



## طراحی سیستم کنترلی ANFIS با روش ممتیک جهت کنترل ارتعاشات تیر با استفاده از مواد پیزوالکتریک

رضا آزادیان<sup>۱\*</sup> و احمد باقری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشگاه گیلان

<sup>۲</sup> استاد، دانشگاه گیلان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۱۴، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۲۹

### 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. در کار حاضر از سیستم استنتاج فازی عصبی ANFIS به همراه الگوریتم ممتیک استفاده شده است. الگوریتم ممتیک، نوعی الگوریتم تکاملی می‌باشد که برای بهینه‌سازی یک مسئله، از روش ترکیب جستجوهای محلی با دیگر الگوریتم‌های تکاملی بهره می‌برد و منجر به دستیابی به پاسخهای بهتر در زمان کمتر می‌گردد. در این مقاله با توجه به تکامل رفتاری در حل یک مسئله بهینه‌سازی، استراتژی جدیدی برای الگوریتم‌های ممتیک ارائه شده است. با تعیین یک پارامتر تطبیقی برای الگوریتم در هر تکرار، تعداد جمعیت، احتمال جهش و شرایط ورود به الگوریتم‌های جستجوی محلی را می‌توان به صورت تطبیقی تعیین نمود. از این الگوریتم برای کنترل ارتعاشات یک تیر همراه با کنترلر ANFIS استفاده شده است که پارامترهای متغیر شبکه کنترلی مورد نظر توسط الگوریتم‌های ژنتیک و ممتیک تعلیم داده شده است. با مقایسه نتایج تعلیم کنترلر توسط الگوریتم ممتیک با نتایج حاصل از تعلیم کنترلر توسط الگوریتم ژنتیک، کاهش زمان نشست و فراجاهش پاسخ تیر را می‌توان نشان داد.

**کلمات کلیدی:** کنترل ارتعاشات؛ ANFIS؛ الگوریتم ممتیک، تیر اوبلر برنولی؛ روش اجزاء محدود.

## Design of ANFIS Control System Using Memetic Method to Vibration Control on a Beam with Piezoelectric Materials

R. Azadian<sup>1,\*</sup>, A. Bagheri<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MA. Student, Mech. Eng., Guilan Univ., Rasht, Iran

<sup>2</sup> Professor, Mech. Eng., Guilan Univ., Rasht, Iran.

### Abstract

One of the most important considerations in structures design are analysis and control of structure vibrations. Hence how to control and suppress vibrations is one of the important issue in the design of structures. In this paper, we use neural-fuzzy inference system with memetic algorithm to dampen the vibrations. Memetic algorithm is an evolutionary algorithm and leads to better responses in an optimization problem. In this study, with respect to the evolution of behavior in an optimization problem, an adaptive strategy is proposed for the memetic algorithm. By defining an adaptive parameter for the algorithm in each iteration, number of population, mutation probability and entry conditions to local search algorithm can be determined adaptively. The adaptive algorithm used to vibration control of beam with an ANFIS controller. The variable parameters to control network has been trained by memetic and genetic algorithms. Comparison of results shows that reduces the settling time and Maximum overshoot.

**Keywords:** Vibration Control; ANFIS; Memetic Algorithm; Euler Bernoulli Beam; Finite Element.

## ۱- مقدمه

امروزه برای کنترل فعال ارتعاشات سازه ها از سیستم های کنترل فعال استفاده می شود. در این سیستم ها با استفاده از حسگرهای ساخته شده از مواد هوشمند پاسخ سازه اندازه گیری شده و پس از پردازش توسط سیستم کنترلی دستور کنترلی مناسب برای استهلاک ارتعاشات به عملگرهای ساخته شده از این مواد ارسال می گردد. 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. برای صحت‌گذاری مدل ساخته شده به روش اجزاء محدود، فرکانس‌های طبیعی تیر با استفاده از فرمول ریاضی و روش اجزاء محدود محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه شده و تطابق بسیار خوبی مشاهده شده است. 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<sup>۱</sup> 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.

ماجد و همکارانش [۱] کنترل ارتعاشات جانبی تیر را با تکنیک جابدهی قطب و کنترل فیدبک خروجی انجام داده است. ماریناکی [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. ونگ [۴] با تبدیل مدل المان محدود به فضای حالت و استفاده از

<sup>۱</sup> Newmark

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.

سیستم کنترلی پیشنهادی سیستم استنتاج فازی عصبی می باشد. تحقیقات برای مدلسازی شیوه عملکرد انسان منجر به ایجاد دو زمینه تحقیقاتی جدید، شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی گردیده است.

شبکه‌های عصبی سیستم های دینامیکی هستند که با الگوبرداری از نحوه عملکرد سیستم عصبی و مغز انسان با پردازش بر روی داده های تجربی، دانش یا قانون نهفته در ورای داده ها را به ساختار شبکه منتقل می کنند و با تکیه بر قابلیت یادگیری و توانایی پردازش موازی قادر به حل مسائل پیچیده می‌باشند.

سیستم های فازی بر پایه نحوه تصمیم‌گیری تقریبی انسان به مدلسازی کمیت ها به صورت کیفی و شهودی پرداخته و به این ترتیب در مواجهه با نامعینی‌ها تلاش می‌کنند. سادگی و قابلیت فهم این روش از مزایای آن محسوب می‌شود. سیستم های فازی عصبی با ترکیب دو روش از قابلیت یادگیری و پردازش موازی شبکه های عصبی و استنتاج تقریبی فازی استفاده می کنند.

در این مقاله یک شبکه فازی عصبی با فیدبک داخلی برای کنترل ارتعاش تیر مورد نظر طراحی شده است. سپس الگوریتم‌های مختلف تکاملی شامل ژنتیک و ممیتیک در آموزش این شبکه ها مطرح شده و به مقایسه آنها پرداخته شده است. همچنین نشان داده می شود که بکار بردن روش ممیتیک منجر به دستیابی به پاسخ‌های بهتر در زمان کمتر می‌گردد.

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

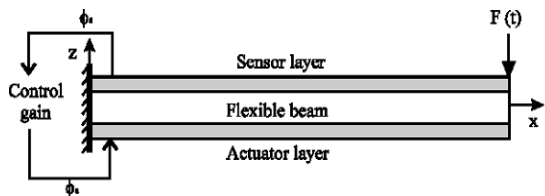
همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود، المان تیر با دو گره در المان و دو درجه آزادی در هر گره (درجات آزادی مربوط به تغییر مکان در جهت z و چرخش حول محور y) در نظر گرفته می شود.

میدان جابجایی تیر به صورت زیر تعیین می شود:

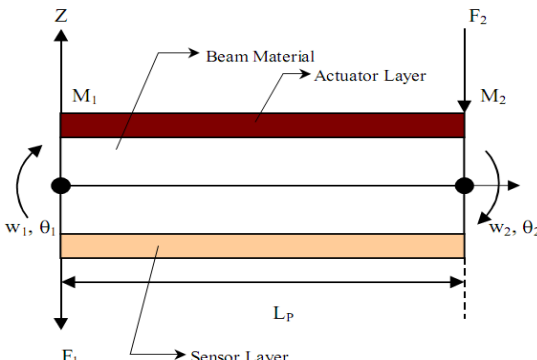
$$\{u\} = [N]^T \{u^e\}$$

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

$N(x)$  بردار توابع شکل و  $w_1, w_2, \theta_1, \theta_2$  درجه آزادی گره های یک و دو می باشد. 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 می آیند [۱].



شکل ۱- تیر یکسر گیردار به همراه لایه های پیزوالکتریک [۵]



شکل ۲- المان تیر به همراه لایه های پیزوالکتریک

## ۲- مواد پیزوالکتریک

اثر پیزوالکتریک در سال ۱۸۸۰ به وسیله پیرکوری و ژاک کوری<sup>۱</sup> کشف شد. همچنین در سال ۱۸۸۱ خاصیت معکوس پیزوالکتریک توسط گابریل لیپ من<sup>۲</sup> 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 بازبینی 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 بین متغیرهای مکانیکی و الکتریکی را بیان می کنند.

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

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

$\sigma$  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.

## ۳- مدلسازی مجموعه تیر و لایه های پیزوالکتریک

### به روش اجزاء محدود

مساله ای که در این قسمت به آن اشاره می شود، 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، می باشد.

<sup>1</sup> Jacques Curie

<sup>2</sup> Gabriel Lippmann

$$K_{\phi\phi} = \varepsilon b l_e \begin{bmatrix} \frac{1}{t_p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{t_p} \end{bmatrix} \quad (۱۷)$$

$$r = \frac{t_b + t_p}{2} \quad (۱۸)$$

در روابط بالا  $l$  طول المان مورد نظر،  $A$  سطح مقطع المان  $\rho$  دانسیته جرمی،  $E$  مدول الاستیسیته،  $I$  ممان اینرسی دوم سطح مقطع،  $b$  عرض تیر،  $t$  ضخامت،  $e_{31}$  ثابت تنش پیزوالکتریک،  $\varepsilon$  ضریب دی الکتریک و  $r$  فاصله اندازه گیری شده مرکز لایه پیزوالکتریک تا تار خنثی تیر می باشد.

ماتریس های جرم و سختی المان پیزوالکتریک (حسگر و عملگر) نیز شبیه المان تیر محاسبه می شوند. سپس برای بدست آوردن ماتریس جرم و سختی المان تیر هوشمند ماتریس های المان جرم و سختی دو لایه پیزوالکتریک و تیر هر سه به یکدیگر اضافه می شوند. در نتیجه تیر یک سر گیردار با سرهم کردن المان های تیر هوشمند مدل سازی می شود. برای سرهم کردن ماتریس المان ها، گره های مشترک با یکدیگر جمع می شوند. بدین صورت که دو ردیف و دو ستون آخر ماتریس المان اول به دو ردیف و دو ستون اول ماتریس المان دوم اضافه می شود. سپس ماتریس های جرم و سختی کل سازه بدست می آید. آنگاه شرایط مرزی بر روی ماتریس های کل اعمال شده و دو ردیف و دو ستون ماتریس های کل به عنوان یک انتهای گیردار تیر حذف می شود.

ماتریس میرایی سازه ای با در نظر گرفتن ضرایب میرایی رایلی<sup>۱</sup>  $\alpha$  و  $\beta$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$C = \alpha * M + \beta * K \quad (۱۹)$$

همچنین در شباهت با سرهم کردن ماتریس های المان جرم و سختی، ماتریس های المان کوپلینگ الکترومکانیکی و ضرایب دی الکتریک پیزوالکتریک نیز با هم جمع شده و ماتریس های کل بدست می آیند. معادله حرکت کل سازه به صورت زیر می باشد:

$$[M^{uu}]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K^{uu}]\{u\} = \{F_m\} + \{F_c\} \quad (۲۰)$$

$$[K^{u\phi}]\{u\} + [K^{\phi\phi}]\{\phi\} = \{F_q\} \quad (۲۱)$$

$$\{F_c\} = [K^{u\phi}]\{\phi\} \quad (۲۲)$$

$$N_1(x) = 1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3} \quad (۴)$$

$$N_2(x) = x - \frac{2x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2} \quad (۵)$$

$$N_3(x) = \frac{3x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3} \quad (۶)$$

$$N_4(x) = -\frac{x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2} \quad (۷)$$

همچنین انرژی جنبشی و انرژی کرنشی خمشی به صورت زیر تعیین می شوند:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^l \rho A \left[ \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \right]^2 dx = \frac{1}{2} \dot{u}^T [m] \dot{u} \quad (۸)$$

$$V = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left[ \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \right]^2 dx = \frac{1}{2} \dot{u}^T [k] \dot{u} \quad (۹)$$

سپس با توجه به معادلات تغییر مکان عرضی تیر، انرژی جنبشی و انرژی کرنشی خمشی تیر ماتریس های جرم و سختی المان به صورت زیر حاصل می شوند.

$$M_e = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

$$K_e = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

همچنین ماتریس جرم و سختی کل برای المان تیر به همراه لایه های پیزوالکتریک نصب شده در بالا و پایین سطوح با استفاده از روابط ۱۲ تا ۱۵ محاسبه می شود. اندیس های  $b$  و  $p$  به ترتیب معرف تیر و پیزوالکتریک می باشند.

$$M_{tot} = M_b + 2M_p \quad (۱۲)$$

$$K_{tot} = \frac{EI_{eq}}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (۱۳)$$

$$EI_{eq} = E_b I_b + 2E_p I_p \quad (۱۴)$$

$$I_p = \frac{bt_p^3}{12} + bt_p \left( \frac{t_b + t_p}{2} \right)^2 \quad (۱۵)$$

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

$$K_{u\phi} = e_{31} b r \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۶)$$

<sup>۱</sup> Rayleigh Damping Coefficient

توجه به قیدهای اعمالی بر روی تیر و از روی معادله مشتقات جزئی تیر بدست می آید. برای یک تیر یک سر گیردار مقادیر ویژه در جدول ۲ آورده شده است.

با استفاده از مقادیر ویژه و با استفاده از رابطه (۱۹) فرکانس‌های طبیعی برای تیر مورد بحث طبق جدول ۳ خواهد بود.

از طرفی می توان فرکانس های طبیعی تیر را با استفاده از ماتریس های سختی و جرم بدست آمده به روش اجزاء محدود محاسبه نمود. در جدول ۴ مقادیر ۵ فرکانس اول تیر با در نظر گرفتن تعداد ۱۰ و ۲۰ عدد المان برای تیر نشان داده شده است.

جدول ۱- مقادیر ۵ فرکانس طبیعی اول مجموعه تیر و پیزوالکتریک

شماره فرکانس	مقدار فرکانس (هرتز)
۱	73.6138
۲	461.3452
۳	1292.0662
۴	2533.7017
۵	4194.9509

جدول ۲- مقادیر ویژه برای یک تیر یک سرگیردار

مقادیر ویژه $\lambda_i$	مقدار $\lambda_i$
۱	1.8751
۲	4.6941
۳	7.8547
۴	10.9955
۵	14.1371

جدول ۳- فرکانس های طبیعی تیر با استفاده از رابطه ریاضی

فرکانس طبیعی $\omega_i$	مقدار فرکانس
۱	69.8848
۲	437.9610
۳	1226.3036
۴	2403.0658
۵	3972.4399

در این روابط،  $M^{uu}$  ماتریس جرم عمومی،  $C$  ماتریس میرایی عمومی،  $K^{u\phi}$  ماتریس سختی عمومی،  $K^{\phi\phi}$  ماتریس کوپلینگ الکترومکانیکی و  $K^{\phi\phi}$  ماتریس ضرایب دی‌الکتریک پیزوالکتریک می‌باشد. بردار  $U$  میدان جابجایی و بردار  $\phi$  میدان پتانسیل الکتریکی می باشد.  $F_m$  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 می پردازیم.

#### ۴- صحنه گذاری مدل

به منظور صحنه‌گذاری مدل ساخته شده و همچنین اطمینان از صحت نتایج بدست آمده، ابتدا فرکانس‌های طبیعی تیر بدون در نظر گرفتن لایه‌های پیزوالکتریک (چرا که المان های به کار رفته در تیر و مواد پیزوالکتریک یکی بوده و درستی یکی تایید دیگری را در پی دارد) با استفاده از فرمول های موجود برای تیر یک سر گیردار محاسبه شده و با مقادیر بدست آمده از روش اجزاء محدود مقایسه شده است. سپس برای اطمینان از مدل‌سازی دقیق روابط پیزوالکتریک، به مدل‌سازی یک عملگر پیزوالکتریک پرداخته شده و نتایج حاصل با نتایج تحقیقات منتشر شده تطبیق داده شده است.

با استفاده از مشخصات ذکر شده در جدول ۱ ابتدا با استفاده از کدنویسی در نرم افزار متلب ماتریس های جرم و سختی تیر به همراه پیزوالکتریک به روش اجزاء محدود بدست آورده می شود. مرحله بعدی، محاسبه نمودن فرکانس های طبیعی سیستم می باشد که در جدول ۱ مقادیر ۵ فرکانس اول آورده شده است.

برای صحت درستی ماتریس های سختی و جرم بدست آمده از کدهای نوشته شده ساده ترین کار مقایسه فرکانس های بدست آمده از روش اجزاء محدود و فرمول های ریاضی موجود برای تیر می باشد. با استفاده از تئوری ارتعاشات سیستم های ممتد در مورد تیر اوپلر برنولی می توان نوشت:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{EI \lambda_i^2}{\rho A l^2}} \quad (19)$$

که در آن  $\omega_i$  فرکانس  $i$  ام تیر،  $E$  مدول الاستیسیته تیر،  $I$  ممان دوم اینرسی سطح تیر،  $\rho$  چگالی تیر،  $l$  طول آن،  $A$  سطح مقطع تیر و  $\lambda_i$  مقادیر ویژه می باشند. مقادیر ویژه با

جدول ۴- فرکانس های طبیعی برای تیر با استفاده از روش

اجزاء محدود		
فرکانس طبیعی iام	مقدار فرکانس به ازای ۱۰ المان	مقدار فرکانس به ازای ۲۰ المان
1	66.8849	69.8848
2	437.9755	437.9619
3	1226.6159	1226.3036
4	2405.3558	2403.2159
5	3982.4535	3973.1129

قابلیت آموزش و یادگیری داشته و می تواند با استفاده از داده های مشاهده شده، پارامترهای شبکه را به نحوی تعیین کند که به ازای ورودی دلخواه، خروجی مطلوب حاصل شود.

ANFIS یک شبکه عصبی پنج لایه مبتنی بر سیستم های فازی است که ساختار آن در شکل ۴ نشان داده شده است. مدل فازی TSK<sup>۲</sup> مرتبه اول را می توان بر اساس مجموعه ای از قوانین اگر - آنگاه فازی به صورت زیر نشان داد: قانون اول: اگر x برابر A<sub>1</sub> و y برابر B<sub>1</sub> باشد،

$$f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \text{ آنگاه}$$

قانون دوم: اگر x برابر A<sub>2</sub> و y برابر B<sub>2</sub> باشد،

$$f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \text{ آنگاه}$$

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<sub>i</sub> و B<sub>i</sub> 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:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1,2 \quad (20)$$

$$O_{2,i} = \mu_{B_{i-1}}(y) \quad i = 3,4 \quad (21)$$

در روابط بالا x و y ورودی های غیرفازی گره i ام و A<sub>i</sub> و B<sub>i</sub> 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.

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<sub>2,i</sub> نمایانگر خروجی گره i ام در لایه دوم می باشد و برابر حاصلضرب درجه عضویت هر ورودی است.

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) * \mu_{B_i}(y) \quad i = 1,2 \quad (22)$$

با مقایسه مقادیر بدست آمده در جدول ۳ و جدول ۴ مشاهده می شود هنگامی که تعداد المان های تیر را برابر با ۱۰ عدد گرفته شود، فرکانس های طبیعی بدست آمده از فرمول های ریاضی و روش اجزاء محدود، دارای اختلاف اندکی می باشند که این اختلاف در فرکانس های بالاتر بیشتر می شود. هر چه تعداد المان های در نظر گرفته شده بیشتر می شود این اختلاف کمتر می شود. هنگامی که تعداد المان های تیر برابر با ۱۰ عدد در نظر گرفته می شود، این اختلاف مقادیر به میزان قابل توجهی کاهش می یابد و می توان گفت تقریباً برابر می باشند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ماتریس های جرم و سختی بدست آمده از روش اجزاء محدود صحیح بوده و می توان در مدلسازی از آنها استفاده نمود.

۵- طراحی کنترل کننده

در شکل ۳ بلوک دیاگرام کنترل ارتعاش تیر نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود 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 می کند.

۶- سیستم استنتاج فازی عصبی<sup>۱</sup>

هدف از منطق فازی، استخراج نتایج دقیق با استفاده از مجموعه ای از قوانین اگر - آنگاه فازی است که توسط افراد خبیره و متخصص تعریف شده است. از طرفی شبکه عصبی

<sup>2</sup> Takagi Sugeno Kang

<sup>1</sup> Adaptive Neural Fuzzy Inference System

جستجوی محلی بکارگرفته شده در الگوریتم ممتیک می تواند ضعف روش های تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک را در تشدید فرآیند جستجو رفع کند. الگوریتم ممتیک در ابتدا مجموعه ای از جواب های اولیه را رمز گذاری می کند. آنگاه این الگوریتم میزان مطلوبیت هر یک از جواب ها را بر اساس یک تابع برازندگی محاسبه کرده و با استفاده از عملگرهایی همچون تقاطع و جهش جواب های جدیدی را تولید می کند. در پایان هر نسل روی مجموعه ای از جواب های آن نسل یک جستجوی محلی با هدف تشدید فرآیند جستجو انجام می شود تا کیفیت جواب های بهینه محلی افزایش یابد. در الگوریتم ممتیک پیشنهادی از روش متاهیوریستیک ژنتیک و هیوریستیک های جستجوی محلی هوک-جیوس<sup>۱</sup> و جستجوی چند جهته<sup>۲</sup> استفاده شده است که در هر نسل پارامتر تطبیقی توسط رابطه (۲۶) بدست می آید:

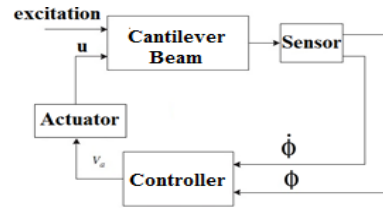
$$\alpha = \begin{cases} \left| \frac{f_{best} - f_{avg}}{f_{best}} \right|, & \text{if } \left| \frac{f_{best} - f_{avg}}{f_{best}} \right| \leq 1 \\ 1, & \text{if } \left| \frac{f_{best} - f_{avg}}{f_{best}} \right| > 1 \end{cases}, \quad (26)$$

که  $f_{best}$  بهترین تابع هدف در هر نسل می باشد و  $f_{avg}$  هم میانگین توابع هدف هر نسل است. اگر  $\alpha = 1$  باشد آنگاه در جمعیت هر نسل تنوع بیشتری وجود دارد و هرگاه که  $\alpha \approx 0$  شود بیانگر وقوع همگرایی می باشد.  $\alpha$  متغیر تطبیقی الگوریتم می باشد و برای جلوگیری از همگرایی زودرس و سکون در الگوریتم مفید واقع می شود. با استفاده از متغیر تطبیقی در الگوریتم، جمعیت هر نسل توسط رابطه (۲۷) بدست می آید:

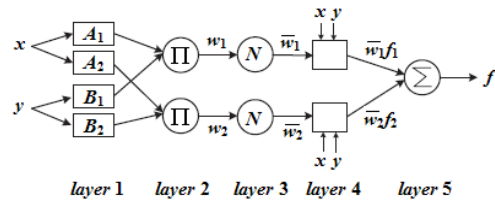
$$S_{pop} = S_{pop}^f + S_{pop}^v(1 - \alpha) \quad (27)$$

که  $S_{pop}^f$  تعداد کمینه ی ثابت جمعیت در هر نسل را مشخص میکند و  $S_{pop}^v$  تعداد بیشینه ی جمعیت متغیر در هر نسل را نشان می دهد. همچنین برای بیان احتمال جهش نیز می توان از رابطه ای تطبیقی مانند رابطه (۲۸) استفاده نمود.

$$P_m = 0.5(1 - \alpha) \quad (28)$$



شکل ۳- بلوک دیاگرام کنترل ارتعاشات تیر یکسر گیردار



شکل ۴- ساختار کلی سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی

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:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{W_i}{\sum_{k=1}^4 W_k} \quad (23)$$

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:

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

که  $W_i$  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 ما قبل بیان میکند.

$$O_{5,i} = \sum_{i=1}^4 \bar{w}_i f_i \quad (25)$$

## ۷- الگوریتم ممتیک

الگوریتم ژنتیک در یافتن نواحی جواب با سرعت خوبی عمل می کند اما در بدست آوردن جواب با دقت مورد نظر زمان زیادی را مصرف می کند. این نقص را می توان تا حدودی با بکارگیری دانش موجود از مساله و یا اضافه کردن فاز جستجوی محلی به چرخه تکاملی بهبود بخشید. ایده اصلی این الگوریتم به کار گیری یک روش جستجوی محلی در درون ساختار الگوریتم ژنتیک برای بهبود کارایی فرآیند تشدید هنگام جستجو است.

<sup>1</sup> Hooke-Jeeves

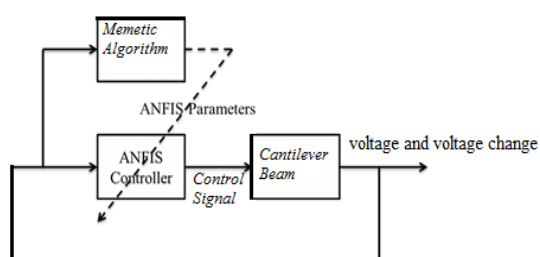
<sup>2</sup> Multidirectional Search

مستقل طراحی می‌باشد. این روش از سه مرحله شامل: انعکاس<sup>۱</sup>، انبساط<sup>۲</sup> و انقباض<sup>۳</sup> تشکیل شده است [۱۷،۱۶].

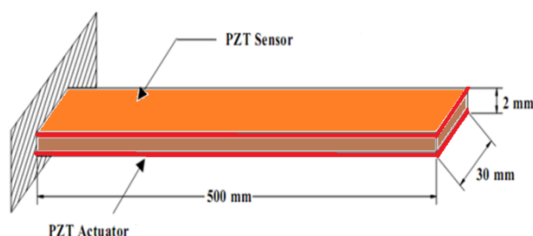
### ۸- کنترل ارتعاشات

در این قسمت به بررسی کنترل ارتعاشات تیر توسط لایه-های پیزوالکتریک می‌پردازیم. کنترلر پیشنهادی از یک شبکه ANFIS 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 بهینه‌سازی تعیین می‌شوند. همه‌ی پارامترهای مربوط به شبکه ANFIS برای کل بازه‌ی زمانی ارتعاش تیر بصورت یک کروموزوم در نظر گرفته می‌شوند و هر کدام از پارامترها یک بیت هستند. مجموع قدر مطلق جابجایی عرضی هر گره از تیر در هر گام زمانی، تابع هدف مسئله می‌باشد که باید به سمت کمینه شدن میل کند. شکل ۵ بلوک دیاگرام کنترلر ANFIS را که بصورت خارج خط عمل می‌کند در سیستم ارتعاشی مورد نظر را نشان می‌دهد.

شکل ۶ تیر مورد نظر به همراه لایه‌های پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود دو لایه پیزوالکتریک نوع PZT در بالا و پایین سطوح تیر به عنوان حسگر و عملگر در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- طراحی کنترلر ANFIS با ممتیک



<sup>1</sup> Reflection  
<sup>2</sup> Expansion  
<sup>3</sup> Contraction

احتمال جهش در هر نسل می‌تواند با توجه به همگرایی مسئله از صفر تا پنجاه درصد تغییر کند، بدین شکل که اگر جمعیت در هر نسل همگرا تر گردد در نتیجه با توجه به ضریب  $\alpha$ ، احتمال جهش بیشتر می‌شود تا شانس قرارگیری در بهینه‌های محلی کاهش یابد و اگر هم جمعیت هر نسل و اگر گردد احتمال جهش به صفر نزدیکتر می‌شود تا سریعتر به سمت نقطه بهینه سراسری پیشروی کرد. در مسئله کنترل ارتعاشات هنگامی که جهش به بیش از پنجاه درصد برسد جواب‌های حاصل از لحاظ کیفی افت می‌کنند، به همین دلیل احتمال جهش در هر نسل را به صفر تا پنجاه درصد باید محدود کرد.

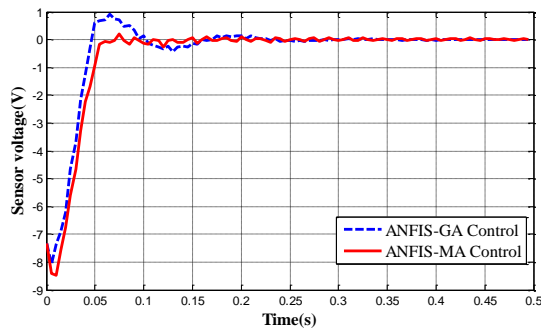
در الگوریتم ممتیک هرگاه در حل مسئله، همگرایی و بلوغ نسبی حاصل شود، مکانیسمی در الگوریتم سبب افزایش احتمال جهش و همچنین افزایش تصادفی تعداد جمعیت کروموزوم‌ها می‌گردد تا احتمال قرار گرفتن پاسخ‌های نهایی در نقاط بهینه محلی کاهش یابد. این فرآیند شاید سبب ایجاد واگرایی در جواب مسئله گردد و جواب‌های بهینه را بدتر کند، اما نخبه‌گرایی در الگوریتم سبب جلوگیری از این امر می‌گردد و همچنین اگر الگوریتم به جواب‌های بدتری برسد، در تکرار نسل بعدی، کروموزوم‌های بدی که اضافه شدند، به صورت خودکار حذف می‌گردند.

یکی دیگر از موضوعات در این الگوریتم شرط استفاده از روش‌های هیوریستیک جستجوی محلی می‌باشد که دو روش جستجوی محلی در الگوریتم ممتیک وجود دارد:

۱- روش هوک-جیوس: یکی از روش‌های بهینه‌سازی بدون استفاده از مشتق تابع هدف می‌باشد که در الگوریتم ممتیک تطبیقی بر روی برترین کروموزوم اعمال می‌شود و شعاع همسایگی کروموزوم برتر را برای یافتن پاسخ بهتر جستجو می‌کند و در نهایت کروموزوم با پاسخ بهتر را جایگزین کروموزوم قبلی می‌نماید [۱۷،۱۵].

۲- روش جستجوی چند جهته: همانند روش قبل یک روش بهینه‌سازی بدون استفاده از مشتق تابع هدف می‌باشد که در الگوریتم ممتیک بر روی تعداد  $(n+1)$  کروموزوم که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند اعمال می‌شود و پس از یافتن نقطه بهینه، کروموزوم‌های حاصل از روش جستجوی چند جهته جایگزین کروموزوم‌های قبلی می‌گردند،  $n$  تعداد متغیرهای





شکل ۹- پتانسیل الکتریکی لایه حسگر

همچنین در شکل ۱۰ و ۱۱ توابع عضویت بدست آمده از روش آموزش ژنتیک و ممیتیک نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۲ سیگنال کنترلی تولید شده توسط کنترل کننده ANFIS که همان پتانسیل الکتریکی اعمالی به لایه عملگر پیزوالکتریک می‌باشد، نشان داده شده است. 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 (در محدوده زمانی ۰/۳ تا ۱ ثانیه) تحریک می‌شود. بدین صورت که بارهارمونیک از لحظه ۰/۳ ثانیه اعمال و تا لحظه ۱ ثانیه ادامه پیدا کرده و آنگاه حذف می‌گردد. در شکل ۱۳ و ۱۴ به ترتیب پاسخ زمانی نقاط واقع بر انتهای آزاد تیر نشان داده شده است.

جدول ۵- ابعاد و خواص تیر فولادی و مواد پیزوالکتریک

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

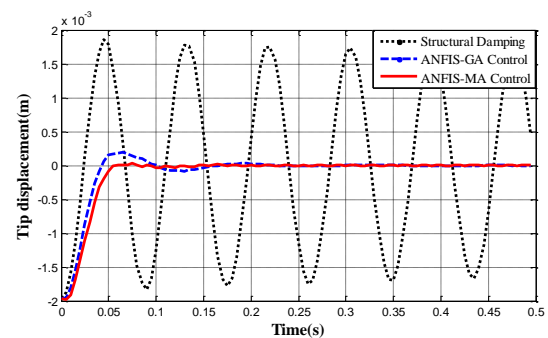
شکل ۶- تیر فولادی یک سر گیردار با لایه‌های

**پیزوالکتریک PZT**

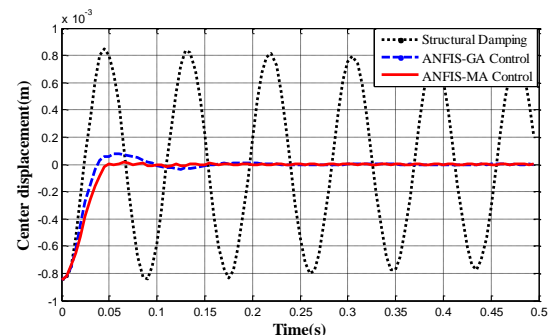
تمامی محاسبات و نمودارهای این قسمت، با برنامه نویسی توسط نرم افزار MATLAB انجام شده است. ابتدا با اعمال نیرویی برابر نیم نیوتن به انتهای آزاد تیر، یک تغییر مکان اولیه به آن داده شده، سپس به کنترل ارتعاشات آن پرداخته می‌شود. در جدول ۵ مشخصات تیر و مواد پیزوالکتریک آورده شده است.

در شکل ۷ و شکل ۸ به ترتیب پاسخ زمانی سر آزاد تیر و مرکز آن با شرایط جابجایی اولیه تیر، با استفاده از کنترلر ANFIS با آموزش ژنتیک و همچنین آموزش ممیتیک نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها، کاهش ماکزیمم فراجاهش پاسخ جابجایی انتهای تیر و همچنین زمان نشست پاسخ و افزایش سرعت میرا شدن نوسانات در حالت استفاده از آموزش ممیتیک مشاهده می‌شود.

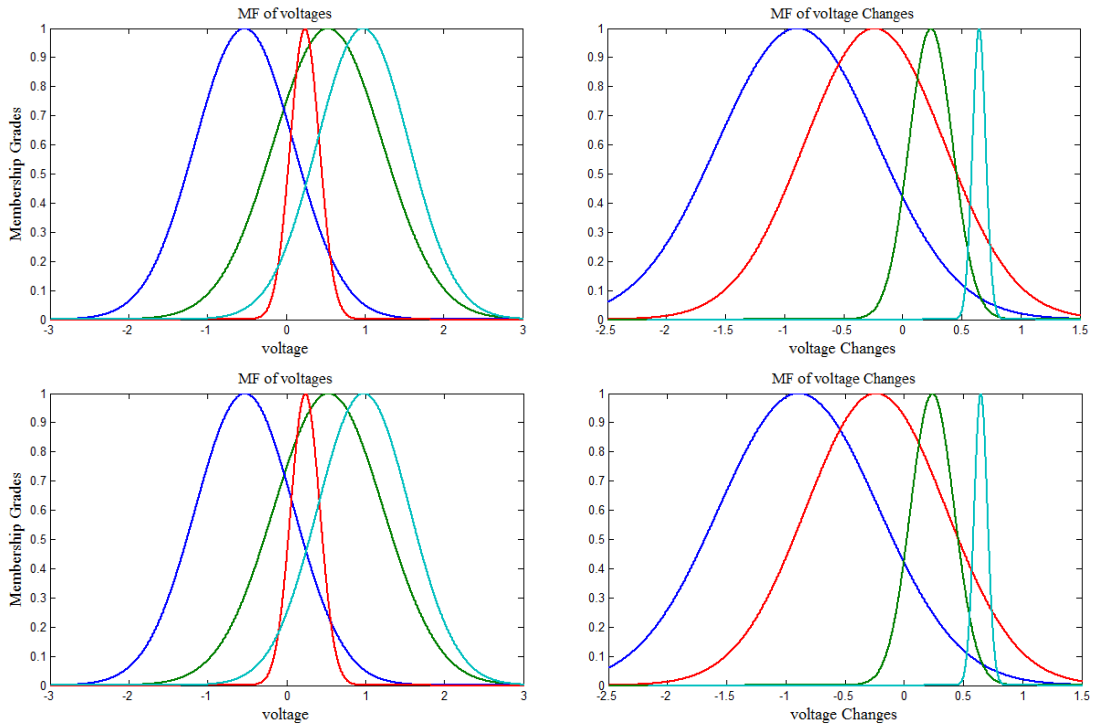
شکل ۹ پتانسیل الکتریکی تولید شده در لایه حسگر را در مدت زمانی که تیر ارتعاش می‌نماید، نشان می‌دهد.



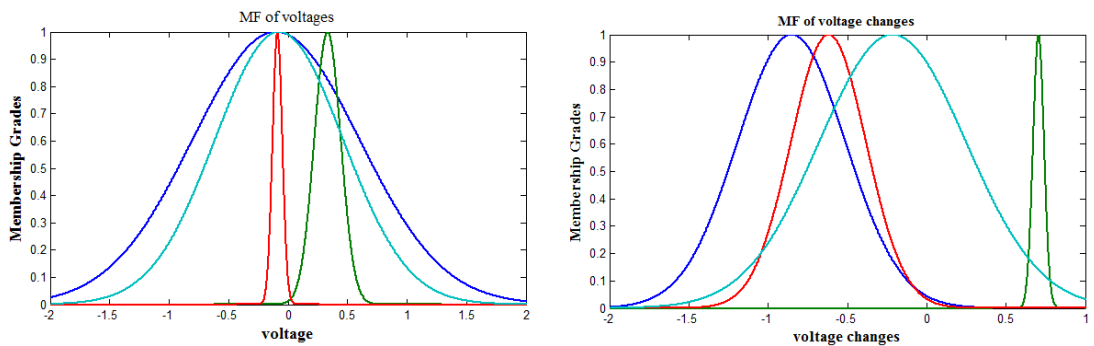
شکل ۷- جابجایی انتهای آزاد تیر در اثر بارگذاری متمرکز



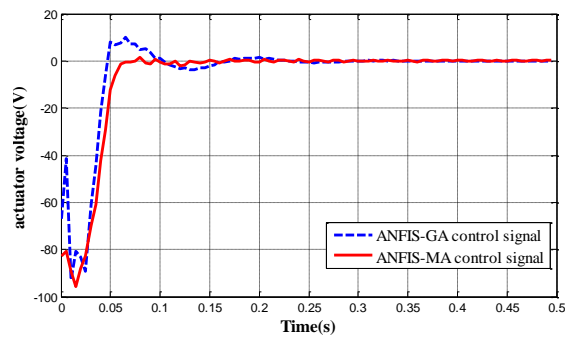
شکل ۸- جابجایی وسط تیر در اثر بارگذاری متمرکز



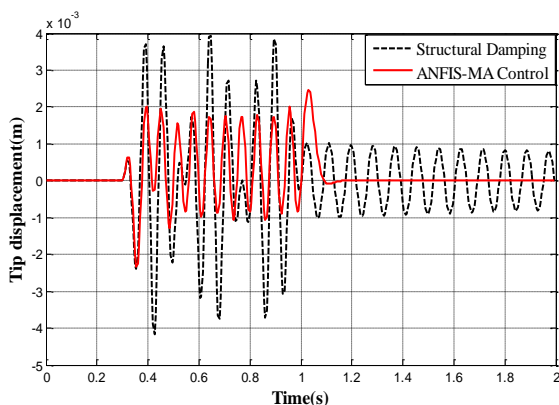
شکل ۱۰- توابع عضویت بدست آمده از روش ژنتیک در بارگذاری متمرکز



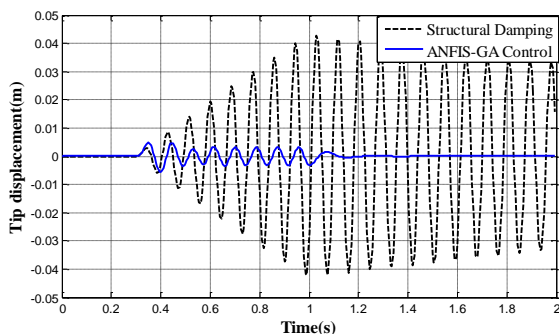
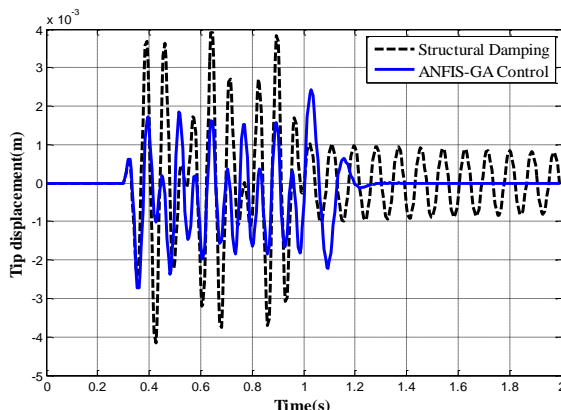
شکل ۱۱- توابع عضویت بدست آمده از روش ممتیک در بارگذاری متمرکز



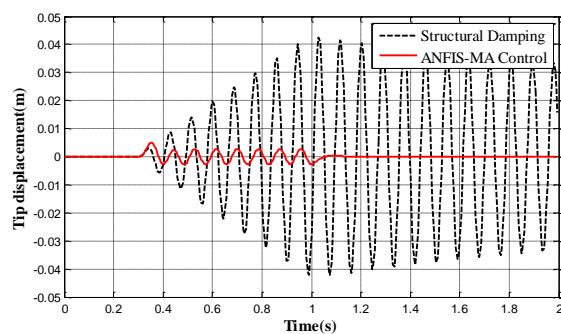
شکل ۱۲- سیگنال کنترلی اعمالی به لایه عملگر



شکل ۱۳- جابجایی انتهای آزاد تیر در اثر بارگذاری هارمونیک با فرکانس ۱۰۰ هرتز با روش ژنتیک و ممت



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



گردید. بدلیل استفاده از روش‌های جستجوی محلی توسط الگوریتم ممتیک می‌توان به جواب‌های بهتری در مدت زمان کمتر نسبت به دیگر الگوریتم‌های تکاملی در اینجا ژنتیک دست یافت.

در این الگوریتم از جستجوی محلی هوک - جیوس و جستجوی چند جهته استفاده شده است که با رسیدن به همگرایی و بلوغ نسبی، الگوریتم‌های جستجوی محلی به کار گرفته شدند تا پاسخ‌های بهتری را در فضای جستجوی مسئله پیدا کنند. ضمن اینکه به دلیل استفاده از جستجوهای محلی، پاسخ‌های یک مسئله بهینه‌سازی که توسط الگوریتم ممتیک بدست می‌آیند، در اجراهای متعدد پایدارتر می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که با بکارگیری روش آموزش ممتیک نسبت به روش ژنتیک می‌توان به پاسخ‌های بهتری دست یافت و زمان نشست و فراجهش پاسخ جابجایی تیر را به مقدار قابل توجهی کاهش داد و در واقع برتری روش ممتیک مشاهده گردید.

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 ممتیک نسبت به روش بهینه‌سازی 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.

## ۹- نتایج

در این مقاله کنترل ارتعاشات یک تیر یک سرگیردار فولادی توسط لایه‌های پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفت. از سیستم استنتاج فازی عصبی به عنوان کنترلر برای میرایی نوسانات استفاده شد. همچنین برای بهینه‌سازی پارامترهای غیر خطی توابع عضویت و نیز پارامتره خطی سوگنواز الگوریتم‌های ژنتیک و ممتیک استفاده شد. بدین منظور با هدف قرار دادن مجموع جابجایی عرضی گره‌های در نظر گرفته شده برای تیر، عمل بهینه‌سازی این پارامترها انجام

- [8] Karami-Mohammadi A, sadri A (2009) An active vibration control of beam by piezoelectric with fuzzy approach. IJSSCEA 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.
- [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.
- [12] 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.
- [13] Wang L (1996) A course in fuzzy systems and control. Prentice-Hill, Englewood Cliffs, NJ
- [14] Balamurugan V, Narayanan S (2001) Active vibration control of piezolaminated smart beams. Def Sci J 51(2): 103-114.
- [15] Hooke R, Jeeves TA (1961) Direct search solution of numerical and statistical problems. J Assoc Comput Mach 8(2): 212-229.
- [16] Torczon V (1989) Multidirectional search. Ph.D. thesis, Rice University, Houston, TX.
- [17] Kelley CT (1999) Iterative methods of optimization. Philadelphia, PA: SIAM 212-229.
- [۱۸] رستمی م، جوادی ج، مقدم، باقری ا (۱۳۹۲) هدایت و کنترل ربات زیرآبی با استفاده از سیستم کنترل ANFIS. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۴۶-۳۳: ۳(۴).
- نتایج نشان می دهد که الگوریتم ممتیک نسبت به ژنتیک دارای سرعت بالاتر می باشد زیرا دارای هوشمندی بیشتر نسبت به ژنتیک می باشد.
- ۱۰- مراجع**
- [1] Majeed WI, AlSamarraie SA, Mohanad (2013) vibration control analysis of a smart flexible 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. CEP 18: 618-629.
- [3] Marinaki M, Marinakis Y, Stavroulakis GE (2011) Vibration control of beams with piezoelectric sensors and actuators using particle swarm optimization. ESWA 38: 6872-6883.
- [4] Wang Q, Wang C (2001) A controllability index for optimal design of piezoelectric actuators invibration control of beam structures. J Sound Vib 241 ( 3 ): 507-518.
- [5] Narayanana 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 Technol 1(3).
- [7] Xu SX, Koko TS (2004) finite element analysis and design of actively controlled piezoelectric smart structures. Finite Elem Anal Des 40: 241-262.