فاصله اندازه‌گیری شده مرکز لایه پیژوالکتریک تا تار خنثی تیر می‌باشد.

ماتریس‌های جرم و سختی المان پیژوالکتریک (حسگر و عملگر) نیز شبیه المان تیر محاسبه می‌شوند. سپس برای بدست آوردن ماتریس جرم و سختی المان تیر هوشمند ماتریس‌های المان جرم و سختی دو لایه پیژوالکتریک و تیر هر سه به یکدیگر اضافه می‌شوند. در نتیجه تیر یک سر گیردار با سرهم کردن المان‌های تیر هوشمند مدلسازی می‌شود. برای سرهم کردن ماتریس المان‌ها، گره‌های مشترک با یکدیگر جمع می‌شوند. بدین صورت که دو ردیف و دو ستون آخر ماتریس المان اول به دو ردیف و دو ستون اول ماتریس المان دوم اضافه می‌شود. سپس ماتریس‌های جرم و سختی کل سازه بدست می‌آید. آنگاه شرایط مرزی بر روی ماتریس‌های کل اعمال شده و دو ردیف و دو ستون ماتریس‌های کل به عنوان یک انتهای گیردار تیر حذف می‌شود.

ماتریس میرایی سازه‌ای با در نظر گرفتن ضرایب میرایی رایلی^۱ α و β به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C = \alpha * M + \beta * K \quad (19)$$

همچنین در شباهت با سرهم کردن ماتریس‌های المان جرم و سختی، ماتریس‌های المان کوپلینگ الکترومکانیکی و ضرایب دی‌الکتریک پیژوالکتریک نیز با هم جمع شده و ماتریس‌های کل بدست می‌آیند. معادله حرکت کل سازه به صورت زیر می‌باشد:

² Adaptive Neural Fuzzy Inference System

³Takagi sugeno kang

¹ Rayleigh Damping Coefficient

لایه دوم: شامل گره های قوانین است، هر گره در این لایه درجه فعالیت یک قانون را محاسبه می کند. در این لایه از عملگر "و" برای محاسبه درجه مشارکت هر قانون استفاده می شود. $O_{2,i}$ نمایانگر خروجی گره i ام در لایه دوم می باشد و برابر حاصلضرب درجه عضویت هر ورودی است.

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) * \mu_{B_i}(y) \quad i = 1,2 \quad (25)$$

لایه سوم: شامل گره های نرمالیزه می باشد که نسبت درجه مشارکت هر قانون به مجموع درجه مشارکت همه قوانین را محاسبه می کند. در نتیجه، w_i به صورت زیر تعریف می شود:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{k=1}^4 w_k} \quad (26)$$

لایه چهارم: مشتمل بر گره های تطبیقی است که با استفاده از پارامترهای نتیجه، خروجی هر گره را محاسبه می کند و به صورت زیر تعریف می شود:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (27)$$

که \bar{w}_i خروجی i امین گره از لایه قبلی است و $\{r_i, q_i, p_i\}$ پارامترهای تطبیقی خطی می باشند.

لایه پنجم: مشتمل بر گره خروجی است که مقدار نهایی خروجی را به صورت مجموع خروجی گره های لایه ماقبل بیان می کند.

$$O_{5,i} = \sum_{i=1}^4 \bar{w}_i f_i \quad (28)$$

شکل ۵ فرآیند استنتاج را در انفیس^۱ نشان می دهد.

۶- الگوریتم ژنتیک

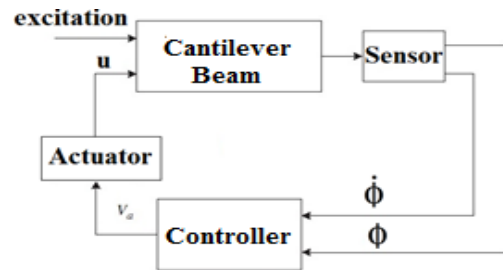
تمام اعضای زنده بدن از سلول ها تشکیل شده و هر سلول دارای یک یا چند کروموزوم است. یک کروموزوم را می توان به صورت مجموعه ای از ژن ها در نظر گرفت که هر ژن در مکان معینی بر روی کروموزوم قرار گرفته است. ژن ها عامل انتقال خصوصیات و رفتارهای موروثی از پدر و مادر به فرزندان هستند. مثلاً خصوصیتی مانند رنگ چشم، رنگ مو و فرم چهره همگی توسط ژن ها به فرزندان انتقال می یابند. در فضای مسئله نیز هر راه حل، مجموعه ای از کمیت ها و

قانون اول: اگر x برابر A_1 و y برابر B_1 باشد، آنگاه

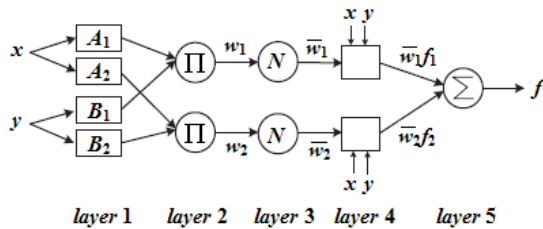
$$f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$$

قانون دوم: اگر x برابر A_2 و y برابر B_2 باشد، آنگاه

$$f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$$



شکل ۳- بلوک دیاگرام کنترل ارتعاشات تیر یکسر گیردار



شکل ۴- ساختار کلی سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی

هر لایه دارای گره های مختلف می باشد و هر گره در یک لایه ثابت یا تطبیقی است. لایه های مختلف با گره های متناظر آنها به طور خلاصه در زیر توصیف شده اند:

لایه اول، گره های ورودی: هر گره از این لایه، مقادیر عضویتی است که به هر یک از متغیرهای ورودی مدل (x, y) نسبت داده می شود. مقادیر عضویت بر اساس تعلق ورودی ها به هر یک از مجموعه های فازی A_i و B_i تعیین می شود. به عبارت دیگر، خروجی هر گره در این لایه درجه عضویت تخصیص داده شده به متغیرهای ورودی در مجموعه های فازی است، که به صورت زیر بیان می شود:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1,2 \quad (23)$$

$$O_{2,i} = \mu_{B_{i-1}}(y) \quad i = 3,4 \quad (24)$$

در روابط بالا x و y ورودی های غیرفازی گره i ام و A_i و B_i توابع عضویت فازی هستند. همچنین مقدار عضویت هر ورودی به عنوان خروجی لایه اول با $\mu_{A_i}(x)$ و $\mu_{B_i}(y)$ مشخص می شود.

¹ ANFIS

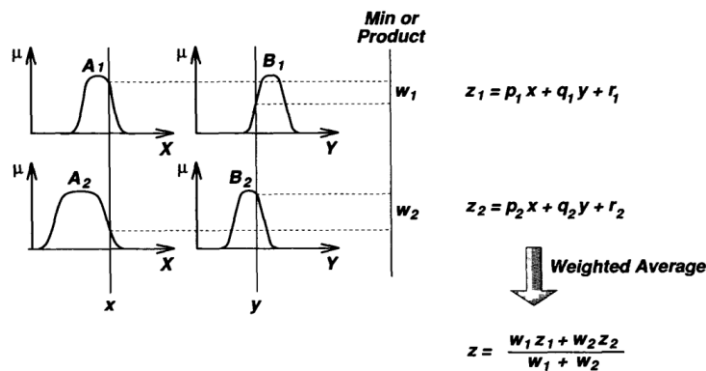
- ۱- در ابتدا ساختاری صحیح برای کروموزومها که همان راه-حل های مسئله هستند انتخاب می شود.
 - ۲- با تولید تصادفی مجموعه ای از جواب های مساله، جمعیت آغازین تشکیل می گردد.
 - ۳- با استفاده از یک روند انتخاب تصادفی، تعدادی از کروموزومها به عنوان والدین انتخاب می شوند.
 - ۴- با استفاده از عملگرهایی مانند ترکیب و جهش، فرزندان آنها تولید می گردند.
 - ۵- فرزندان، جایگزین والدین در جامعه می شوند.
- مراحل ۳ تا ۵ تا زمانی که جامعه به تکامل برسد ادامه می یابند.

متغیرها محسوب می شود. در الگوریتم ژنتیک راه حل را به شکل یک کروموزوم شبیه سازی می کنند [۱۲].

بنابراین رابطه بین علم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک را به این صورت می توان تعریف کرد:

- ژن ها: به عنوان کمیت ها و متغیرهای مسئله در نظر گرفته می شوند.
- کروموزوم: لیستی از کمیت ها بوده و نماینده یک راه حل از مسئله است.
- جمعیت: مجموعه تمام کروموزوم های یک نسل و یا به عبارتی مجموعه تمام راه حل های موجود در فضای جستجوی مسئله است.

حال که معادل های ارگانسیم های طبیعت، در الگوریتم ژنتیک بیان شد، نوبت به بررسی روند تکامل در این الگوریتم می رسد:



شکل ۵- فرآیند استنتاج در سیستم فازی عصبی تطبیقی

۷- کنترل ارتعاشات

در این قسمت به بررسی کنترل ارتعاشات تیر توسط لایه های پیزوالکتریک می پردازیم. کنترلر پیشنهادی از یک شبکه ANFIS به همراه ۲ ورودی و ۱ خروجی تشکیل شده است. ۶۴ پارامتر در کنترلر ANFIS ارائه شده دخیل هستند که پس از آموزش کنترلر توسط الگوریتم بهینه سازی تعیین می شوند. همه پارامترهای مربوط به شبکه ANFIS برای کل بازه زمانی ارتعاش تیر بصورت یک کروموزوم در نظر گرفته می شوند و هر کدام از پارامترها یک بیت هستند. مجموع قدر مطلق جابجایی عرضی هر گره از تیر در هر گام زمانی، تابع هدف مسئله می باشد که باید به سمت کمینه شدن میل کند. شکل ۶ بلوک دیاگرام کنترلر ANFIS را که بصورت خارج خط عمل می کند در سیستم ارتعاشی مورد نظر را نشان می دهد.

همچنین الگوریتم ژنتیک دارای اجزا و عملگرهایی می باشد. مهمترین اجزای الگوریتم عبارتند از:

- ساختار هر فرد^۱.
 - جمعیت.
 - تابع ارزیابی.
 - مکانیسم انتخاب والدین.
 - عملگرهای مختلف ترکیب و جهش.
 - مکانیسم ابقا (جایگزینی).
- همچنین شرایط پایان الگوریتم و فرآیند تعیین جمعیت آغازین نیز باید تعیین گردند.

¹ Individual

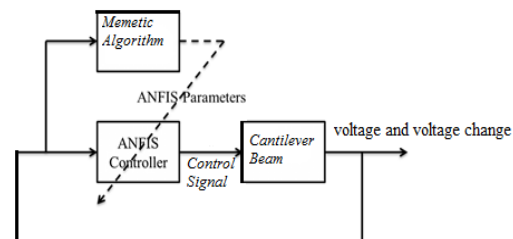
جدول ۱- ابعاد و خواص تیر فولادی و مواد پیزوالکتریک

BEAM	PIEZOELECTRIC
$L = 0.5 (m)$	$L = 0.5 (m)$
$b = 0.03 (m)$	$b = 0.03 (m)$
$t_b = 0.002 (m)$	$t_p = 4 * 10^{-5} (m)$
$\rho = 2700 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$\rho = 7500 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$
$E_p = 200 * 10^9 (pa)$	$E_p = 139 * 10^9 (pa)$
$\alpha = 0.001$	$d_{31} = 11 * 10^{-11} (m/V)$
$\beta = 0.0001$	$g_{31} = 0.010 \left(\frac{Vm}{N}\right)$
	$\epsilon = 15.93 * 10^{-9} \left(\frac{F}{m}\right)$

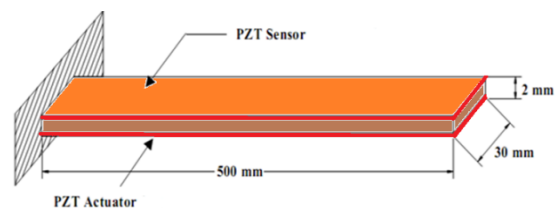
در شکل ۸ و شکل ۹ به ترتیب پاسخ زمانی نقاط واقع بر انتهای آزاد تیر و وسط تیر، بدون استفاده از سیستم کنترلی و همچنین با بکارگیری سیستم کنترلی ANFIS با آموزش الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.

با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که دامنه ارتعاشات نقاط مختلف تیر با استفاده از روش آموزش ژنتیک برای کنترلر مورد نظر، کاهش پیدا کرده و ارتعاشات تیر بخوبی میرا شده است. شکل ۱۰ پتانسیل الکتریکی تولید شده در لایه حسگر را در مدت زمانی که تیر ارتعاش می‌نماید، نشان می‌دهد.

شکل ۷ تیر مورد نظر به همراه لایه های پیزوالکتریک را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود دو لایه پیزوالکتریک نوع PZT در بالا و پایین سطوح تیر به عنوان حسگر و عملگر در نظر گرفته شده است. تمامی محاسبات و نمودارهای این قسمت، با برنامه نویسی توسط نرم افزار MATLAB انجام شده است. ابتدا با اعمال نیرویی برابر نیم نیوتن به انتهای آزاد تیر، یک تغییر مکان اولیه به آن داده شده، سپس به کنترل ارتعاشات آن پرداخته می شود. در جدول ۱ مشخصات تیر و مواد پیزوالکتریک آورده شده است.

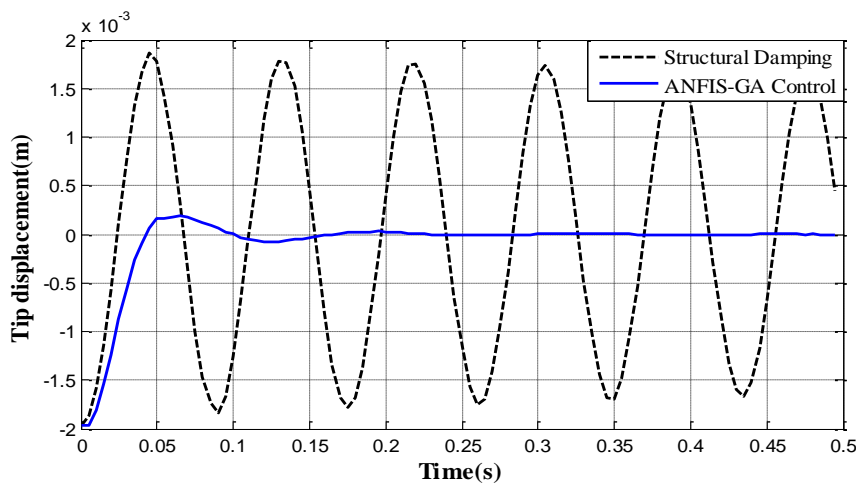


شکل ۶- طراحی کنترلر ANFIS با ژنتیک

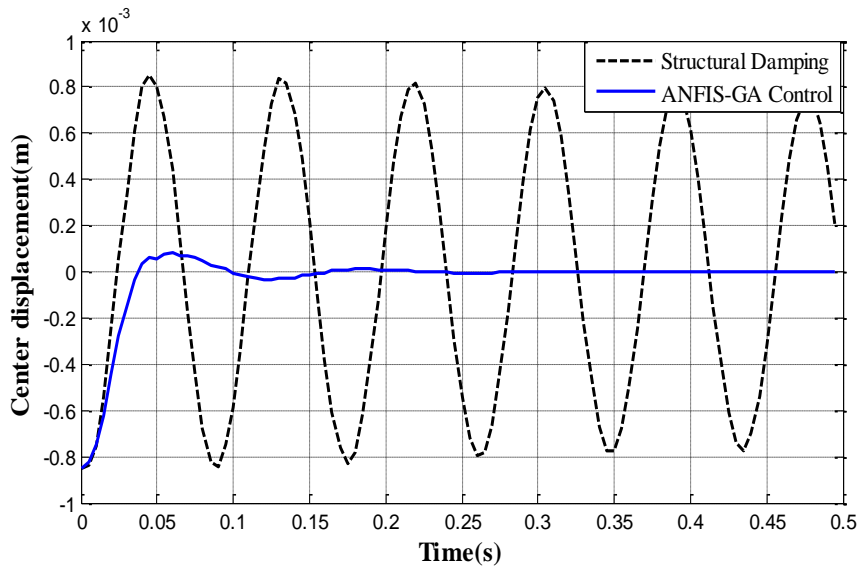


شکل ۷- تیر فولادی یک سر گیردار با لایه های

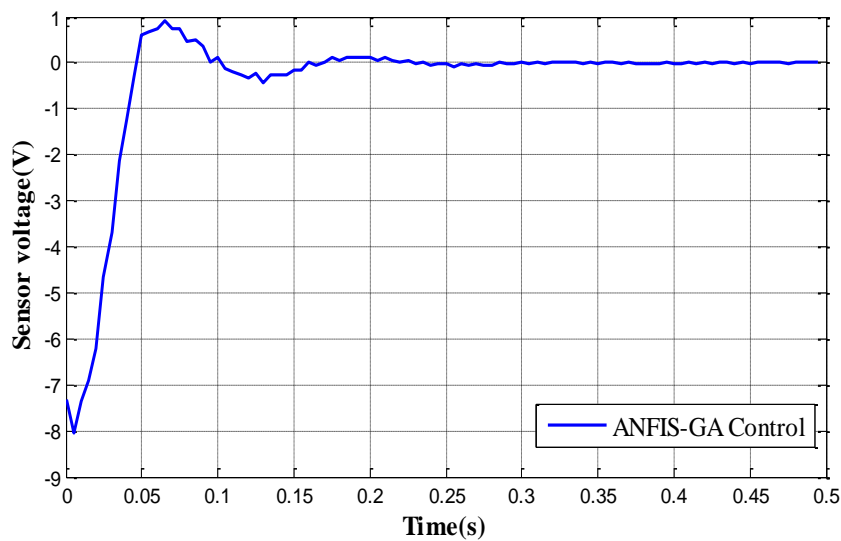
پیزوالکتریک PZT



شکل ۸- جابجایی انتهای آزاد تیر در اثر بارگذاری متمرکز



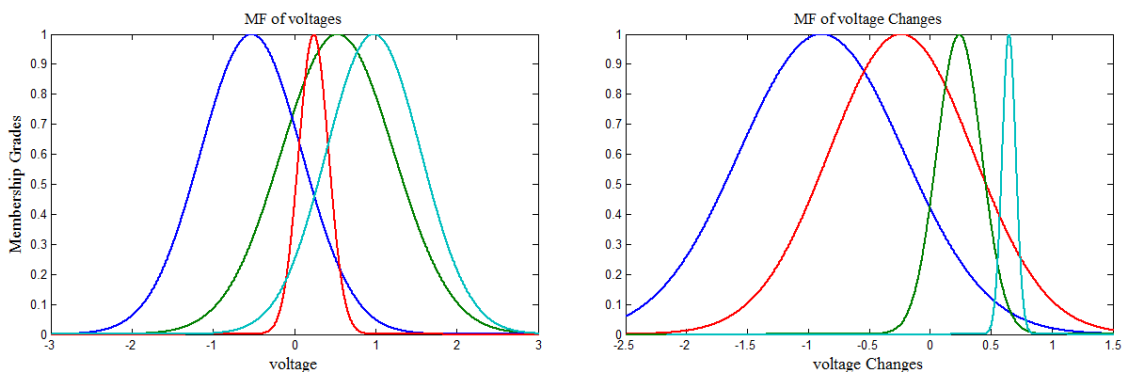
شکل ۹- جابجایی وسط تیر در اثر بارگذاری متمرکز



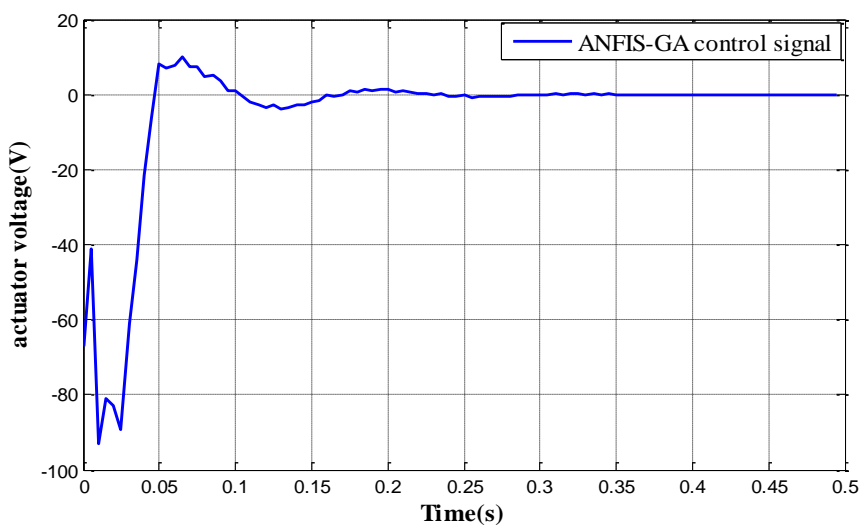
شکل ۱۰- پتانسیل الکتریکی لایه حسگر

برای ارزیابی و بررسی پاسخ سیستم کنترلی طراحی شده به بارهای هارمونیک، تیر با دو فرکانس ۱۰۰ هرتز و ۷۳/۳۱ هرتز (فرکانس اول سازه) و در مدت زمان مشابه، تحریک می‌شود. در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ به ترتیب پاسخ زمانی نقاط واقع بر انتهای آزاد تیر نشان داده شده است.

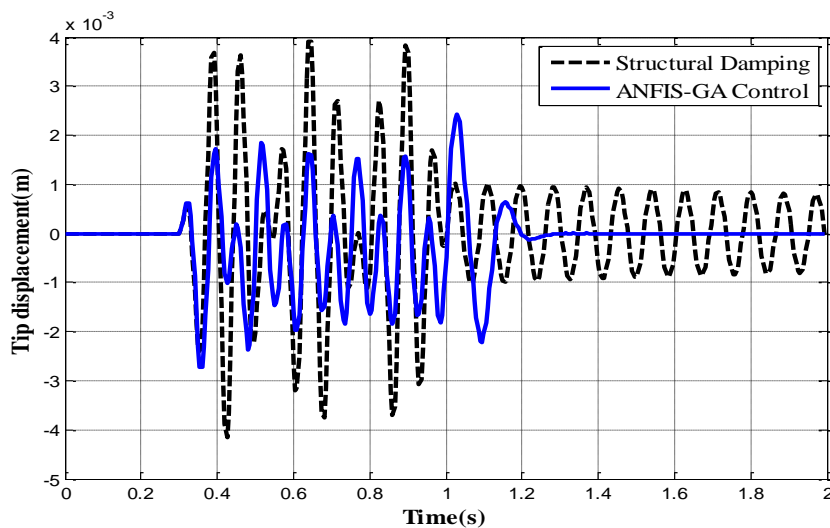
همچنین در شکل ۱۱ توابع عضویت بدست آمده از روش آموزش ژنتیک نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۲ سیگنال کنترلی تولید شده توسط کنترل‌کننده ANFIS که همان پتانسیل الکتریکی اعمالی به لایه عملگر پیزوالکتریک می‌باشد، نشان داده شده است.



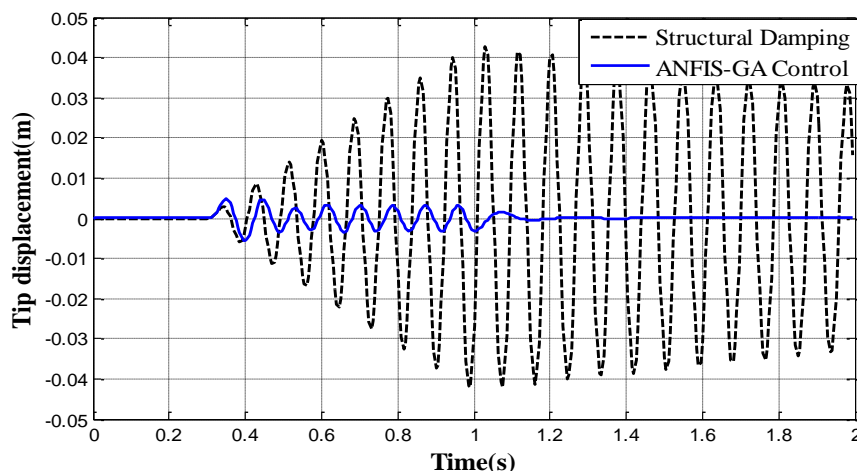
شکل ۱۱- توابع عضویت بدست آمده از روش ژنتیک در بارگذاری متمرکز



شکل ۱۲- سیگنال کنترلی اعمالی به لایه عملگر



شکل ۱۳- جابجایی انتهای آزاد تیر در اثر بارگذاری هارمونیک با فرکانس ۱۰۰ هرتز



شکل ۱۴- جابجایی انتهای آزاد تیر در اثر بارگذاری هارمونیک با فرکانس ۷۳/۳۱ هرتز

- cantilever beam using smart material. J Eng 19(1): 82-95.
- [2] Marinaki M, Marinakis Y, Stavroulakis GE (2010) Fuzzy control optimized by PSO for vibration suppression of beam. Control Eng Pract 18: 618-629.
- [3] Marinaki M, Marinakis Y, Stavroulakis GE (2011) Vibration control of beams with piezoelectric sensors and actuators using particle swarm optimization. Expert Sys Appl 38: 6872-6883.
- [4] Wang Q, Wang CM (2001) A controllability index for optimal design of piezoelectric actuators in vibration control of beam structures. J Sound Vib 242(3): 507-518.
- [5] Narayanan S, Balamurugan V (2003) Finite element modelling of piezolaminated smart structures for active vibration control with distributed sensors and actuators. J Sound Vib 262: 529-562.
- [6] Chhabra D, Chandna P, Bhushan G (2011) Design and analysis of smart structures for active vibration control using piezo-crystals. Int J Eng Tech 1(3): 153-163.
- [7] Xu SX, Koko TS (2004) Finite element analysis and design of actively controlled piezoelectric smart structures. Finite Elem Anal Des 40: 241-262.
- [8] Karami-mohammadi A, Sadri A (2009) An active vibration control of beam by piezoelectric with fuzzy approach. Int J Signal Sys Control Eng Appl 2(2): 1-7.
- [9] Tiersten HS (1969) Linear piezoelectric plate vibrations-elements of the linear theory of piezoelectricity and the vibration of piezoelectric plates. New York Plenum Press.

با توجه به شکل‌های فوق مشاهده می‌شود که دامنه ارتعاشات نقاط مختلف تیر در بارگذاری متمرکز که در انتهای آزاد آن اعمال می‌شود، با استفاده از روش آموزش ژنتیک برای کنترلر مورد نظر، به خوبی کاهش پیدا کرده و ارتعاشات تیر به سرعت میرا شده است. همچنین در بارگذاری هارمونیک عملکرد مناسب کنترلر جهت کنترل دامنه ارتعاشات مشاهده گردید.

۸- نتایج

در این مقاله کنترل ارتعاشات یک تیر یک سرگیردار فولادی توسط لایه‌های پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفت. از سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی به عنوان کنترلر برای میرایی نوسانات استفاده شد. همچنین برای بهینه سازی پارامترهای غیر خطی توابع عضویت و نیز پارامتره خطی سوگنواز الگوریتم ژنتیک استفاده شد. بدین منظور با هدف قرار دادن مجموع جابجایی عرضی گره‌های در نظر گرفته شده برای تیر، عمل بهینه سازی این پارامترها انجام گردید. نتایج نشان می‌دهد که با بکارگیری کنترل کننده فازی عصبی تطبیقی به همراه روش بهینه‌سازی ژنتیک می‌توان زمان نشست و فراجاهش پاسخ جابجایی تیر را به مقدار قابل توجهی کاهش داد.

۹- مراجع

- [1] Majeed WI, AlSamarraie SA, Mohanad (2013) Vibration control analysis of a smart flexible

- [13] Hossain Nezhad Shirazi A, Owji HR, Rafeeyan M (2011) Active vibration control of an FGM rectangular plate using fuzzy logic controllers. *Procedia Eng* 14: 3019-3026.
- [14] Wang Li (1996) A course in fuzzy systems and control. Prentice-Hill, Englewood Cliffs, NJ.
- [15] Balamurugan V, Narayanan S (2001) Active vibration control of piezolaminated smart beams. *Def Sci J* 51(2): 103-114.
- [10] Singiresu S, Rao (2011) *Mechanical Vibrations*. 5th edn. Pearson Education, Inc, Publishing as Prentice Hall. pages 995-998.
- [11] Piefort V (2001) Finite element modeling of piezoelectric active structures. Ph.D. dissertation, Universite Libre De Bruxelles, Dept of Applied Science.
- [۱۲] جاوی م (۱۳۹۰) پیاده‌سازی و حل مسائل کاربردی با الگوریتم ژنتیک. انتشارات آریا پژوه.