



مدلسازی و کنترل هوشمند ارتعاشات ورق کامپوزیتی یکسرگیردار مسلح با سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار

شیماسادات مجابی¹، محمدمهدی خیری خواه^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین

2- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین

* قزوین، صندوق پستی 1498-523، qiau.ac.ir@kheirikhah

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 95/11/13	در این مقاله، ارتعاشات اجباری یک ورق چند لایه کامپوزیتی یکسرگیردار مسلح با عملگرهای سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، به روش کلاسیک و فازی و بصورت مدار بسته کنترل می‌شود. به این منظور، ابتدا معادلات حاکم بر ارتعاشات ورق کامپوزیتی چند لایه که شامل سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار است، با استفاده از تئوری کلاسیک ورق‌ها و اصل همیلتون استخراج می‌شود. همچنین رفتار حرارتی - مکانیکی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار با استفاده از فرمول لیانگ مدل‌سازی می‌گردد. سپس حل نیمه تحلیلی مسأله با توجه به شرایط مرزی آن و به روش ریلی- ریتز ارائه و فرکانس‌های طبیعی ورق محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه می‌گردد. نتایج حاصله حاکی از دقت مدل‌سازی و تطابق خوب آن با نمونه واقعی دارد. سپس جهت کنترل دامنه ارتعاشات ورق تحت بار اجباری نوسانی، از سیستم مدار بسته با عملگرهای سیم آلیاژ حافظه‌دار که بر روی ورق متصل شده‌اند، استفاده می‌گردد. از سه روش کنترلی کلاسیک، فازی و ترکیبی جهت کاهش دامنه جابه‌جایی ورق استفاده می‌شود. در نهایت با استفاده از الگوریتم ژنتیک، به بهینه‌سازی ضرایب بهره کنترل کننده کلاسیک و قواعد و پارامترهای کنترل کننده فازی جهت هدف کاهش دامنه ارتعاشات سازه پرداخته می‌شود. نتایج حاصله نشان می‌دهد که کلیه کنترل کننده‌های طراحی شده دامنه جابه‌جایی پایدار ورق را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهند و در این بین کنترل کننده ترکیبی فازی- کلاسیک بهترین عملکرد را داراست.
پذیرش: 96/01/08	
کلیدواژه‌ها:	
آلیاژ حافظه‌دار	
ورق کامپوزیتی	
ارتعاشات	
کنترل کننده فازی	
الگوریتم ژنتیک	

Modeling and intelligent control of vibration of cantilever composite plate embedded with shape memory alloy wires

Shima Sadat Mojabi¹, Mohammad Mahdi Kheirikhah^{2*}

1- Department of Mechatronic Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

2- Faculty of Industrial and Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

* P.O.B. 1498-523, Qazvin, Iran, kheirikhah@qiau.ac.ir

Keywords

Shape memory alloy
Composite plate
Vibration
Fuzzy controller
Genetic algorithm

Abstract

The purpose of this study is controlling the forced vibration of a layered composite cantilever plate embedded with shape memory alloys wires using classical and fuzzy controllers. The governing equations of motion of the composite plate including shape memory alloy wires are calculated using the classical laminated plate theory and the Hamilton principle. The Liang formula is also used to model the thermo-mechanical behavior of the shape memory alloys wire actuators. Then, the free vibration solution for the layered composite plate is calculated using semi-analytical Rayleigh-Ritz method and then is compared with experimental method. Comparison between the obtained natural frequencies of the composite plate and those of published experimental results confirms the accuracy of the purposed modeling and solution. Finally, three controlling system are designed to reduce the amplitude of vibrational displacement of the structure against forced vibrational excitations including PID controller, Fuzzy controller and PID-Fuzzy controller. Finally, the genetic algorithm is used to optimize the gain coefficients of the classic controller and the rules and parameters of the fuzzy controller to reduce the vibrational displacement amplitude of the plate. The obtained results show that the all designed controllers can reduce the steady-state vibrational displacement amplitude of the plate significantly, but the PID-Fuzzy controller has the best performance.

Please cite this article using:

Mojabi, S.S. and Kheirikhah, M.M., "Modeling and intelligent control of vibration of cantilever composite plate embedded with shape memory alloy wires". In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 363-374, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

کنترل فعال تغییر شکل و تنش تیرهای کامپوزیتی لایه‌ای مسلح با آلیاژ حافظه‌دار انجام دادند. آن‌ها با استفاده از تئوری اویلر-برنولی و رابطه غیرخطی ون کارمن، به توصیف جابه‌جایی تیرهای مسلح با آلیاژهای حافظه‌دار پرداختند. خیریخواه و همکاران [9]، ارتعاشات طبیعی ورق ساندویچی کامپوزیتی مسلح با سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار را بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار تعبیه شده در رویه‌ها، موجب افزایش فرکانس طبیعی ورق می‌شوند. همچنین فرکانس طبیعی ورق ساندویچی با افزایش نسبت ضخامت ورق‌ها یا رویه‌ها افزایش می‌یابد، اما افزایش نسبت ابعاد رویه‌ها باعث کاهش فرکانس طبیعی ورق ساندویچی می‌شود. اخیراً خورشیدی و همکاران [10، 11] در دو مقاله جداگانه به کنترل ارتعاشات ورق‌های کامپوزیتی گرد و مستطیلی با استفاده از عملگرهای پیزوالکتریک پرداختند.

بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که تاکنون از معادلات ترمودینامیکی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار برای کنترل جابه‌جایی و ارتعاشات ورق‌های کامپوزیتی یکسرگیردار مسلح استفاده نشده است. بنابراین هدف از انجام این تحقیق، کنترل و کاهش جابه‌جایی‌ها و دامنه ارتعاشات اجباری وارد بر یک ورق کامپوزیتی یکسرگیردار مسلح با سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار مسلح می‌باشد. به این منظور ابتدا معادلات حاکم بر رفتار ورق کامپوزیتی چند لایه که شامل آلیاژهای حافظه‌دار است محاسبه و رفتار دینامیکی ورق کامپوزیتی به همراه سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در دو حالت ارتعاشات آزاد و اجباری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس جهت کاهش دامنه جابه‌جایی و ارتعاشات اجباری وارد بر سازه، سه نوع کنترل کننده کلاسیک، فازی و ترکیبی کلاسیک-فازی طراحی و شبیه‌سازی می‌گردد. در نهایت، ضرایب بهره در کنترل کننده کلاسیک و قواعد و پارامترهای کنترل کننده فازی با هدف کاهش دامنه ارتعاشات سازه به روش الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شود.

2- مدلسازی مساله

در این مقاله، ورق کامپوزیتی با سطح مقطع مستطیلی در نظر گرفته شده است که یک سر آن گیردار است و سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار به صورت مستقیم بر روی ورق کامپوزیتی نصب شده‌اند. شکل 1 تصویر شماتیک ورق مورد نظر به همراه مختصات و ابعاد آن را نشان می‌دهد. در شکل 1، a ، b و h به ترتیب طول، عرض و ضخامت ورق کامپوزیتی و F_w نیروی سیم آلیاژ حافظه‌دار می‌باشد.

2-1- فرضیات سینماتیک

به منظور استخراج معادلات حاکم بر یک ورق کامپوزیتی چند لایه که با سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار تقویت شده است، از تئوری ورق‌های چند لایه کلاسیک² که روابط جابه‌جایی آن به شرح زیر است استفاده می‌شود [12]:

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) - z \frac{\partial w}{\partial y} \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) - z \frac{\partial w}{\partial x} \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه (1)، (u, v, w) جابه‌جایی نقاط مختلف ورق و (u_0, v_0, w_0) ، جابه‌جایی نقاط مختلف سطح میانی ورق می‌باشد.

آلیاژهای حافظه‌دار¹ نوعی از مواد هوشمند می‌باشند که اگر تحت فرآیند ترمودینامیکی مناسب قرار گیرند، قادر به بازیابی شکل اولیه خود خواهند بود [1]. آلیاژهای حافظه‌دار از عناصر نیکل و تیتانیوم تشکیل شده‌اند، که تحت نام نیتینول شناخته می‌شوند. نیتینول در دماهای پایین، نرم و به آسانی کشیده می‌شود و در دماهای بالا، این ماده سخت و ارتجاعی است. آلیاژهای حافظه‌دار، به علت توان بالا، حجم کم و قابلیت استهلاک انرژی به صورت گسترده به منظور کنترل جابه‌جایی و ارتعاشات سازه‌های مختلف استفاده می‌شوند. این آلیاژها، به دلیل خاصیت عملگری که دارند، وقتی تحت فرآیند ترمودینامیکی مناسب قرار گیرند، می‌توانند ضمن تغییر طول، با اعمال نیرو ارتعاشات و جابه‌جایی‌های وارد بر سازه‌ها را کنترل کنند. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های زیادی در زمینه تقویت سازه‌های کامپوزیت توسط آلیاژهای حافظه‌دار صورت گرفته است. این مواد تحت بارگذاری سیکلی مکانیکی، از طریق ایجاد حلقه برگشت‌پذیر هیستریزس، انرژی مکانیکی را جذب و یا تلف می‌کنند. این ویژگی بارز آلیاژهای حافظه‌دار، آن‌ها را برای کاربردهای حسگری، عملگری، جذب انرژی ضربه و میرایی ارتعاشات مناسب ساخته است. بنابراین در صورتی که در معرض ارتعاشات ناخواسته از جمله زلزله قرار بگیرند، درصدی از انرژی وارد بر سازه را مستهلک می‌نمایند.

محققین زیادی روی مسایلی همانند مساله فوق تحقیق نموده‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها به موارد ذیل می‌توان اشاره کرد. سونگ و همکاران [2]، تحقیقاتی بر روی عملکرد دقیق آلیاژهای حافظه‌دار برای کنترل موقعیت تیرهای کامپوزیتی انجام دادند. در این تحقیق، یک تیر کامپوزیتی با ساختار لانه زنبوری و سیم‌های حافظه‌دار قرار داده شده در یکی از لایه‌های آن به منظور تحریک فعال بررسی شده است. چندرا [3]، به کنترل فعال تیرهای کامپوزیتی با استفاده از محرک حافظه‌دار پرداخت. هدف او از انجام این تحقیق بررسی استفاده از آلیاژ حافظه‌دار جهت ایجاد خمش در تیر کامپوزیتی بود. سیلوا [4]، به مطالعه کنترل فیدبک تیر با استفاده از یک محرک حافظه‌دار پرداخت. در این مقاله محرک حافظه‌دار متشکل از یک سیم نیکل-تیتانیوم ثابت شده در سمت بالای تیر بود که با حرارت دادن سیم باعث انقباض و منحرف شدن تیر می‌شد. جان و حریری [5]، مطالعه‌ای بر روی تأثیر فعالیت سیم‌های حافظه‌دار بر پاسخ دینامیکی تیرهای کامپوزیتی انجام دادند. آن‌ها تغییرات فرکانس طبیعی سازه‌های کامپوزیتی که در آن از سیم‌های حافظه‌دار (نیکل-تیتانیوم) استفاده شده بود را با استفاده از تحلیل اغتشاشات انرژی کرنشی در صفحه، بررسی کردند. همچنین در این تحقیق، چیدمان‌های مختلف از محل قراردادن سیم‌های حافظه‌دار (مستقیم و زیگ-زاگ) به منظور بهینه‌سازی فرکانس طبیعی مورد مطالعه قرار گرفت و با یافته‌های محاسباتی و تجربی مقایسه شد. سون و همکاران [6]، ارتعاشات و کنترل موقعیت تیر انعطاف‌پذیر را از طریق اصل همیلتون به دست آوردند و ویژگی‌های دینامیکی محرک سیم حافظه‌دار را به صورت آزمایشی بررسی کردند. علاوه بر این، کنترل ردیابی موقعیت نوک تیر با استفاده از یک موج سینوسی و امواج مربعی با فرکانس کم انجام شد. کانگ و همکاران [7]، به بررسی کنترل فعال تیر کامپوزیتی هوشمند مسلح با ورق آلیاژ حافظه‌دار با استفاده از یک سنسور فیبرنوری پلاستیکی پرداختند. در این تحقیق از سنسور فیبر نوری پلاستیکی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی این ساختارهای هیبریدی استفاده شده است. بوداکی و همکاران [8]، تحقیقاتی بر روی

² Classical Laminated Plate Theory (CLPT)¹ Shape Memory Alloys (SMA)

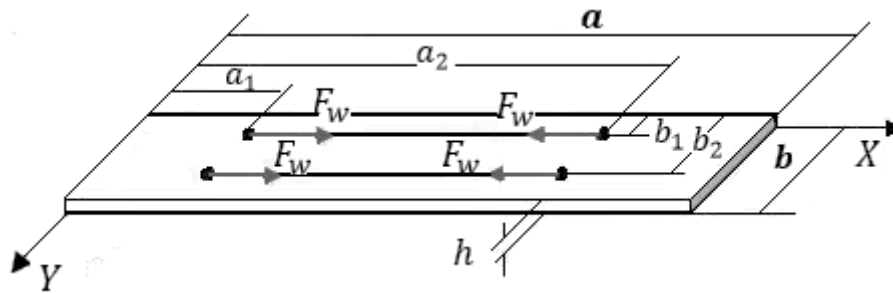


Fig. 1 A schematic of composite plate embedded with SMA wires

شکل 1 شماتیک ورق کامپوزیتی مسلح با سیم‌های حافظه‌دار

2-2- کرنش

با توجه به اینکه جابه‌جایی‌ها کوچک در نظر گرفته می‌شوند، در نتیجه معادلات کرنش خطی را می‌توان به صورت رابطه (2) نوشت [12]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

در این رابطه، Q به‌عنوان ماتریس ضرایب سختی کاهش یافته شناخته می‌شود. نیروها و گشتاورهای درون صفحه‌ای بر واحد طول ورق را با استفاده از تنش‌های درون صفحه‌ای به صورت رابطه (6) می‌توان نوشت [12]:

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^1 \\ \varepsilon_{yy}^1 \\ \gamma_{xy}^1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^2 \\ \varepsilon_{yy}^2 \\ \gamma_{xy}^2 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

که در آن [11]:

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n Q_{ij}(Z_{k+1} - Z_k) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n Q_{ij}(Z_{k+1}^2 - Z_k^2) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n Q_{ij}(Z_{k+1}^3 - Z_k^3) \end{aligned} \quad (7)$$

در روابط (6) و (7)، A_{ij} ، B_{ij} و D_{ij} به ترتیب ماتریس‌های سختی کششی، سختی کوپلی و سختی خمشی می‌باشند. همچنین Z_k و Z_{k+1} فاصله سطح فوقانی و تحتانی لایه $k+1$ از سطح میانی ورق می‌باشد.

2-4- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر حرکت ورق کامپوزیتی یکسرگیردار را می‌توان به کمک اصل همپلتون به صورت رابطه (8) بدست آورد.

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta K - (\delta U + \delta V)) dt = 0 \quad (8)$$

در رابطه (8)، δU تغییرات انرژی کرنشی، δV تغییرات کار انجام شده توسط نیروهای اعمال شده و δK تغییرات انرژی جنبشی می‌باشند. تغییرات انرژی کرنشی ورق با فرض تنش صفحه‌ای، از رابطه (9) بدست می‌آید [12]:

$$\delta U = \int_{v_0} (\sigma_{xx} \delta \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \delta \varepsilon_{yy} + 2\sigma_{xy} \delta \varepsilon_{xy}) dz dx dy \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ \varepsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \left(-\frac{\partial w_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \right) = 0 \\ \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left(-\frac{\partial w_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \right) = 0 \\ \varepsilon_{zz} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

باید توجه داشت که در تئوری ورق چندلایه کلاسیک، کرنش برشی $(\varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zz})$ به‌طور یکنواخت صفر می‌باشد. در نتیجه کرنش‌های غیرصفر رابطه (2) را می‌توان مطابق معادله (3) تبدیل به فرم ماتریسی نمود [12]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^1 \\ \varepsilon_{yy}^1 \\ \gamma_{xy}^1 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

در رابطه (3)، $(\varepsilon_{xx}^0, \varepsilon_{yy}^0, \gamma_{xy}^0)$ کرنش‌های سطح میانی ورق و $(\varepsilon_{xx}^1, \varepsilon_{yy}^1, \gamma_{xy}^1)$ انحناهای ورق می‌باشند.

2-3- روابط بنیادی

روابط بنیادی در یک جسم جامد، رابطه بین تنش و کرنش وارد بر جسم می‌باشد که به قانون هوک نیز معروف است. فرم تعمیم یافته قانون هوک برای مواد کامپوزیتی را می‌توان در قالب ماتریسی به صورت رابطه (4) نوشت [12]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

که در آن C به عنوان تانسور سختی شناخته می‌شود. با اعمال حالت تنش صفحه‌ای، معادلات ساختاری ورق از رابطه (5) به دست می‌آید [12]:

3-1- ارتعاشات آزاد

پاسخ معادلات در ارتعاشات آزاد به صورت زیر فرض می‌شود [16]:

$$w_0(x, y, t) = W(x, y)e^{i\omega t} \quad (15)$$

که در آن فرکانس طبیعی سازه و W دامنه جابجایی ورق می‌باشند. با جایگذاری رابطه (15) در معادله ارتعاشی (13)، معادله حرکت به صورت (16) به دست می‌آید [16]:

$$e^{i\omega t} \left[D_{11} \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2[D_{12} + 2D_{66}] \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} - \widehat{N}_x \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - 2\widehat{N}_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} - \widehat{N}_y \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] - \omega^2 \left[WI_0 - I_2 \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \right] e^{i\omega t} = 0 \quad (16)$$

در ارتعاشات آزاد \widehat{N}_x ، \widehat{N}_y ، \widehat{N}_{xy} و بار عرضی q برابر صفر می‌باشند. در نتیجه با استفاده از روش حل تقریبی ریلی-ریتز می‌توان فرم کاهش یافته¹ ارتعاشات آزاد ورق با لایه چینی متقارن را با جایگذاری آن در معادلات حاکم بدست آورد [14]:

$$0 = \int_0^b \int_0^a \left\{ D_{11} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \delta W}{\partial x^2} + D_{12} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \delta W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \delta W}{\partial y^2} \right) + 4D_{66} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \delta W}{\partial x \partial y} - N_x \frac{\partial x}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \delta W}{\partial x^2} + D_{22} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \delta W}{\partial y^2} - \omega^2 \left[WI_0 \delta W - I_2 \left(\frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial \delta W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \frac{\partial \delta W}{\partial y} \right) \right] \right\} dx dy \quad (17)$$

که a و b به ترتیب طول و عرض تیر کامپوزیتی و δ اپراتور تغییراتی می‌باشد. دامنه ارتعاشات برای ورق‌های مستطیلی شکل با استفاده از تقریب ریلی-ریتز به صورت (18) به دست می‌آید [16]:

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N c_{ij} X_i(x) Y_j(y) \quad (18)$$

با جایگذاری رابطه (18) در رابطه (17)، معادله ارتعاشی سیستم را به فرم رابطه (19) می‌توان نوشت:

$$\{[R] - \omega^2 [B]\} \{C\} = 0 \quad (19)$$

که در آن ماتریس R و ماتریس B را می‌توان به فرم رابطه (20) نوشت:

همچنین، تغییرات کار انجام شده توسط نیروهای خارجی اعمال شده بر ورق برابر است با:

$$\delta V = - \int_V q \delta w_0 dx dy \quad (10)$$

در رابطه (10) q به عنوان بار فشاری عرضی وارد بر سطح ورق می‌باشد. تغییرات انرژی جنبشی δK را می‌توان از رابطه (11) بدست آورد:

$$\delta K = \int_V \int_{-h/2}^{h/2} \rho_0 \left[\left(\dot{u}_0 - z \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} \right) \left(\delta \dot{u}_0 - z \frac{\partial \delta \dot{w}_0}{\partial x} \right) + \left(\dot{v}_0 - z \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial y} \right) \left(\delta \dot{v}_0 - z \frac{\partial \delta \dot{w}_0}{\partial y} \right) + \dot{W}_0 \delta \dot{W}_0 \right] dz dx dy \quad (11)$$

در رابطه (11)، ρ_0 چگالی ورق کامپوزیتی می‌باشد. بنابراین معادلات حاکم برمسأله با توجه به اصل همپلتون و نیروها و گشتاورهای درون صفحه‌ای به صورت رابطه (12) توصیف می‌شود [13]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} &= \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} &= \rho_0 \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + \widehat{N}_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2\widehat{N}_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \widehat{N}_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + q &= \rho_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (12)$$

که در آن، \widehat{N}_x ، \widehat{N}_y ، \widehat{N}_{xy} نیروهای وارد بر لبه ورق بر واحد طول می‌باشند. با فرض متقارن بودن لایه چینی ورق کامپوزیتی ماتریس $[B] = 0$ خواهد شد، در نتیجه معادله سوم حرکت به صورت جداگانه قابل حل است. لذا با جایگذاری معادلات (6) در معادله سوم حرکت رابطه (8)، معادله حرکت عرضی به صورت (13) به دست می‌آید [14]:

$$\begin{aligned} D_{11} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w_0}{\partial y^4} - \widehat{N}_x \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - 2\widehat{N}_{xy} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} - \widehat{N}_y \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} - q \\ = -I_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} + I_2 \left(\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\partial^4 w_0}{\partial y^2 \partial t^2} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

در رابطه (13)، I_0 ، I_2 ممان اینرسی جرمی هستند که به صورت رابطه (14) تعریف می‌شوند [15]:

$$\begin{aligned} I_0 &= \rho_0 \\ I_2 &= \frac{\rho_0 h^3}{12} \end{aligned} \quad (14)$$

3- حل معادلات

همانطور که دیده شد معادله جابه‌جایی عرضی ورق به صورت معادله (13) حاصل گردید. مسأله ارتعاشات به دو صورت ارتعاشات آزاد و ارتعاشات اجباری می‌باشد. در ارتعاشات آزاد سازه تحت تحریک اولیه و با فرکانس طبیعی خود شروع به نوسان می‌کند. در ارتعاشات اجباری تحریک دائمی بر روی سازه اعمال می‌شود و سازه با فرکانس تحریک به نوسان می‌پردازد. در ادامه حل هر دو مسأله ارائه خواهد شد.

¹ Weak Forms

جدول 1 فرکانس طبیعی اول ورق کامپوزیتی

Table 1 First natural frequency of the composite plate

اختلاف حریری (تجربی) و تحقیق حاضر	تحقیق حاضر (تحلیلی)	حریری (تحلیلی) [15]	حریری (تجربی) [15]
4.5%	389	460.5	380.9

مقدار \bar{N}_x برای شرایط مرزی مختلف صفحه به صورت رابطه (23) است:

$$\bar{N}_x = \begin{cases} 0 & \{0 \leq y < (b_1 - r)\} \\ -F_w & \{(b_1 - r) \leq y \leq (b_1 + r)\} \\ 0 & \{(b_1 + r) < y < (b_2 - r)\} \\ -F_w & \{(b_2 - r) \leq y \leq (b_2 + r)\} \\ 0 & \{(b_2 + r) < y \leq b\} \end{cases} \quad (23)$$

بنابراین معادله ارتعاشی سیستم را می توان به فرم رابطه (24) نوشت:

$$\{[R] - \omega^2[B]\}\{C\} = q_0 \quad (24)$$

که در آن q_0 دامنه بار عرضی است که به عنوان بار تحریک خارجی بر روی ورق اعمال می شود.

در حالت ارتعاشات اجباری، هرچه تعداد جملات سری در رابطه (18) یعنی M و N بیشتر باشند، دقت پاسخ حاصله بیشتر خواهد بود. با این حال پس از رسیدن به تعداد مناسبی جمله، افزایش تعداد جملات تغییر محسوس بر جواب ایجاد نخواهد کرد و لذا جواب همگرا خواهد شد. در این تحقیق به منظور اطمینان از همگرایی جواب حاصله، دامنه ارتعاشات اجباری ورق با تعداد جملات متفاوت مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در جدول 2 آمده است. در این مثال طول ورق $a = 185 \text{ mm}$ عرض آن $b = 40 \text{ mm}$ و ضخامت آن $h = 5 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می شود، پاسخ برای تعداد جملات بیشتر از $M = N = 50$ تغییر محسوس نکرده است. لذا در این تحقیق، تعداد جملات $M = N = 50$ لحاظ شده است.

علاوه بر این، به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصله، دامنه جابجایی ورق کامپوزیتی مستطیلی یکسرگیردار در اثر اعمال بار نوسانی متمرکز در انتهای آن، با استفاده از معادلات فوق محاسبه و با نتایج حاصل از تئوری مرتبه اول برشی [16] در جدول 3 مقایسه شده است. در این مثال طول ورق $a = 185 \text{ mm}$ و عرض آن $b = 40 \text{ mm}$ به صورت ثابت در نظر گرفته شده است اما نتایج برای نسبت های مختلف طول به ضخامت (a/h) به دست آمده است. نتایج این جدول نشان می دهد که پاسخ حاصل از تئوری کلاسیک مورد استفاده در این تحقیق برای ورق های نازک ($a/h > 10$)، تطابق بسیار خوبی با نتایج حاصل از تئوری مرتبه اول برشی [16] دارد و خطای نتیجه حاصل از تحقیق حاضر حداکثر برابر 7.5% می باشد. همچنین می توان دریافت که با کاهش ضخامت، نتایج تئوری کلاسیک و برشی به یکدیگر نزدیک می شوند. با توجه به اینکه ورق مورد بررسی در این تحقیق نازک است، مقایسه نتایج حاصله اثبات می کند که تئوری و روش مورد استفاده در این تحقیق دارای اعتبار کافی بوده و از دقت کافی برخوردار است.

3-3- اثر سیم های آلیاژ حافظه دار

همان طور که در شکل 1 مشاهده می شود، نیروی اعمال شده از سیم (نیروی کشش سیم) می باشد و از معادله (25) محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} F_w &= \sigma A \\ A &= \pi r^2 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} R_{ijkl} &= \int_0^b \int_0^a \left\{ D_{11} \frac{d^2 X_i}{dx^2} \frac{d^2 X_k}{dx^2} Y_j Y_l \right. \\ &+ D_{12} \left(\frac{d^2 Y_j}{dy^2} \frac{d^2 X_k}{dx^2} X_i Y_l \right. \\ &+ \left. \frac{d^2 X_i}{dx^2} \frac{d^2 Y_l}{dy^2} Y_j X_k \right) \\ &+ 4D_{66} \frac{dX_i}{dx} \frac{dY_j}{dy} \frac{dX_k}{dx} \frac{dY_l}{dy} \\ &+ D_{22} \frac{d^2 Y_j}{dy^2} \frac{d^2 Y_l}{dy^2} X_i X_k \\ &\left. - N_x \frac{dX_i}{dx} \frac{dX_k}{dx} Y_j Y_l \right\} dx dy \\ B_{ijkl} &= \int_0^b \int_0^a \left\{ I_0 X_i Y_j X_k Y_l + I_2 \left(\frac{dX_i}{dx} \frac{dX_k}{dx} Y_j Y_l \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{d^2 Y_j}{dy^2} \frac{d^2 Y_l}{dy^2} X_i X_k \right) \right\} dx dy \quad (20) \end{aligned}$$

تابع تقریب برای ورق کامپوزیتی مورد بررسی که در یک انتها گیردار و در سه انتهای دیگر آزاد است، می توان به فرم زیر نوشت [16]:

$$\begin{aligned} X_i &= \left(\frac{x}{a} \right)^{i+1} \\ Y_j &= \left(\frac{y}{b} \right)^{j+1} \end{aligned} \quad (21)$$

با جایگذاری روابط (20) و (21) در رابطه (19) و با حل این معادلات فرکانس طبیعی اول سازه به ازای $M = N = 1$ حاصل می شود. در جدول 1 مقایسه فرکانس طبیعی بدست آمده با نتیجه حریری [15] آورده شده است. همان طور که در جدول 1 دیده می شود، پاسخ نیمه تحلیلی حاصل از این تحقیق تطابق بسیار خوبی با نتایج حاصل از پاسخ تجربی حریری دارد. خطای بین نتیجه ی ارائه شده توسط حریری و نتیجه حاصل از تحقیق حاضر برابر 4.5% می باشد. این موضوع اثبات می کند که برنامه ی نوشته شده دارای اعتبار کافی بوده و فرمولاسیون انجام شده از دقت کافی برخوردار است.

3-2- ارتعاشات اجباری

در ارتعاشات اجباری، بار عرضی q بر روی ورق اعمال می شود. بنابراین زمانیکه سیم های حافظه دار تحریک شوند، نیروی بازگرداننده F_w (نیروی سیم) ایجاد می شود که با \bar{N}_x نشان می دهیم. این نیروی مسطح تنها در راستای x عمل می کند، در نتیجه \bar{N}_{xy} و \bar{N}_y صفر می باشد. به همین دلیل رابطه (17) به صورت رابطه (22) بدست می آید [14]:

$$\begin{aligned} q &= \int_0^b \int_0^a \left\{ D_{11} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \delta W}{\partial x^2} \right. \\ &+ D_{12} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \delta W}{\partial x^2} \right. \\ &+ \left. \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \delta W}{\partial y^2} \right) \\ &+ 4D_{66} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \delta W}{\partial x \partial y} \\ &- \bar{N}_x \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial \delta W}{\partial x} \\ &+ D_{22} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \delta W}{\partial y^2} \\ &\left. - \omega^2 \left[W I_0 \delta W - I_2 \left(\frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial \delta W}{\partial x} \right. \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{\partial W}{\partial y} \frac{\partial \delta W}{\partial y} \right) \right] \right\} dx dy \quad (22) \end{aligned}$$

در رابطه (28)، C_A ثابتی از ماده هستند که اثر تنش را بر روی دمای انتقال نشان می‌دهند. همچنین A_S دما در زمان شروع فاز آستنیت، A_F دما در زمان خاتمه فاز آستنیت می‌باشد [18]. مقدار a_A و b_A از رابطه (29) بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} a_A &= \frac{\pi}{(A_F - A_S)} \\ b_A &= -\left(\frac{a_A}{C_A}\right) \end{aligned} \quad (29)$$

همچنین نرخ تغییرات کسر تغییر فاز (ξ) با مشتق‌گیری از رابطه (28) نسبت به زمان به صورت (30) محاسبه می‌شود:

$$\xi = -\frac{1}{2} [a_A \dot{T} + b_A \dot{\sigma}] \sin[a_A(T - A_S) + b_A \sigma] \quad (30)$$

بنابراین با جایگذاری روابط (27) و (30) در رابطه (26) نرخ تغییرات تنش کششی سیم، از رابطه (31) بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \Omega b_A \sin[a_A(T - A_S) + b_A \sigma]} \\ & * [\Omega(-\frac{1}{2} [a_A \dot{T}] \sin[a_A(T - A_S) + b_A \sigma]) + \theta_T \dot{T}] \end{aligned} \quad (31)$$

که به منظور محاسبه تنش کششی سیم، باید از رابطه (30) انتگرال گرفت. با محاسبه تنش و جایگذاری آن در فرمول (25) نیروی سیم آلیاژ حافظه‌دار به دست می‌آید. مشخصات نمونه ورق کامپوزیتی، پارامترهای مدل تبادل گرمایی، روابط بنیادی و تغییر فاز مورد استفاده در جدول 4 نشان داده شده است.

4- طراحی سیستم کنترلی

در این تحقیق سه نوع سیستم کنترلی برای کاهش دامنه نوسان ورق کامپوزیتی یکسرگیردار طراحی و اعمال شده است که در ادامه به بررسی آن-ها پرداخته خواهد شد.

4-1- کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر¹

با توجه به مطالعاتی که بر روی رفتار سیستم صورت گرفت، اکنون به کنترل ورق کامپوزیتی مسلح پیشنهادی با استفاده از کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر و فازی پرداخته می‌شود. بلوک دیاگرام کنترل کننده پیشنهادی برای این سیستم در شکل 2 نمایش داده شده است.

به طور کلی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر، مجموع سه سیگنال مختلف است که دارای تابع تبدیل به صورت معادله (32) می‌باشد.

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (32)$$

جدول 4 مشخصات ورق کامپوزیتی و سیم آلیاژ حافظه‌دار [15, 21]

مشخصات	نام
$E_1 = 42GPa, E_2 = 15GPa, \rho_0 = 1702, \nu_{12} = 0.3,$ length = 0.185m, width = 0.04m, Thickness = 0.005m, $b_1 = 0.005m, b_2 = 0.035m, a_1 = 0.03m,$ $a_2 = 0.15m$	ورق کامپوزیتی
$r_w = 5e^{-5} m, L_w = 0.12m, m_w = 0.002669e^{-3},$ $C_p = 322 J/kg^\circ C, h_0 = 70, T_{\infty} = 23^\circ C, R = 177\Omega,$ $A_S = 68^\circ C, A_F = 78^\circ C, C_A = 10.3e^6, \theta_T = -0.055e^6$ $\Omega = 20.6e^8$	سیم آلیاژ حافظه‌دار

¹ Proportional-Integral-Derivative controller (PID)

جدول 2 بررسی همگرایی دامنه جابجایی انتهای ورق کامپوزیتی

Table 2 Convergence study of displacement amplitude at the end of the composite plate

مقدار N و M	تعداد جملات سری	دامنه جابجایی (mm)
10	100	14.126
20	400	14.243
30	900	14.293
40	1600	14.301
50	2500	14.303
75	5625	14.303
100	10000	14.303

جدول 3 دامنه جابجایی انتهای ورق کامپوزیتی تحت بار نوسانی

Table 3 Displacement amplitude at the end of the composite plate

نسبت طول به ضخامت (a/h)	نسبت طول به ضخامت (تئوری مرتبه اول)	تحقیق حاضر (تئوری کلاسیک)	خطا (%)
10	0.881	0.815	-7.5
20	3.62	3.481	-3.8
37	14.7	14.303	-2.7
50	117	115.20	-1.5
100	404	401.18	-0.7

در رابطه (25)، σ تنش کششی سیم، A سطح مقطع جانبی سیم و r_w شعاع سیم می‌باشند. به منظور محاسبه σ تنش کششی سیم، از روابط بنیادی سیم‌های حافظه‌دار استفاده می‌شود.

رابطه بنیادی به رابطه بین تنش، کرنش و دمای هر ماده اطلاق می‌شود. برای مواد حافظه‌دار تاکنون روابط بنیادی زیادی ارائه شده است که مهم‌ترین و معتبرترین آن‌ها رابطه لیانگ است. در این معادله رابطه بین تنش-کرنش-دما و تغییر فاز در سیم‌های حافظه‌دار به صورت رابطه (26) می‌باشد [17]:

$$\dot{\sigma} = D \dot{\varepsilon} + \theta_T \dot{T} + \Omega \xi \quad (26)$$

که در آن، $\dot{\sigma}$ نرخ تغییرات تنش، \dot{T} نرخ تغییرات دما، $\dot{\varepsilon}$ نرخ تغییرات کرنش و ξ نرخ تغییرات فاز ماده حافظه‌دار می‌باشند. همچنین D, θ_T, Ω به ترتیب مدول الاستیسیته، ضریب انبساط حرارتی و ضریب تغییر فاز سیم حافظه‌دار هستند. در رابطه (26) نرخ تغییرات کرنش سیم حافظه‌دار به دلیل این که جابه‌جایی در صفحه (XY) صفر است، در نتیجه $\dot{\varepsilon} = 0$.

معادله دیفرانسیل انتقال حرارت سیم مطابق رابطه (27) است. در این رابطه مقدار گرمای تولید شده به دلیل ولتاژ الکتریکی در سیم و مقدار حرارت تبادل شده با محیط اطراف در نظر گرفته شده است [17-18]:

$$m_w c_p \frac{dT}{dt} = \frac{V^2}{R} - (h_0 + h_2 T^2) A_l (T - T_{\infty}) \quad (27)$$

که در آن، m_w جرم سیم، V ولتاژ اعمالی به سیم، c_p ظرفیت گرمایی ویژه آلیاژ حافظه‌دار، h_0 و h_2 ضرایب تبادل گرمایی سیم با محیط [19]، A_l سطح جانبی سیم، R مقاومت سیم، T دما سیم و T_{∞} دمای محیط می‌باشند (در این کار به دلیل ناچیز بودن h_2 ، صفر در نظر گرفته می‌شود).

کسر تغییر فاز از مارتنزیت به آستنیت در سیم‌های حافظه‌دار که وابسته به دما می‌باشد با استفاده از رابطه (28) قابل محاسبه است [20]:

$$\xi = \frac{1}{2} [\cos[a_A(T_h - A_S) + b_A \sigma] + 1] \quad (28)$$

سیم 95°C می‌باشد، یک تابع پنالتی تعریف می‌شود تا اگر دما از 95°C بیشتر شد، نسل مذکور از بین جواب‌ها حذف گردد.

در این مقاله جهت بدست آوردن مقادیر بهینه ضرایب بهره در کنترل کننده کلاسیک، جمعیت اولیه تعداد 100 نسل انتخاب گردید. مقادیر ضرایب بهره K_p ، K_i و K_d بدست آمده با استفاده از روش سعی و خطا و الگوریتم ژنتیک در جدول 5 ارائه شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که پس از نسل 24 جواب حاصله بهبود نیافته است و لذا جواب مذکور به عنوان جواب بهینه انتخاب می‌گردد.

جدول 5 مقادیر K_p ، K_i و K_d در کنترل کننده کلاسیک

Table 5 Values of K_p , K_i & K_d coefficients used in the PID controller

K_d	K_i	K_p	روش
320	320	340	سعی و خطا
318.099	244.785	982.303	الگوریتم ژنتیک

شکل 3 جایجایی انتهای ورق کامپوزیتی یکسرگیردار تحت بار نوسانی را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، سیستم حلقه بسته با کنترل کننده کلاسیک دامنه نوسانات ورق را به طور قابل توجهی کاهش داده است. همچنین مشاهده می‌شود که کنترلر بهینه سازی شده با روش الگوریتم ژنتیک عملکرد مطلوب‌تری نسبت به کنترلر لری دارد که ضرایب آن با روش سعی و خطا بدست آمده است.

4-2- کنترل کننده فازی

کنترل کننده‌های فازی از جمله کنترل کننده‌های هوشمندی هستند که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. استنتاج فازی، فرآیند فرموله کردن نگاشت ورودی داده شده به یک خروجی با استفاده از منطق فازی است. قلب یک سیستم استنتاج فازی، یک پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر-آنگاه فازی تشکیل شده است. یک کنترل کننده فازی برای عملکرد مناسب نیاز به تنظیم صحیح دارد. تعداد، شکل و محدوده عملکرد توابع عضویت ورودی و خروجی، جدول قواعد و... پارامترهایی هستند که با توجه به سیستم در کنترل کننده تنظیم می‌گردند. برای انجام فرآیند کنترل کننده فازی متغیرهای مربوط به ورودی و خروجی کنترل کننده و همچنین قواعد فازی به کار رفته، جمعا 18 متغیر می‌باشد. حال با توجه به مطالعاتی که روی رفتار سیستم صورت گرفت به طراحی کنترل کننده فازی برای کنترل ارتعاشات وارد بر سازه پرداخته می‌شود. ورودی‌های کنترل کننده فازی شامل خطا ($E(t)$)، مشتق خطا و خروجی کنترل کننده، میزان ولتاژ ورودی ($U(t)$) به سیم حافظه‌دار برای رسیدن به هدف مطلوب می‌باشد. که این هدف، اعمال ولتاژ موردنظر به کنترل کننده، جهت کنترل جابه‌جایی و کاهش دامنه ارتعاشات وارد بر سازه می‌باشد. متغیرها برای 6 تابع عضویت ورودی کنترل کننده فازی یعنی خطا و مشتق خطا و همچنین 3 تابع عضویت خروجی آن، 9 متغیر از 18 متغیر را تشکیل می‌دهد، 9 متغیر باقی مانده مربوط به قواعد فازی به کاررفته در مرحله استنتاج می‌باشد. در کنترل کننده فازی به کار گرفته شده، متغیرهای زبانی مرتبط با سیگنال‌های ورودی به صورت زیر می‌باشند: مثبت بزرگ (PB)، متوسط (M) و منفی بزرگ (NB). همچنین برای سیگنال خروجی متغیرهای زبانی به صورت بزرگ (H)، متوسط (M) و کوچک (L) می‌باشند. شکل 4 توابع عضویت فازی نرمال تعریف شده برای متغیر خطا و مشتق آن و توابع عضویت فازی نرمال تعریف شده برای متغیر خروجی را نمایش می‌دهد.

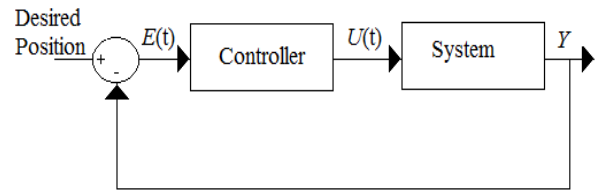


Fig. 2 Block diagram of the control system

شکل 2 بلوک دیاگرام سیستم کنترلی

با توجه به شکل 2 مقدار مطلوب در ورودی با مقدار فیدبک مقایسه می‌شود. اختلاف بین این دو سیگنال، سیگنال خطا نام دارد که وارد گین تناسبی K_p ، مشتق گیر K_d و انتگرال گیر که دارای گین K_i است، در کنترل کننده می‌شود. مجموع این سه سیگنال ولتاژ ورودی به سیم حافظه‌دار را تولید می‌کند. ضرایب K_p ، K_i و K_d نیز می‌توانند با روش‌های شناخته شده‌ای مانند روش پاسخ پله زیگلر-نیکولز محاسبه شوند، اگرچه در کاربردهای عملی، بطور رضایت بخش می‌توانند با آزمون و خطا و مشاهده رفتار سیستم بطور تقریبی تعیین گردند. در این مقاله برای تعیین ضرایب بهره K_p ، K_i و K_d مورد استفاده در کنترل کننده کلاسیک ابتدا از روش سعی و خطا شده و سپس با از روش ژنتیک الگوریتم این ضرایب جهت بهبود عملکرد سیستم کنترلی بهینه‌سازی می‌شود.

روش الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی کلی می‌باشد که بر روی یکسری از جواب‌های مساله به امید بدست آوردن جوابهای بهتر قانون بقای بهترین را اعمال می‌کند. در این روش با تولید نسل‌های مختلف، در هر نسل جواب‌های بهینه انتخاب و به کمک آن‌ها نسل بعد تولید می‌شود و این کار تا یافتن جواب‌های بهتر ادامه می‌یابد. این فرآیند باعث می‌شود که نسل‌های جدید با شرایط مساله سازگارتر بوده و به جواب بهینه نزدیکتر باشند.

با توجه به اینکه مدلسازی مساله در نرم افزار متلب انجام شده است، برای پیاده سازی روش بهینه‌سازی، از جعبه ابزار ژنتیک الگوریتم¹ متلب استفاده می‌شود. واضح است که هدف نهایی سیستم کنترلی در این تحقیق، کاهش ارتعاشات اجباری وارد بر ورق تحت بار نوسانی می‌باشد. بنابراین، جهت بهینه‌سازی سیستم کنترلی با استفاده از ژنتیک الگوریتم، در این مقاله دامنه نوسانات ارتعاشات انتهای ورق کامپوزیتی یکسرگیردار (W) به عنوان تابع هدف انتخاب می‌شود. واضح است که ضرایب سیستم کنترلی، یعنی K_p ، K_i و K_d نیز متغیرهای مساله بهینه‌سازی می‌باشند.

جهت بهینه‌سازی با جعبه ابزار ژنتیک الگوریتم متلب، لازم است که کامپیوتری محاسبه دامنه نوسانات ارتعاشات ورق کامپوزیتی به صورت یک ام-فایل² و با نام مشخص ذخیره شود. سپس نام این فایل به عنوان تابع هدف در جعبه ابزار معرفی می‌شود. سه متغیر اصلی K_p ، K_i و K_d به عنوان پارامترهای سیستم معرفی می‌شوند. با توجه به اینکه ضرایب فوق همواره مثبت هستند، محدودیت مذکور در جعبه ابزار اعمال می‌شود. در نهایت با تولید نسل‌های مختلف، کد رایانه‌ای مذکور با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک سعی در کمینه کردن دامنه نوسانات ارتعاشات می‌نماید تا بهینه‌ترین جواب را بدست آورد. لازم به ذکر است، با توجه به اینکه حد اشباع دمای

¹ gatool

²M-file

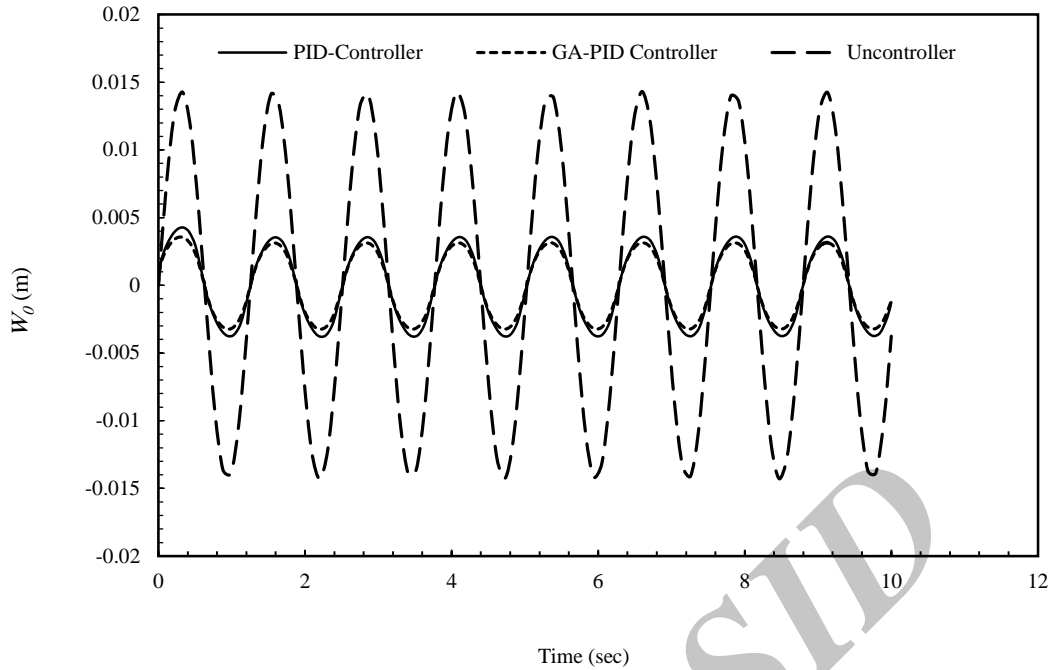


Fig. 3 Vibrational displacement at the end of the composite plate using PID controller

شکل 3 جابجایی انتهای ورق کامپوزیتی با کنترلر کلاسیک

بنابراین ولتاژ اعمالی برای افزایش دمای سیم باید افزایش یابد. با این تعریف، قوانین کنترلی تنظیم شده به صورت جدول 6 می‌باشد. در کنترل کننده فازی مهم‌ترین عاملی که تأثیر قابل توجهی بر کیفیت پاسخ-های به دست آمده از الگوریتم ژنتیک دارد، نحوه کدگذاری پارامترها و متغیرهای بهینه‌یابی و همچنین چگونگی تعیین تابع هدف می‌باشد [21]. در این مقاله به منظور حفظ کیفیت پاسخ و همچنین ممانعت از افزایش بیش از حد طول رشته‌ها، از روش بهینه‌یابی متوالی پایگاه داده‌ها (توابع عضویت متغیر ورودی و خروجی کنترل کننده) و قوانین فازی استفاده شده است. روش کار به این صورت است که در مرحله اول با به کارگیری قوانین کنترل فازی اولیه به تعیین توابع عضویت پرداخته و در مرحله بعد با به کارگیری پارامترهای بهینه شده مرحله اول، قوانین فازی نیز بهینه می‌گردند. با استفاده از این روش علاوه بر دست‌یابی به پاسخ‌هایی کیفیت بالا، سرعت سیستم نیز افزایش می‌یابد.

مشابه با کنترلر کلاسیک، در این مقاله جهت دست آوردن مقادیر بهینه قوانین و پارامترهای کنترل کننده فازی از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک نرم افزار متلب استفاده شده است. شکل 5 توابع عضویت بهینه شده مربوط به متغیرهای ورودی و خروجی کنترل کننده فازی را نشان می‌دهند. همچنین شکل 6 خروجی سیستم حلقه بسته با کنترلر فازی و فازی-ژنتیک را در مقایسه با سیستم بدون کنترلر نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، خروجی سیستم یا همان جابجایی انتهای ورق پس از اعمال سیستم کنترلی کاهش یافته و به مقدار مطلوب ورودی یعنی صفر نزدیک شده است.

جدول 6 قوانین کنترلی فازی

Table 6 Rules base for the fuzzy controller

$E(t)$	NB	M	PB
$dE(t)$	L	L	M
NB	L	L	M
M	L	M	M
PB	M	M	H

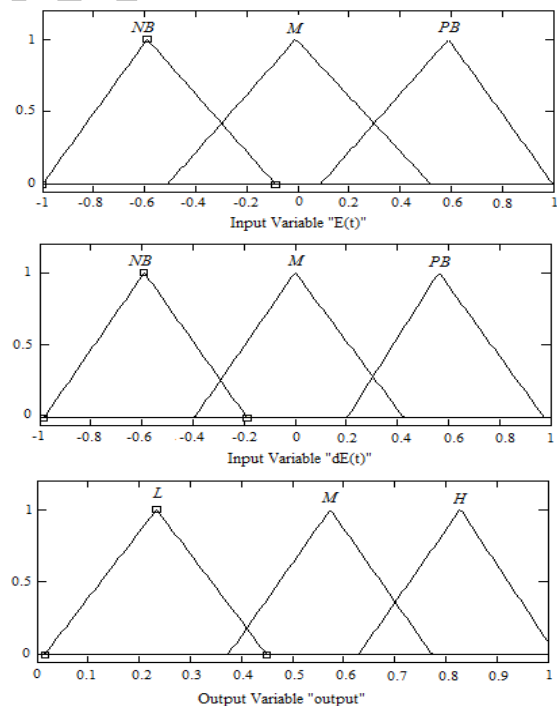


Fig. 4 Membership functions of input and output variables of fuzzy controller

شکل 4 توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی کنترل کننده فازی برای بیان مجموعه قوانین، لازم است توجه داشت که خطای منفی به معنای این است که مقدار موقعیت به بالاتر از موقعیت مورد نظر ما رسیده است، بنابراین ولتاژ اعمالی برای کاهش دمای سیم باید کاهش یابد و خطای مثبت به معنای این است که مقدار موقعیت کمتر از موقعیت مورد نظر ما می‌باشد،

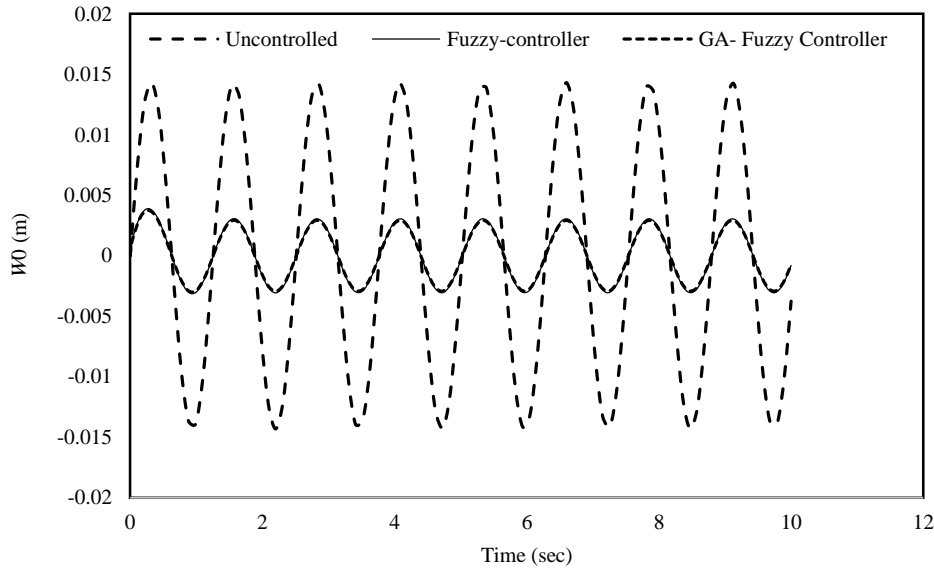


Fig. 6 Vibrational displacement at the end of the composite plate using fuzzy controllers

تغییرات خطا (به عنوان ورودی مشتق گیر) و مجموع خطاها (به عنوان ورودی انتگرال گیر) می باشد. برای آسانتر شدن این کنترل کننده، می توان آن را به دو کنترل کننده تناسبی- مشتق گیر و کنترل کننده انتگرال گیر در کنار کنترل کننده فازی تقسیم کرد. بنابراین با تنظیم صحیح تعداد، شکل و محدوده عملکرد توابع عضویت ورودی و خروجی، جدول قواعد و شکل 4 می-توان با کنترل ولتاژ، جابه جایی و ارتعاشات وارد بر سازه را کاهش داد. باید توجه داشت که قوانین مورد استفاده در کنترلر تناسبی- مشتق گیر همانند جدول 6 خواهد بود ولی قوانین مورد استفاده در کنترلر انتگرال گیر مطابق جدول 7 است.

5- بررسی و تحلیل نتایج

در این بخش به بررسی و مقایسه عملکرد کنترلرهای بهینه شده در این تحقیق پرداخته می شود. شکل 7 جابجایی انتهای ورق کامپوزیتی در اثر اعمال سه کنترلر بهینه شده بر روی سیستم را نشان می دهد. همچنین جدول 8 حداکثر جابجایی¹ انتهای ورق و همچنین دامنه نوسانات حالت پایدار انتهای ورق در را در حالت بدون کنترلر با کلیه کنترلرهای بررسی شده مقایسه می نماید. همانطور که دیده می شود کنترلر کلاسیک-فازی-ژنتیک بهترین عملکرد را در کاهش دامنه نوسانات پایدار ورق دارد. البته باید توجه داشت که کلیه کنترلرها دارای عملکرد مطلوب و مشابهی هستند به گونه ای که اختلاف کنترلرهای بهینه در کاهش نوسانات پایدار با یکدیگر زیر 2 درصد است. دلیل این موضوع، وجود حالت اشباع عملگرهای آلباز حافظه دار در دمای 95 C است که باعث محدودیت در عملکرد کنترلرها می شود.

جدول 7 قوانین کنترلی فازی با ورودی مجموع خطا

Table 7 Fuzzy control rules with the total error input

$E(t)$	$I(t)$
NB	L
M	M
PB	H

¹ Overshoot

شکل 6 جابجایی انتهای ورق کامپوزیتی با کنترلرهای فازی

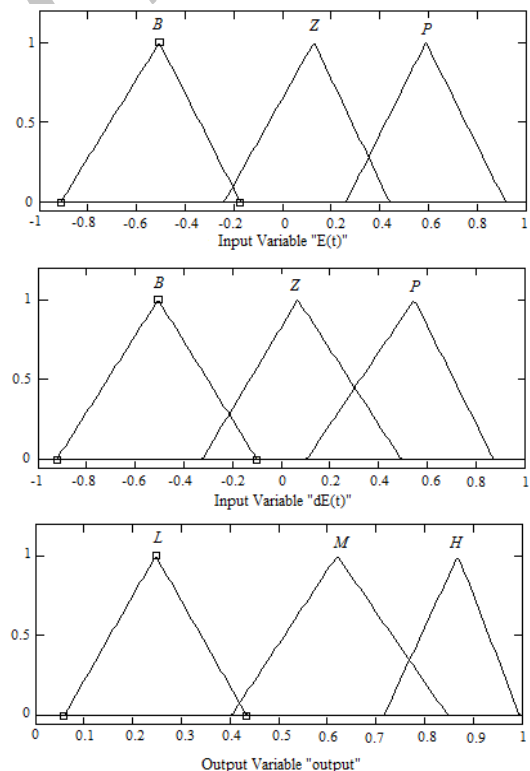


Fig. 5 Optimized membership functions of input and output variables of fuzzy controller

شکل 5 توابع عضویت بهینه شده متغیرهای ورودی و خروجی کنترلر فازی

3-4- کنترل کننده فازی - تناسبی، انتگرالی، مشتق گیر

برای طراحی این کنترلر کننده می توان از چندین روش استفاده کرد که یکی از روشها ساختن آن با استفاده از یک کنترلر کننده فازی با سه ورودی است [22]. ورودی به کنترلر کننده فازی شامل خطا (به عنوان ورودی تناسبی)،

ثابت با مقدار 5.8 ولت دیده می‌شود. به منظور درک بهتر رفتار کنترلرهای فازی، سیگنال کنترلی این دو کنترلر با بزرگنمایی بیشتر در شکل 9 رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود رفتار این دو کنترلر نیز نوسانی است با این تفاوت که نوسانهای آنها در مقایسه با کنترلر کلاسیک با دامنه بسیار کوچک رخ می‌دهد.

همانطور که قبلا اشاره شد، حد اشباع دمای سیم‌ها 95 C می‌باشد. برای رسیدن با این دما، اگر جریان به صورت پیوسته و دائم به سیم اعمال شود، ولتاژی در حدود 5.8 ولت لازم است. اما اگر جریان به صورت نوسانی و لحظه‌ای به سیم اعمال شود، جریانی با دامنه تقریبا 7 ولت نیاز است تا دمای سیم به حد اشباع برسد. بنابراین کنترلرهای بهینه فازی و فازی-ژنتیک که سیگنال کنترلی آنها تقریبا ثابت است، حداکثر مقدار حدود 5.8 ولت را اعمال می‌کنند. در حالی که کنترلر بهینه کلاسیک، با سیگنال ورودی کاملا نوسانی، تا حداکثر ولتاژ حدود 7 ولت را اعمال می‌نماید. این موضوع صحت عملکرد کنترلرهای طراحی شده در جلوگیری از رسیدن عملگرها به حد اشباع را اثبات می‌نماید. همچنین باید توجه کرد که با وجود اینکه حداکثر مقدار ولتاژ مورد استفاده در کنترلر کلاسیک (7 ولت) بیشتر از کنترلرهای فازی (5.8 ولت) است، ولی به دلیل نوسانی بودن آن، مقدار انرژی مورد استفاده در آن کمتر از کنترلرهای فازی است که مقدار تقریبا ثابتی را به صورت دائم مصرف می‌نمایند.

جدول 8 حداکثر جابجایی و دامنه نوسانات پایدار ورق حاصل از اعمال کنترلرها
Table 8 Overshoot and steady-state vibrational displacement amplitude of the composite plate using different controllers

درصد کاهش	دامنه نوسان پایدار (m)	درصد کاهش	حداکثر جابجایی (m)	نوع کنترلر
-	0.0143	-	0.0143	بدون کنترلر
75.3	0.00353	70.6	0.0042	کنترلر کلاسیک
78.1	0.00312	75.03	0.00357	کنترلر کلاسیک-ژنتیک
78.7	0.00304	72.72	0.0039	کنترلر فازی
79.7	0.0029	74.12	0.0037	کنترلر فازی-ژنتیک
79.86	0.00288	74.33	0.00367	کنترلر کلاسیک-فازی-ژنتیک

کنترلر بهینه کلاسیک-ژنتیک در کاهش حداکثر جابجایی ورق بهترین عملکرد را در میان کنترلرها داراست. با این حال، همچون حالت پایدار، عملکرد کلیه کنترلرها نزدیک به یکدیگر است.

شکل 8 تغییرات ولتاژ مصرف شده به عنوان سیگنال کنترلی در سه کنترلر بهینه را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود سیگنال کنترلی کنترلر کلاسیک-ژنتیک رفتار نوسانی حول مقدار صفر دارد و دامنه آن تقریبا 7 ولت می‌باشد. در صورتیکه سیگنال کنترلی کنترلرهای فازی-ژنتیک و فازی-کلاسیک-ژنتیک در مقایسه با کنترلر کلاسیک تقریبا به صورت خط

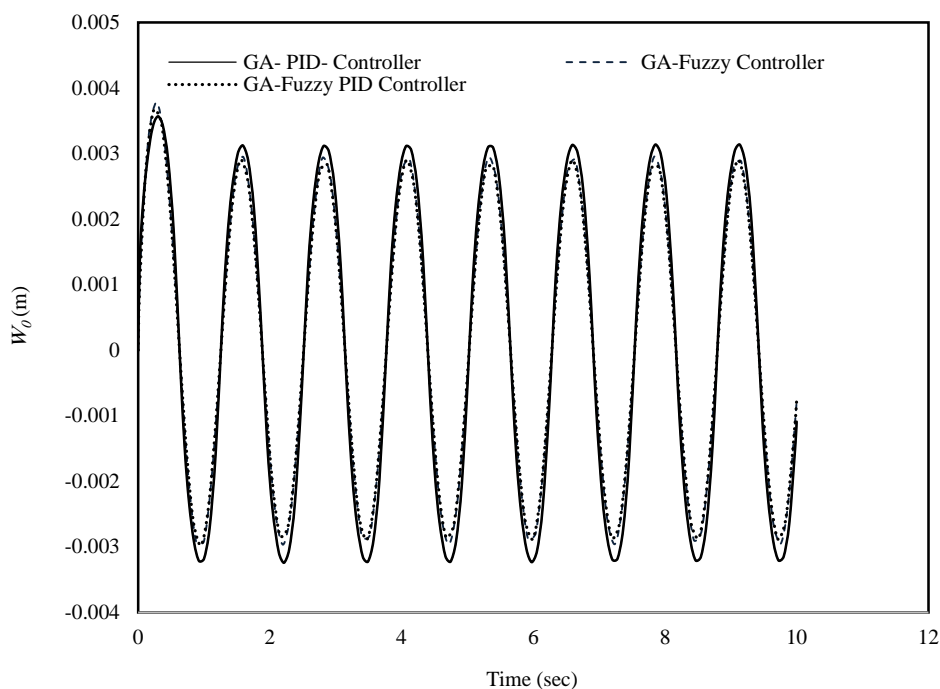


Fig. 7 Vibrational displacement of the composite plate using optimized controllers

شکل 7 جابجایی انتهای ورق کامپوزیتی حاصل از اعمال کنترلرهای بهینه مختلف

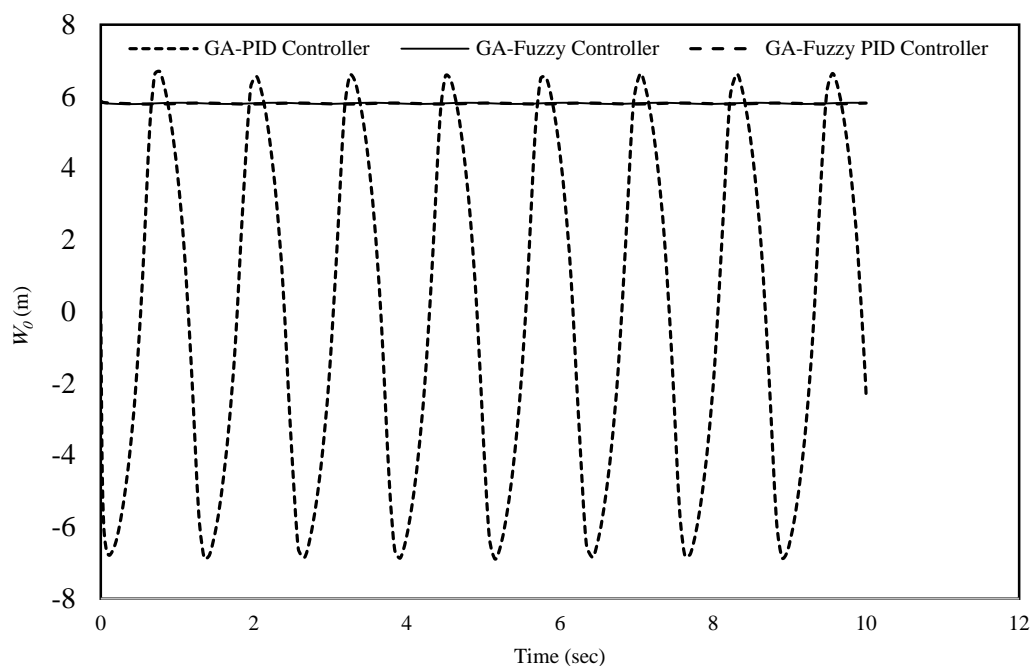


Fig. 8 Comparison of the generated control signal for optimized controllers

شکل 8 مقایسه سیگنال کنترلی تولید شده حاصل از اعمال کنترلرهای بهینه

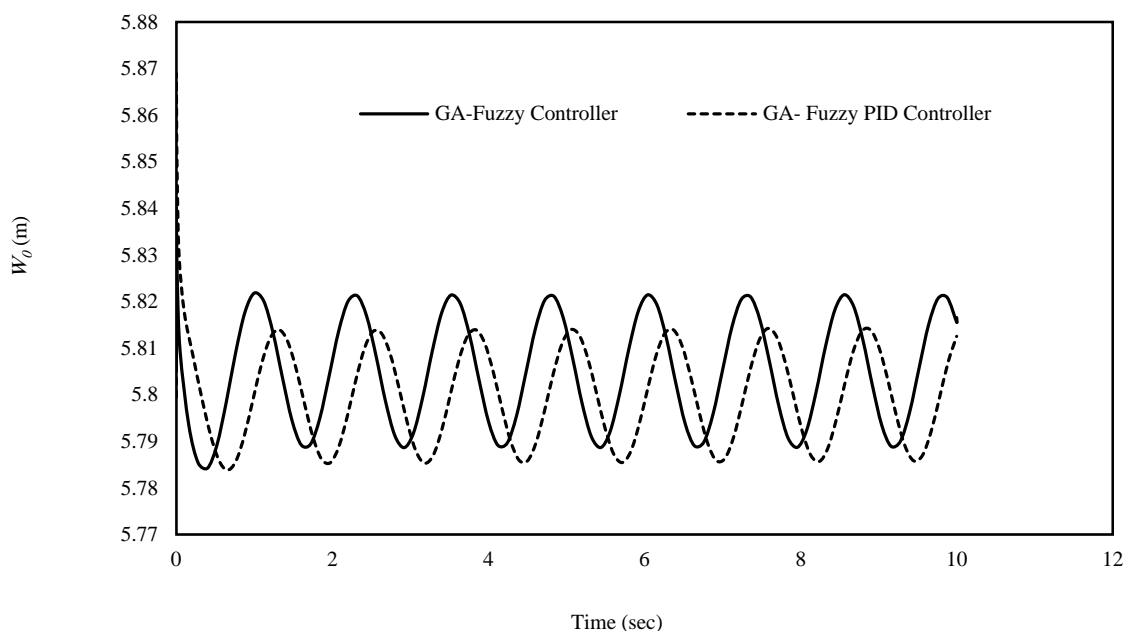


Fig. 9 Comparison of the control signal generated of the composite plate using fuzzy controllers

شکل 9 مقایسه سیگنال کنترلی تولید شده حاصل از اعمال کنترلرهای فازی

6- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا معادلات ارتعاشی اجباری حاکم بر رفتار ورق کامپوزیتی چند لایه یکسر گیردار که شامل سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار هستند با استفاده از تئوری کلاسیک ورق‌ها و اصل همپلتون استخراج شد و به روش عددی ریلی-ریتز و با در نظر گرفتن رفتار حرارتی مکانیکی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار حل گردید. سپس رفتار دینامیکی ورق کامپوزیتی به همراه سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در دو حالت ارتعاشات آزاد و اجباری مورد بررسی

قرار گرفت. نتایج حاصل از ارتعاشات آزاد به روش تحلیلی حاضر با نتایج تجربی مقایسه گردید که از تطابق خوبی برخوردار است. این موضوع اثبات کرد که فرمولاسیون انجام شده از دقت کافی برخوردار است. همچنین برای کاهش دامنه ارتعاشات ورق کامپوزیتی چند لایه‌ای مسلح با سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار تحت اعمال بار نوسانی اجباری، به طراحی کنترلرهای کلاسیک، هوشمند فازی و ترکیبی پرداخته شد. در مرحله آخر با به کارگیری الگوریتم ژنتیک به عنوان روشی قدرتمند و با هدف کاهش دامنه ارتعاشات اجباری

- [18] Mantovani, D., "Shape Memory Alloys: Properties and Biomedical Applications" Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Vol. 52, No. 10, pp. 36-44, 2000.
- [19] Bundhoo, V., "Design and Evaluation of a Shape Memory Alloy-Based Driven Actuation System for Biomimetic Artificial Fingers" BEng, University of Mauritius, 2009.
- [20] Sreekumar, M. Singaperumal, M. Nagarajan, T. Zoppi, M. and Molfino, R., "Recent Advances in Nonlinear Control Technologies for Shape Memory Alloy Actuators" Journal of Zhejiang University Science, Vol. 8, No. 5, pp. 818-829, 2007.
- [21] Montazeri, M. and Mohamadi, E., "Application of Genetic Algorithm in Design and Optimization of Fuzzy-PD Controller Parameters" Aerospace Knowledge & Technology Journal, 2013. (in Persian فارسی)
- [22] Rabiee, S., "Modeling and Intelligent Control of the Snake Robot with SMA Actuators" In Persian, MSc Thesis, Qazvin Islamic Azad University, Qazvin, 2011.

سازه، ضرایب، قواعد و پارامترهای کنترل کننده‌ها بهینه گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بهینه‌سازی پارامترها و ضرایب کنترل کننده‌ها باعث بهبود عملکرد آنها در کاهش دامنه ارتعاشات ورق کامپوزیتی شده است. همچنین می‌توان دریافت که کلیه کنترل کننده‌های طراحی شده دامنه ارتعاشات اجباری پایدار سازه را به صورت چشم‌گیری کاهش می‌دهند و در این بین کنترل کننده ترکیبی فازی-کلاسیک بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر کنترلرها داراست. با این حال کنترلر بهینه شده کلاسیک نیز در کاهش حداکثر دامنه نوسان و مصرف انرژی عملکرد بهتری نسبت به دیگر کنترلرها دارد.

7- مراجع

- [1] Machado, L.G. and Savi, M.A., "Medical applications of shape memory alloys" Brazilian Journal of Medical and Biological Research, Vol. 36, No. 6, pp. 683-691, 2003.
- [2] Song, G. Kelly, B. Agrawa, B.N. Lam, P.C. and Srivatsan, T.S., "Application of Shape Memory Alloy Wire Actuator for Precision Position Control of a Composite Beam" Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 9, No. 3, pp. 330-333, 2000.
- [3] Chandra, R., "Active Shape Control of Composite Blades Using Shape Memory Actuation" Smart Materials and Structures, Vol. 10, No. 5, pp. 1018-1024, 2001.
- [4] Da Silva, E.P., "Beam Shape Feedback Control by Means of a Shape Memory Actuator" Materials and Design, Vol. 28, No. 5, pp. 1592-1596, 2007.
- [5] John, S. and Hariri, M., "Effect of Shape Memory Alloy Actuation on the Dynamic Response of Polymeric Composite Plates" Composites: Part A, Vol. 39, No. 1, pp. 769-776, 2008.
- [6] Sohn, J.W. Han, Y.M. Choi, S.B. Lee, Y.S. and Han, M.S., "Vibration and Position Tracking Control of a Flexible Beam Using SMA Wire Actuators" Journal of Vibration and Control, Vol. 15, No. 2, pp. 263-281, 2009.
- [7] Kuang, K.S.C. Quek, S.T. and Cantwell, W.J., "Active Control of a Smart Composite with Shape Memory Alloy Sheet Using a Plastic Optical Fiber Sensor" Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 201, No. 1, pp. 182-187, 2013.
- [8] Bodaghi, M. Damanpack, A.R. Aghdam, M.M. and Shakeri, M., "Active Shape/Stress Control of Shape Memory Alloy Laminated Beams" Composites: part B, Vol. 56, No. 1, pp. 889-899, 2014.
- [9] kheirikhah, M.M. Aghabarati, H. and Khosravi, P., "Natural Vibration Analysis of Sandwich Plates with Embedded SMA Wires" 2nd International Conference on Innovations in Engineering and Technology (ICCET), pp. 19-20, 2014.
- [10] K Khorshidi, E Rezaei, AA Ghadimi, M Pagoli, "Active vibration control of circular plates coupled with piezoelectric layers excited by plane sound wave", Applied Mathematical Modelling, Vol. 39 (3), No. 1, pp. 1217-1228, 2015.
- [11] K Khorshidi, M Balali, AA Ghadimi, "Control Forced Vibrations Of Laminated Composite Rectangular Plate Resting On Linear Line Support", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15 (9), No. 1, pp. 95-104, 2015.
- [12] Reddy J.N., "Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis" Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [13] Hariri, M. and Veeramachaneni, B., "Vibration Control of Polymeric Composite Plates Using Shape Memory Alloys" In Smart Structures and Materials 2006: Smart Sensor Monitoring Systems and Application, San Diego, USA, Vol.6167, No. 10, pp. 269-280, 2006.
- [14] Whitney, J.M., "Structural Analysis of Laminated Anisotropic Plates" Lancaster, PA: Technomic, 1987.
- [15] John, S. and Hariri, M., "Effect of Shape Memory Alloy Actuation on the Dynamic Response of Polymeric Composite Plates" Composites: Part A, Vol. 39, No. 5, pp. 769-776, 2008.
- [16] Reddy, J.N., "Theory and Analysis of Elastic Plates" Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 1999.
- [17] Elahania, M. and Ashrafoun, H., "Nonlinear Control of Shape Memory Alloy Actuated Manipulator" ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 124, No. 4, pp. 566-575, 2002.