

تحلیل و طراحی کنترل کننده بهینه به منظور دستیابی به میرایی ارتعاشی تیر هوشمند تیموشنکو در بازه‌های مختلف

مجتبی حسنلو^۱، احمد باقری^۲، فرید نجفی^۳

^۱ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه گیلان، MHasanlu@Webmail.Guilan.Ac.Ir

^۲ آستاد گروه مکانیک دانشکده فنی، دانشکده مکانیک، دانشگاه گیلان، Bagheri@Guilan.Ac.Ir

^۳ دانشیار گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی، دانشکده مکانیک، دانشگاه گیلان، FNajafi@Guilan.Ac.Ir

چکیده

میرایی ارتعاشی تیر تیموشنکو براساس یافتن مکان، تعداد بهینه حسگر و عملگر پیزوالکتریک با استفاده از کنترلر LQR و الگوریتم MOPSO موضوع مورد بررسی در این تحقیق محسوب می‌شود. امروزه برای اینکه یک سازه دارای عمر، هزینه ساخت، مصرف انرژی قابلیت اطمینان بهینه‌ای باشد تلاش‌های فراوانی از سوی محققین این حوزه صورت پذیرفته است. یکی از تحقیقات تامین سازه هوشمند بهینه و کنترل شده با استفاده از حسگر و عملگر پیزوالکتریک است بگونه‌ای این حسگر و عملگر بتواند به محض دریافت یک ارتعاش توسط حسگر و با انتقال سیگنال ارتعاشی به کنترلر، بهترین بهره کنترلی را براساس نوع نگرش طراحی شده در کنترلر اتخاذ شده و آنگاه سیگنال مناسبی را به عملگر انتقال دهد. در واقع این عملگر است که تمام تلاش خود را برای خنثی‌سازی ارتعاش سازه به ظهور می‌رساند تا سازه‌ای با عمر بیشتر و خرابی کمتر داشته‌باشد و بتواند هدف طراح را به بهترین نحوه تامین نماید. حال در این پژوهش با استفاده از الگوریتم MOPSO و تعریف متغیرهای طراحی، بهترین تعداد و مکان جهت نصب حسگر و عملگر پیزوالکتریک در پایین و بالای سازه تیر یکسرگیردار در بازه‌های مشخص را امکان‌پذیر جستجو نموده و آنگاه یک مدل بهینه از طراحی سازه هوشمند ارائه نماید.

کلیدواژگان

کنترلر LQR، میرایی ارتعاشی، تیر تیموشنکو، مکان و تعداد بهینه پیزوالکتریک، الگوریتم MOPSO.

Optimal Analysis and Design Controller for Suppressing Vibration Smart Timoshenko Beam by Using Various Intervals

M.Hasanlou^{1*}, A.Bagheri², F.Najafi³

^{1,2,3} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan

* P.O. Box 3756, Rasht, Iran, MHasanlu@Webmail.Guilan.Ac.Ir

Abstract

The subject of this study was vibration damping of Timoshenko beam based on finding optimal place and number of piezoelectric sensor and actuator using LQR controller and MOPSO algorithm. Today, researchers make a lot of effort to make a structure have optimized reliable life, manufacturing cost, and power consumption. One of the researches on optimized and controlled smart structure is through using piezoelectric sensor and actuator so that the sensor and actuator can adopt the best controlling interest based on the type of approach to design the controller upon receipt of a vibration by sensor and with the transfer of vibration signals to the controller. Then, it can transfer a proper signal to the actuator. In fact, it is the actuator that tries to neutralize the vibrations of the structure in order to have a structure with longer life and lower failure and can meet the designer's objective in the best way. In this study, using MOPSO algorithm and defining the design variables, the best number and location to place the piezoelectric sensor and actuator at the bottom and top the bottom and top cantilever beam in a specified range can be searched and then an optimal model of smart structure was suggested.

Keywords

LQR Controller, Vibration Suppression, Timoshenko Beam, Optimal Placement and Number PZT, MOPSO Algorithm.

در این پژوهش نیز هدف این است که یک تیر یکسرگیردار را با روش

عددی اجزاءمحدود و منطبق بر تئوری تیموشنکو مدل‌سازی کرده و آنگاه با استفاده از تکه‌های حسگر و عملگر پیزوالکتریک که به ترتیب در پایین و بالای تیر در مکان بهینه نصب گردیده بتوان سازه تیر را با استفاده از کنترلر LQR که یک کنترل کننده بهینه منظور است در برابر اغتشاشات خارجی که بر تیر اعمال می‌گردد کنترل گردد. این مقاله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات چندهدفه یا MOPSO ضرایب ماتریس‌های Q و R را در بازه‌های مختلف که در بخش‌های بعد ارائه می‌گردد. مکان بهینه حسگر و عملگر پیزوالکتریک را شناسایی و آنگاه جابجایی دورانی و عرضی سازه را مهار می‌شود. قیود موردنظر در این بهینه‌سازی عبارتند از:

۱- مقدمه

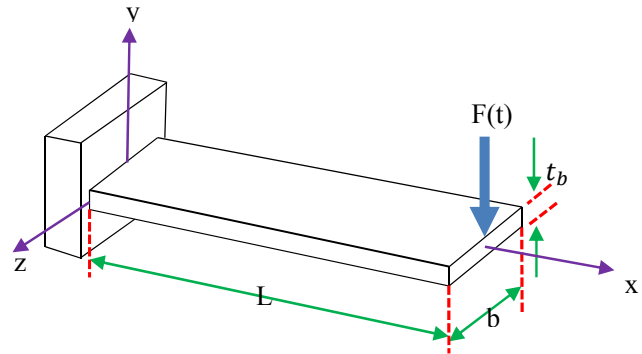
بهینه‌سازی در طراحی سازه‌های مهندسی در چند دهه اخیر از سوی محققین بسیار قابل توجه بوده‌است. بدین جهت که یک سازه مهندسی بتواند با طراحی بهینه خود بتواند عمر، بازدهی، استحکام، کنترل موثرتری در جهت رفع نیازهای بشری قرار بگیرد. سازه‌های مهندسی شامل تیر- ورق- پوسته مدل یک سازه صنعتی و ادوات مهندسی است که با بکارگیری رویکردهای نوین و کلاسیک مهندسی و علم کنترل سعی در آنالیز بیشتر در رفتارهای دینامیکی و مکانیکی سازه و شناخت رفتار آنهاست. در این حوزه فعالیت‌های فراوانی از سال‌های اخیر مورد توجه تحلیل‌گران قرار گرفته‌است که می‌توان بصورت زیر فهرست نمود.

$$[N_w]^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+\varphi} \left\{ 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 - 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - \varphi\left(\frac{x}{L}\right) + 1 + \varphi \right\} \\ \frac{1}{1+\varphi} \left\{ \left(\frac{x}{L}\right)^3 - (2+\frac{\varphi}{2})\left(\frac{x}{L}\right)^2 - (1+\frac{\varphi}{2})\left(\frac{x}{L}\right) \right\} \\ \frac{-1}{1+\varphi} \left\{ 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 - 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - \varphi\left(\frac{x}{L}\right) \right\} \\ \frac{1}{1+\varphi} \left\{ \left(\frac{x}{L}\right)^3 - (1-\frac{\varphi}{2})\left(\frac{x}{L}\right)^2 - \frac{\varphi}{2}\left(\frac{x}{L}\right) \right\} \end{bmatrix} \quad (1)$$

- ✓ کمینه سازی بیشنه جابجایی نوک تیر
- ✓ کمینه سازی زمان میرایی

۲- مدل سازی

یک تیر یکسرگیردار با اعمال نیروی عرضی بر نوک سازه بصورت زیر فرض می کنیم.



شکل ۱ تیر یکسرگیردار با مشخصات هندسی

$$[N_\theta]^T = \begin{bmatrix} \frac{6}{(1+\varphi)L} \left\{ \left(\frac{x}{L}\right)^2 - \left(\frac{x}{L}\right) \right\} \\ \frac{1}{(1+\varphi)} \left\{ 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - (4+\varphi)\left(\frac{x}{L}\right) + 1 + \varphi \right\} \\ \frac{-6}{(1+\varphi)L} \left\{ \left(\frac{x}{L}\right)^2 - \left(\frac{x}{L}\right) \right\} \\ \frac{1}{(1+\varphi)} \left\{ 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - (2-\varphi)\left(\frac{x}{L}\right) \right\} \end{bmatrix} \quad (2)$$

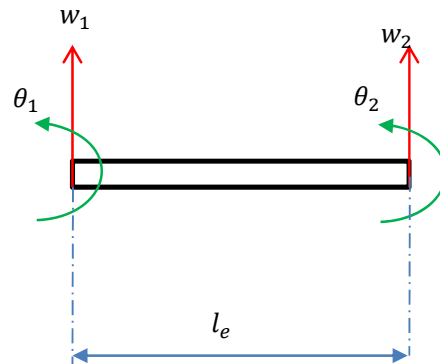
$$M_s = \int_0^{Lb} \begin{bmatrix} [N_w]^T \\ [N_\theta]^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho A & 0 \\ 0 & \rho I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [N_w] \\ [N_\theta] \end{bmatrix} dx \quad (3)$$

$$[K_s] = \int_0^L \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} [N_\theta] \\ [N_\theta] + \frac{\partial}{\partial x} [N_w] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} EI & 0 \\ 0 & KGAL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} [N_\theta] \\ [N_\theta] + \frac{\partial}{\partial x} [N_w] \end{bmatrix} dx \quad (4)$$

$$C_{smart} = \alpha M_{smart} + \beta K_{smart} \quad (5)$$

$$F = \int_0^{Lb} \begin{bmatrix} [N_w]^T \\ [N_\theta]^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ m \end{bmatrix} dx \quad (6)$$

برای مدل سازی تیر یکسرگیردار براساس روش عددی اجزاءمحدود هر المان از تیر را بصورت ۲ بعدی که هر گره دارای ۲ درجه آزادی محسوب می شود، بیان نمود.



شکل ۲ درجات آزادی یک المان از تیر

از آنجایی که براساس تئوری تیموشنکو اثربرشی در هنگام تغییر شکل مدنظر قرارمی گیرد. بنابراین براساس شکل زیر می توان تغییر شکل المان از تیر را بصورت زیر مدنظر قرار داد. بنابراین می توان توابع شکل در حالت حرکت عرضی و دورانی برای یک المان از تیر را چنین بیان نمود.

حال با استفاده از روابط زیر که اثر برشی نیز در آنها مدنظر بوده است می توان ماتریس جرم و سفتی و دمپینگ و نیرو سازه را برای یک المان از تیر بیان نمود [17].

۳- مواد پیزوالکتریک

مواد هوشمند، گروهی از مواد می باشند که به سبب ویژگی های خاصی که دارند، شرایط مختلف محیطی همانند میدان های تنش، حرارت، مغناطیس و الکتریسیته را دریافت کرده و نسبت به آنها واکنش نشان می دهند. این مواد با توجه به نوع خصوصیتی که دارند، به عنوان حسگر و یا عملگر در بخش های مختلف بکار برده می شوند. مواد هوشمند به همراه سیستم های کنترلی و سازه های نظیر تیر، صفحه و پوسته، سازه های هوشمند را تشکیل می دهند. این سازه ها با استفاده از حسگرهای ساخته شده از مواد هوشمند، شرایط و تغییرات اعمالی از محیط را دریافت کرده و با استفاده از بازخوردهایی که به سیستم کنترلی می دهند، توسط عملگرها سازه را تحت کنترل قرار می دهند. آلیاژهای حافظه دار، سیالات هوشمند، مواد مگنتوستریکتیو و الکتروستریکتیو و بالاخره مواد پیزوالکتریک گروهی از مواد هوشمند به شمار می آیند.

اثر پیزوالکتریک بیان کننده کوپلینگ الکترومکانیکی مستقیم و معکوس می باشد. اثر مستقیم، تولید بار الکتریکی در نتیجه اعمال تنش مکانیکی به ماده پیزوالکتریک است و اثر معکوس، تغییر شکل مکانیکی در هنگام قرار گرفتن ماده پیزوالکتریک در یک میدان الکتریکی می باشد. برای ماده پیزوالکتریک خطی، با توجه به مرجع [18] روابط (۷) و (۸) که معادلات بنیادین نامیده می شوند، رابطه ی بین متغیرهای مکانیکی و الکتریکی را بیان می کنند.

$$\sigma = c^E S - e^T E \quad (7)$$

$$D = e S + \epsilon^S E \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -\begin{bmatrix} K_{smart} \\ M_{smart} \end{bmatrix} & -\begin{bmatrix} C_{smart} \\ M_{smart} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad C = [I]$$

$$B = \begin{bmatrix} [0] \\ \begin{bmatrix} f_e \\ M_{smart} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} [0] \\ \begin{bmatrix} f_c \\ M_{smart} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$D = [0] \quad F = [0] \quad (13)$$

۴- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

بهینه‌سازی چندهدفه تجمعی ذره روش جستجو ابتکاری بوده که حرکات دسته ای از پرندگان را که به دنبال غذا هستند، شبیه‌سازی می‌کند. سادگی و مبتنی بر پایه جمعیت بودن بهینه‌سازی چندهدفه تجمعی ذره موجب شده است که این روش، روشی متداول در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه باشد. برای بکاربردن روش تجمعی ذره در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه لازم است که الگوریتم اصلی تک هدفی این روش اصلاح شود. هنگام بسط روش تجمعی ذره برای بهینه‌سازی چندهدفه، لازم است چند پرسش را مورد توجه قرار گیرند [19]:

بهترین تجربه‌ی گروهی برای هر ذره چگونه انتخاب می‌شود؟ به عبارت دیگر به چه روشی باید از میان حل‌های غیربرتر این ذرات را برگزید؟ چگونه حل‌های غیربرتر را طی فرآیند جستجو حفظ کرد تا غیربرتر بودن آنها را نه تنها نسبت به جمعیت قبل بلکه نسبت به جمعیت‌های بعدی مورد بررسی قرار داد؟ چگونه می‌توان توزیع همگن و یکنواختی از نقاط غیربرتر در سراسر جبهه پارتو داشت؟ چگونه می‌توان تنوع را در جمعیت حفظ کرد بطوری که الگوریتم به یک جواب هگمرا نشود؟ بردار موقعیت ذره نام

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1) \quad (14)$$

بردار سرعت ذره نام

$$\vec{v}_i(t+1) = w \vec{v}_i(t) + C_1 r_1 (\vec{x}_{pbest_i}(t) - \vec{x}_i(t)) + C_2 r_2 (\vec{x}_{gbest}(t) - \vec{x}_i(t)) \quad (15)$$

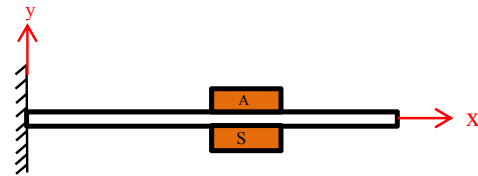
\vec{x}_{gbest} مخزن نگهداری ذرات نخبه و نامغلوب در اثر فرآیند بهینه‌سازی می‌باشد. r_1, r_2 مقادیر تصادفی در بازه $[0,1]$ و w ضریب وزن و C_1, C_2 به ترتیب ضرایب یادگیری شخصی و یادگیری جمعی در نظر گرفته شده‌اند.

۵- کنترلر LQR

بر اساس کنترلر Linear Quadratic Regulator می‌توان بصورت LQR از آن یاد کرد دارای تابع هدفی است که می‌توان چنین بیان نمود.

$$J = \int (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (16)$$

که σ تنش مکانیکی، D چگالی بار (بار در واحد سطح)، S کرنش مکانیکی، e^E سختی مکانیکی، e ثابت کرنشی پیزوالکتریک، E میدان الکتریکی و e^S گذردهی الکتریکی می‌باشد. بالوندهای E و S به ترتیب نشان دهنده مقادیر اندازه‌گیری شده در میدان الکتریکی ثابت و کرنش ثابت می‌باشند. معادله (۷)، بیانگر اثر معکوس پیزوالکتریک بوده و معادله (۸) اثر مستقیم پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. با استفاده از اثر مستقیم، ماده پیزوالکتریک می‌تواند تغییر شکل‌های مکانیکی را به بارهای الکتریکی تبدیل کند، بنابراین به عنوان حسگر می‌تواند عمل نماید. به طور عکس، ماده پیزوالکتریک می‌تواند در ازای دریافت ولتاژ الکتریکی، تغییر شکل مکانیکی ایجاد کند، لذا می‌توان به عنوان محرک از آن استفاده نمود. به علت وجود همزمان آثار مستقیم و معکوس، مواد پیزوالکتریک می‌توانند به طور همزمان بدون اینکه تغییر قابل ملاحظه‌ای در سفتی و یا وزن سیستم‌ها ایجاد کنند، در سطح آنها چسبیده و با این سیستم‌ها بصورت ترکیبی کار کنند.



شکل ۳ تیر هوشمند با نصب وصله حسگر و عملگر پیزوالکتریک

بنابراین مدل دینامیکی سازه هوشمند را بصورت زیر قابل بازگو می‌باشد.

$$M_{smart}\ddot{y} + C_{smart}\dot{y} + K_{smart}y = f_t \quad (9)$$

که f_t در اینجا به معنی مجموع نیروی خارجی و نیرویی خواهد بود که از سوی عملگر پیزوالکتریک در آن نقطه‌ایی از تیر که قرار می‌گیرد، اعمال می‌شود یعنی

$$f_t = f_e + f_c \quad (10)$$

حال بر اساس روش فضای حالت می‌توان سیستم هوشمند را چنین بیان نمود.

$$\dot{y} = Ay + Bu + Ev \quad (11)$$

$$z = Cy + Du + Fv \quad (12)$$

که در این توصیف u به معنای ورودی خارجی که بصورت تابعی از زمان و بصورت متناوب و غیرمتناوب است، در نظر گرفت و v ورودی است که بصورت ولتاژ از سوی کنترلر به عملگر پیزوالکتریک اعمال می‌شود تا تغییر شکل در المان عملگر اتفاق بیفتد و جلوی ارتعاش سازه را بگیرد و همچنین بدلیل خودتحریک نبودن خود سازه، ماتریس‌های D و F بعنوان یک ماتریس نول یا پوچ مطرح می‌گردد. بنابراین ماتریس‌های موجود در فضای حالت سیستم تیر هوشمند را می‌توان بصورت زیر توصیف نمود.

جدول ۲ مشخصات پیزوالکتریک

پارامتر	مقدار
l_p	طول پیزوالکتریک 0.125m
b_p	پهنا 0.024m
t_p	ضخامت 0.5mm
E_p	مدول یانگ 68GPa
ρ_p	دانسیته 7700kg/m ³
d_{31}	ثابت کرنشی 125×10^{-12} m/V
g_{31}	ثابت تنشی 10.5×10^{-13} Vm/N

۷- ورودی Impulse

در اثر این ورودی در این شبیه‌سازی تنها آن مدل‌هایی که کنترل گردیده‌اند به نمایش گذاشته شده‌است. در این شبیه‌سازی ویژگی‌های الگوریتم بهینه‌سازی را بصورت زیر مدنظر قرار داده شده‌است. ضرایب بکارگرفته شده در شبیه‌سازی براساس مرجع [20] بصورت روابط (۲۴) تا (۲۹) در نظر گرفته شده‌اند.

$$\phi_1 = \phi_2 = 2.05 \quad (24)$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (25)$$

$$\chi = \frac{2}{(\phi - 2 + \sqrt{\phi^2 - 4\phi})} \quad (26)$$

$$w = \chi \quad (27)$$

$$C_1 = \chi\phi_1 \quad (28)$$

$$C_2 = \chi\phi_2 \quad (29)$$

در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه یک سری مشخصات اصلی برای انجام عملیات بهینه‌سازی برخوردار می‌باشد که می‌توان بصورت جدول زیر ارائه نمود.

جدول ۳ مشخصات اصلی الگوریتم بهینه‌ساز

تعداد	مقدار
تکرار عملیات بهینه‌سازی	۱۰
جمعیت ذرات	۱۰۰
مخزن اعضای نخیه	۱۰۰

تمامی عملیات شبیه‌سازی براین اساس شکل گرفته‌است. در این پژوهش هدف کنترل سازه در برابر جابجایی‌های بی مورد بوده سعی گردیده تمامی نمودارها بیانگر جابجایی نوک تیر در برابر ورودی‌های مرتبط نمایش داده شود که دلیل اصلی آن این است که نوک تیر بیشترین جابجایی را دارد و بعنوان نقطه بحرانی در طراحی مدنظر قرار داد چرا که کنترل نقطه‌ای که بیشترین جابجایی را داراست بالطبع هزینه کمتر و طراحی بهینه‌تری را بدنبال خواهد داشت.

که هدف کمینه‌سازی تابع J است که ماتریس‌های Q و R بصورت زیر می‌توان بیان نمود.

$$Q = \begin{bmatrix} \alpha_1[w_1^2] & [0] \\ [0] & \alpha_2[I] \end{bmatrix} \quad R = \gamma[I] \quad (17)$$

که در این مقاله ضرایب $\alpha_1, \alpha_2, \gamma$ را در بازه‌های متفاوت سیستم هوشمند کنترل شده‌است و بصورت نمودارهایی قابل ارائه می‌باشد. بهره کنترلی کنترل LQR نیز بصورت زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$K = R^{-1}E^T P \quad (18)$$

که ماتریس P با استفاده از معادله ریکاتی که بصورت زیر است بدست می‌آید.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (19)$$

حال ورودی u که در معادله فضای حالت بصورت زیر بیان می‌شود.

$$u = -K_{LQR}y \quad (20)$$

و عبارتی ورودی u در معادله ۲۰ را می‌توان بصورت زیر بیان نمود.

$$v(x, t) = -K_{LQR}y(x, t) \quad (21)$$

بنابراین نیروی اعمالی از سوی عملگر در معادله فضای حالت می‌توان بصورت روابط زیر بیان نمود.

$$f_{pzt} = K_{LQR} \left[d_{31}^2 b^2 \bar{z} \bar{z} \left(\int_0^{l_e} N_\theta dx \right) \left(\int_0^{l_e} N_a dx \right) \right] \quad (22)$$

که N_a بعنوان تابع شکل شتاب برای یک المان از تیر در نظر گرفت.

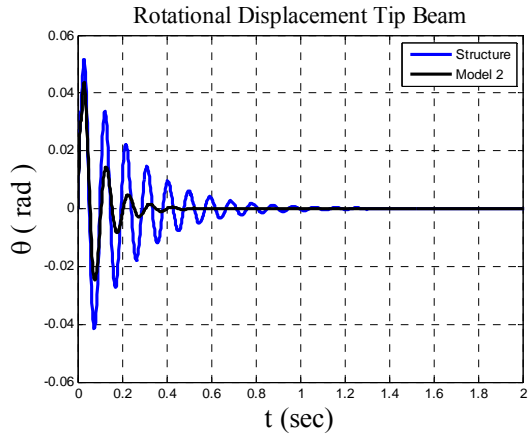
$$N_a = \frac{\partial^2 N_w}{\partial x^2} \quad (23)$$

۶- شبیه‌سازی

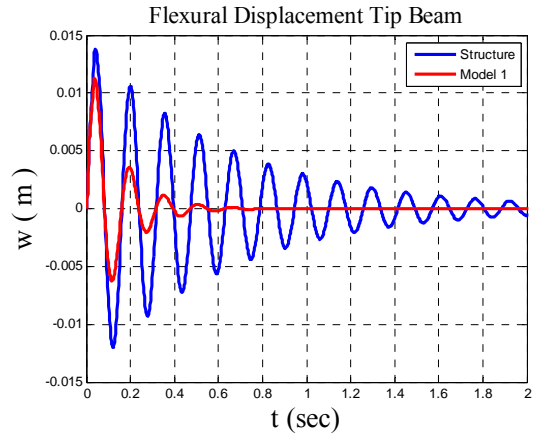
در این بخش ابتدا به معرفی مدل‌های پیشنهادی جهت انجام فرآیند شبیه‌سازی معرفی می‌گردد و سپس براساس نوع ورودی‌های متناوب و غیرمتناوب نتایج خروجی موردنیاز ارائه می‌گردد. خواص مکانیکی و هندسی تیر و حسگر و عملگر پیزوالکتریک که در این مقاله از آنها استفاده شده‌اند بصورت زیر می‌توان اشاره نمود.

جدول ۱ مشخصات تیر شبیه‌سازی شده

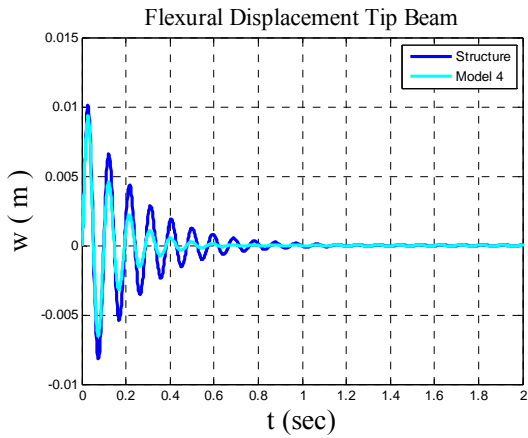
پارامتر	مقدار
L	طول تیر 0.5 m
b	پهنا 0.024 m
E_b	مدول یانگ 193.096 GPa
ρ_b	دانسیته 8030 kg/m ³
α, β	ثوابت دمپینگ 0.001, 0.0001
t_b	ضخامت 1 mm



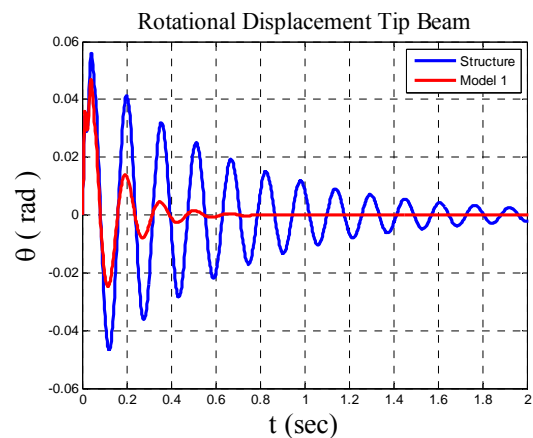
شکل ۷ جابجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۲



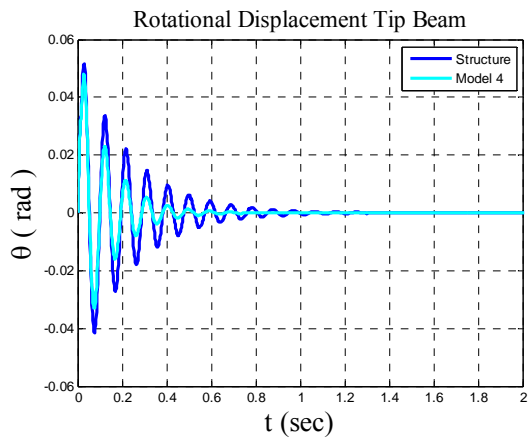
شکل ۴ جابجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۱



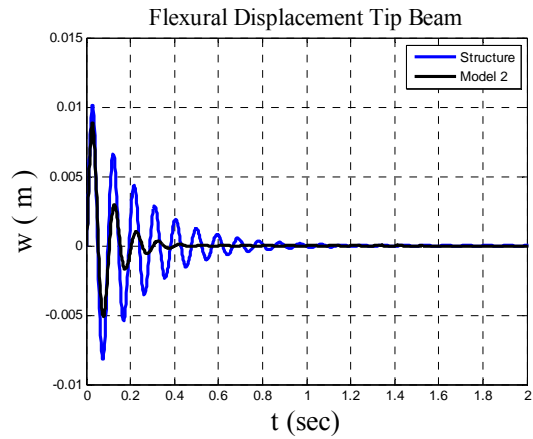
شکل ۸ جابجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۴



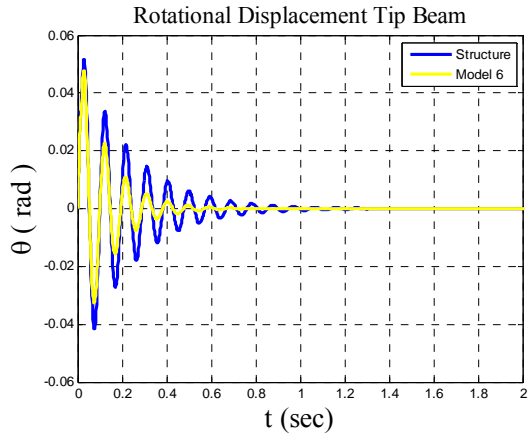
شکل ۵ جابجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۱



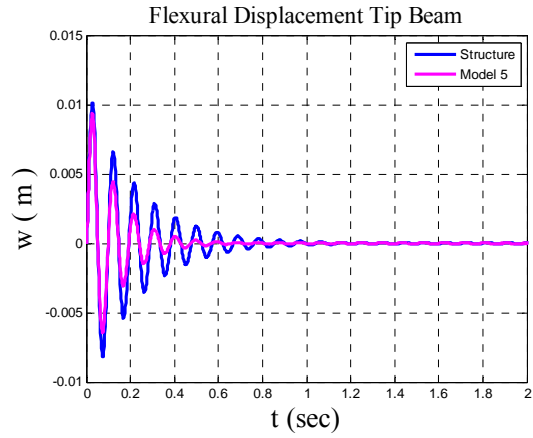
شکل ۹ جابجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۴



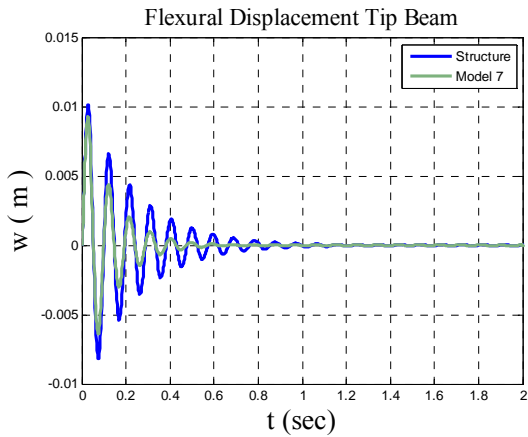
شکل ۶ جابجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۲



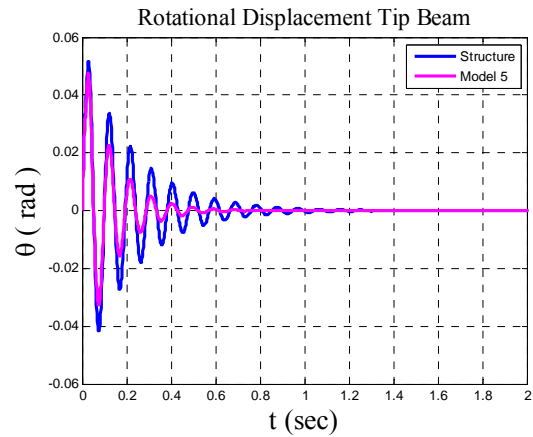
شکل ۱۳ جابجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۶



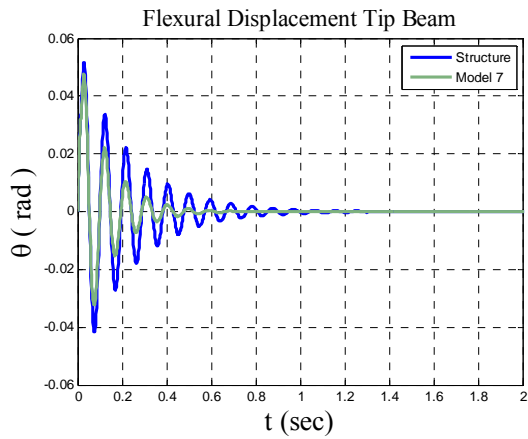
شکل ۱۰ جابجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۵



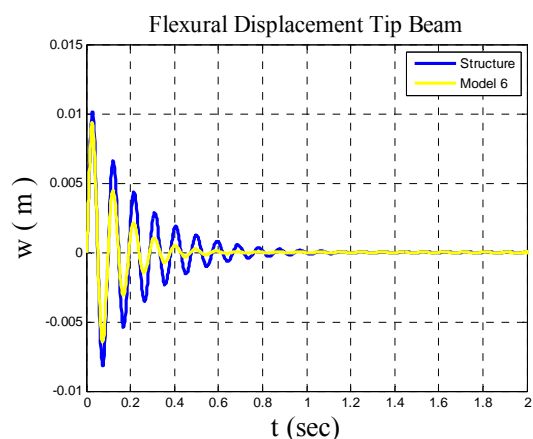
شکل ۱۴ جابجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۷



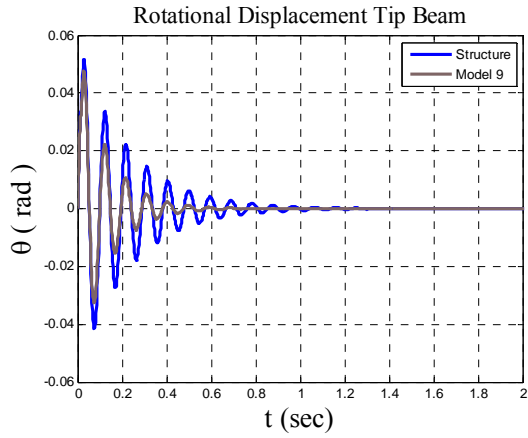
شکل ۱۱ جابجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۵



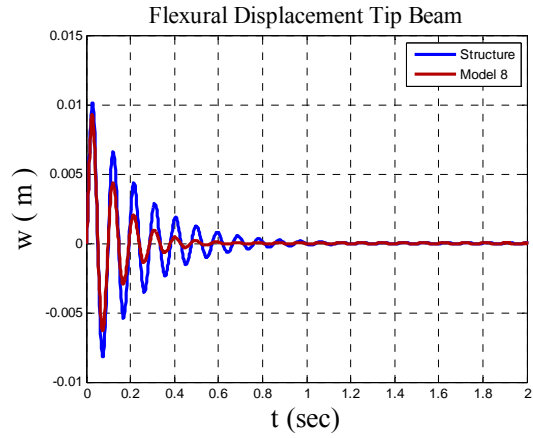
شکل ۱۵ جابجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۷



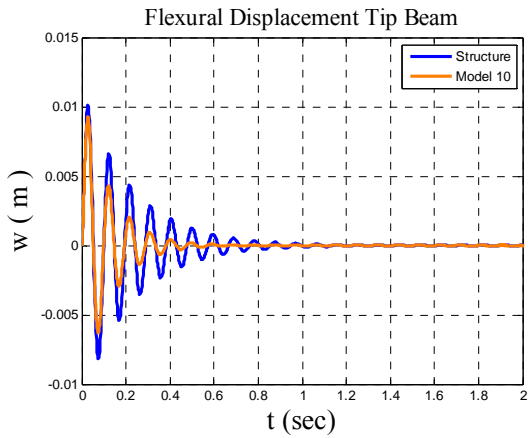
شکل ۱۲ جابجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۶



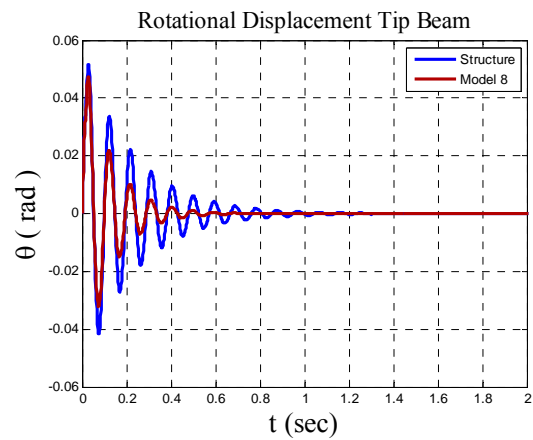
شکل ۱۹ جابجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۹



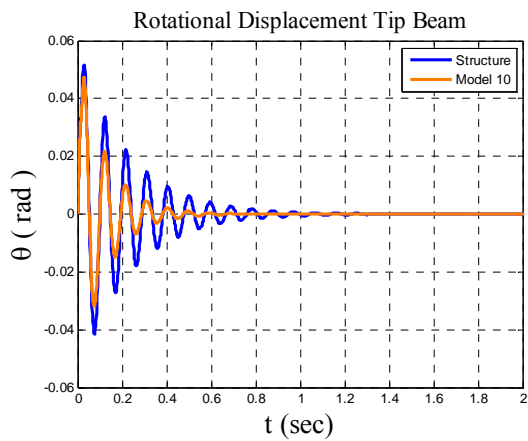
شکل ۱۶ جابجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۸



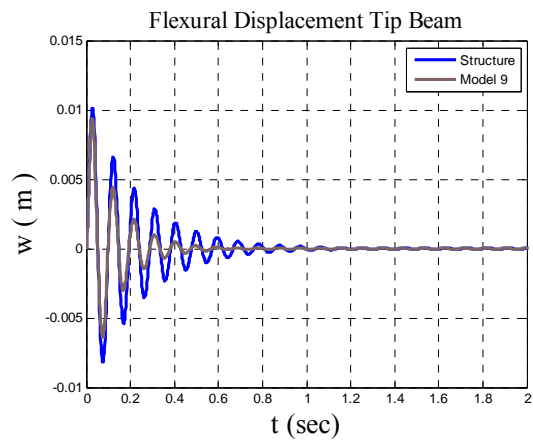
شکل ۲۰ جابجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۱۰



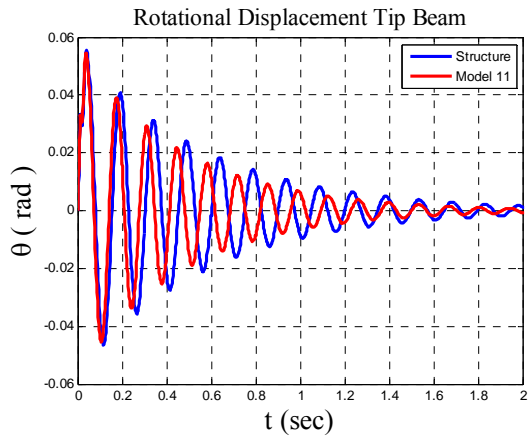
شکل ۱۷ جابجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۸



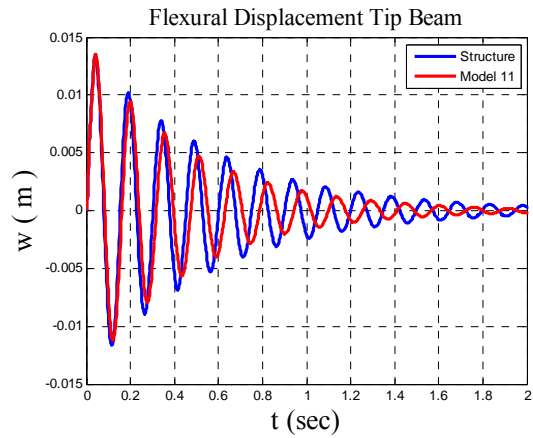
شکل ۲۱ جابجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۱۰



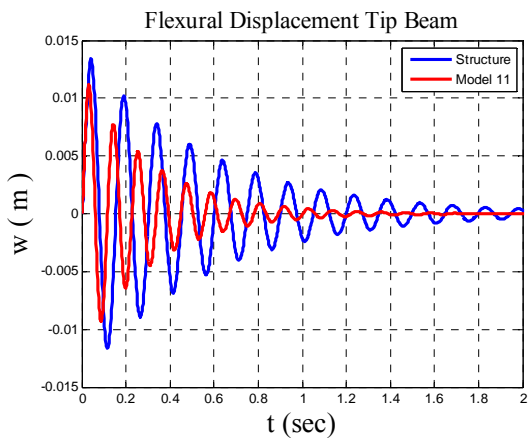
شکل ۱۸ جابجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۹



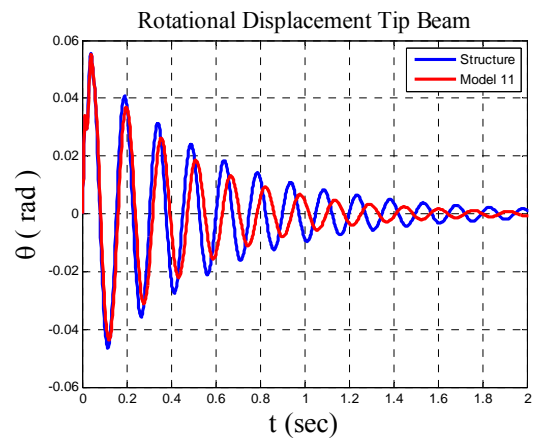
شکل ۲۵ جایجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۱-۱۱



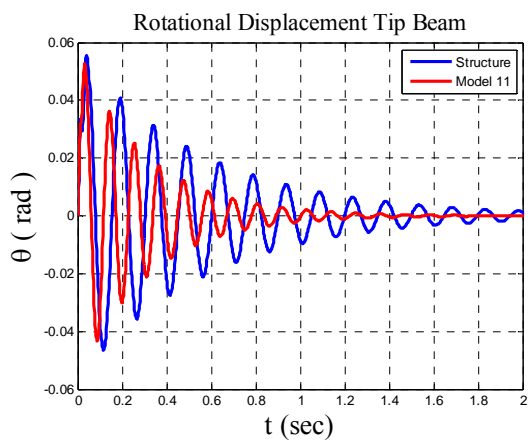
شکل ۲۲ جایجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۱۱



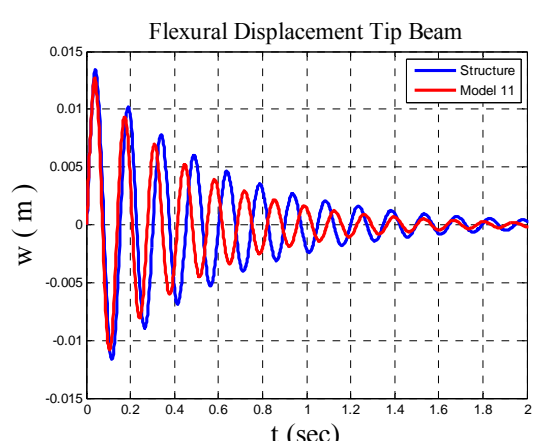
شکل ۲۶ جایجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۲-۱۱



شکل ۲۳ جایجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۱۱



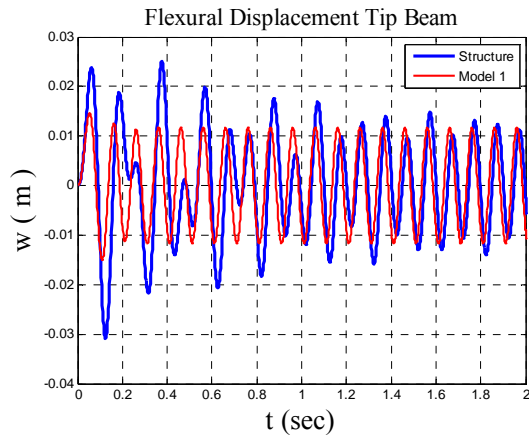
شکل ۲۷ جایجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۲-۱۱



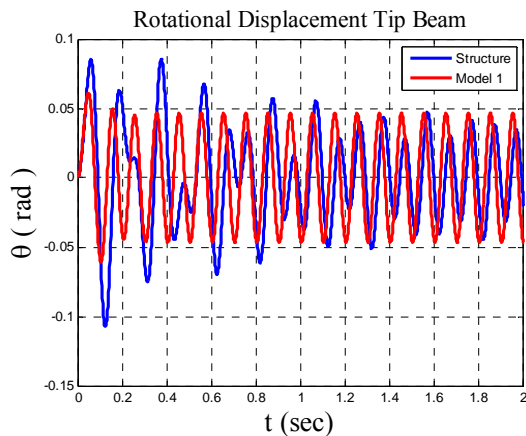
شکل ۲۴ جایجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۱-۱۱

۸- ورودی Sinusoidal

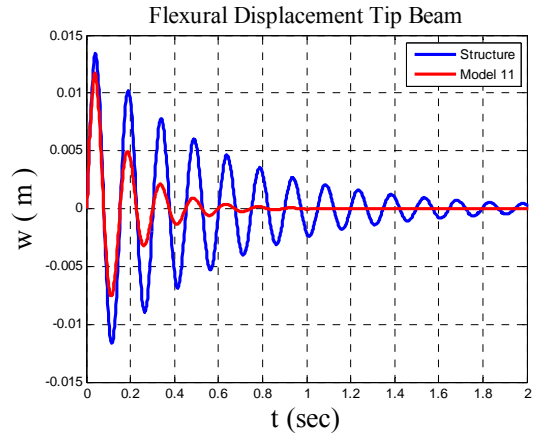
ورودی Sinusoidal بعنوان یک ورودی متناوب می تواند معرف مدلی از بسیاری از اثرات طبیعی بر روی سازه مدنظر قرارگیرد و در اینجا با اعمال یک ورودی Sinusoidal بر نوک سازه با دامنه و فاز مشخص سعی بر کنترل سازه و کاهش ارتعاشات سازه در برابر این نوع اغتشاش شده است.



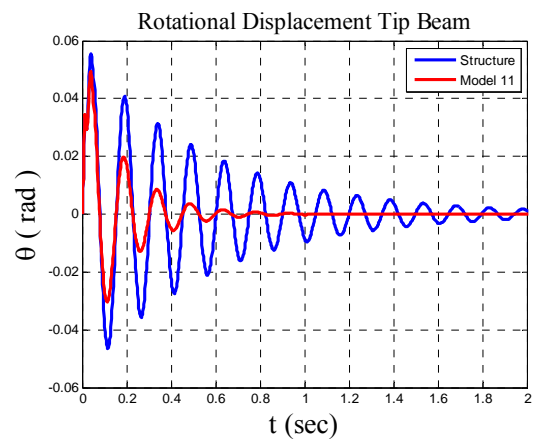
شکل ۲۰ جابجایی عرضی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۱-۱



شکل ۳۱ جابجایی دورانی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۱-۱



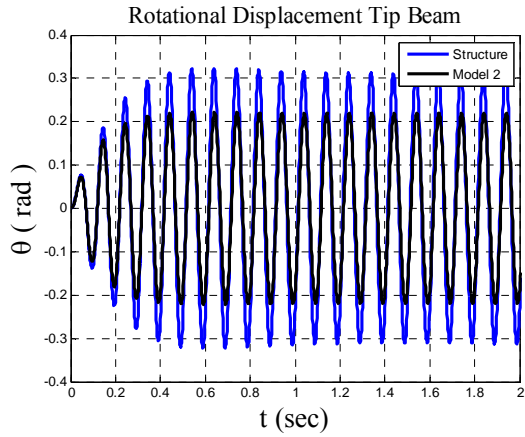
شکل ۲۸ جابجایی عرضی در اثر ورودی پله در مدل ۱۱-۳



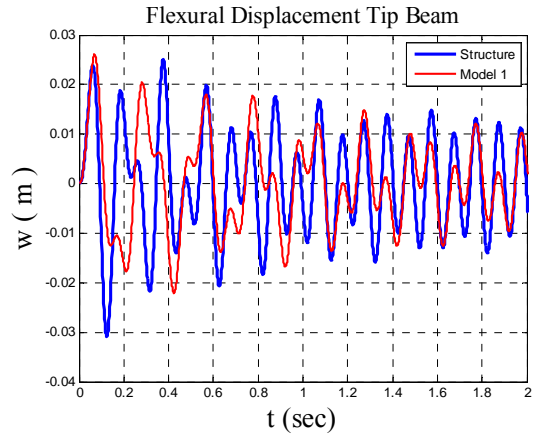
شکل ۲۹ جابجایی دورانی در اثر ورودی پله در مدل ۱۱-۳

جدول ۴ مقادیر استخراج شده در اثر بهینه سازی سیستم کنترلی

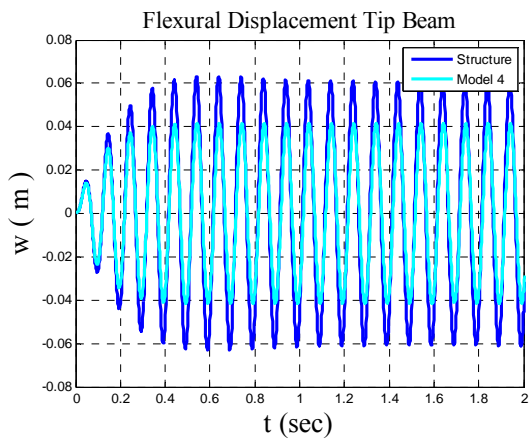
مدل	المان PZT	ضرایب کنترلر LQR			ماکزیمم جابجایی نوک تیر (متر)	زمان میرایی (ثانیه)
		α_1	α_2	γ		
1	13	604.2985	387.5631	0.066536	8.3913e-05	0.26753
2	19	1886.6794	1858.2992	1.0851	8.5823e-05	0.43686
3	20	3537.6097	3412.9491	3.9641	8.5026e-05	0.55356
4	20	4804.689	4158.5758	4.7522	8.1688e-05	0.60359
5	20	5872.0912	5080.8585	5.85	7.7379e-05	0.60451
6	20	6944.5361	6459.3615	6.7905	8.7036e-05	0.55623
7	20	7682.245	7644.0048	7.4967	7.8245e-05	0.55825
8	20	8041.0787	8711.928	8.6436	8.1639e-05	0.60198
9	20	9503.9392	9479.8325	9.1054	8.6024e-05	0.59897
10	13	225.8495	906.3598	1.7505	8.8095e-05	0.87132
11-1	15	483.0587	587.0186	80.2612	8.4592e-05	2.2938
12-2	18	315.5688	203.4529	26.0347	8.5097e-05	1.4828
13-3	14	628.3994	476.5575	0.19584	8.8095e-05	0.87132



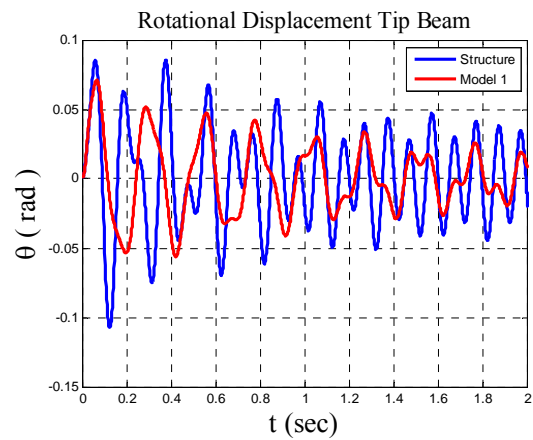
شکل ۳۵ جایجایی دورانی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۲



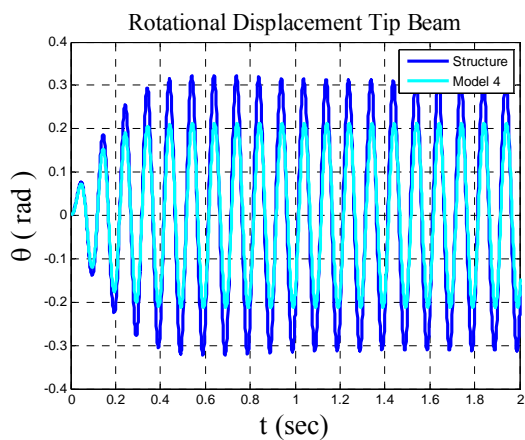
شکل ۳۲ جایجایی عرضی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۱-۲



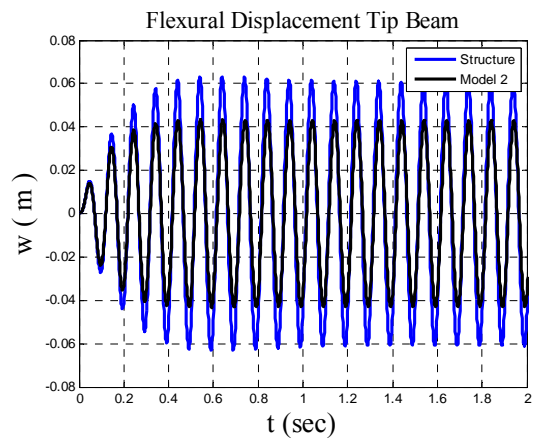
شکل ۳۶ جایجایی عرضی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۴



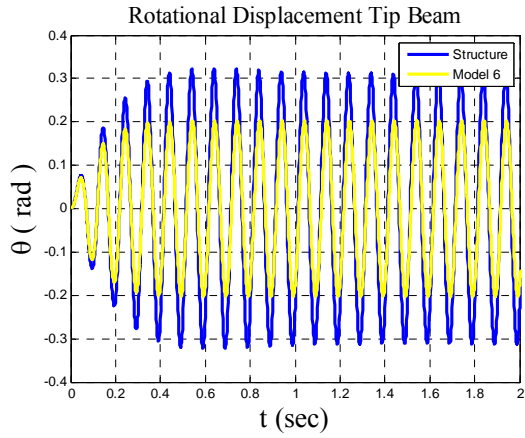
شکل ۳۳ جایجایی دورانی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۱-۲



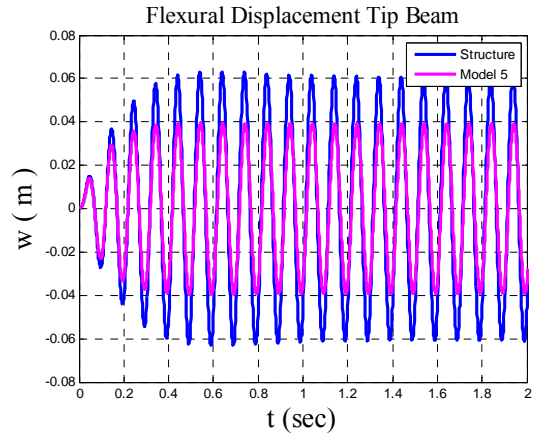
شکل ۳۷ جایجایی دورانی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۴



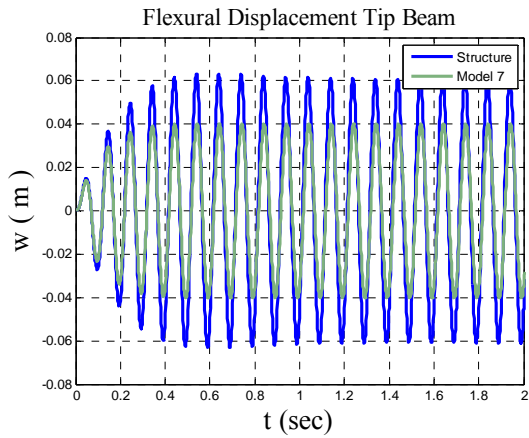
شکل ۳۴ جایجایی عرضی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۲



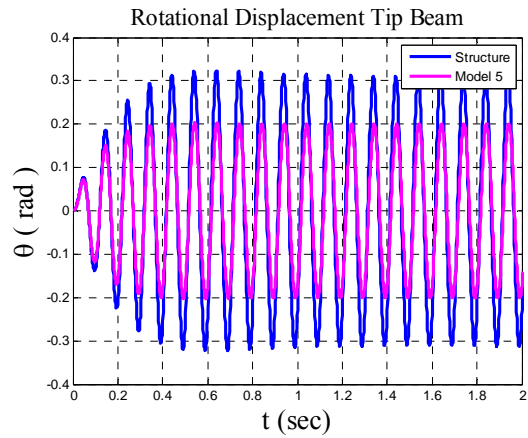
شکل ۳۸ جابجایی عرضی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۶



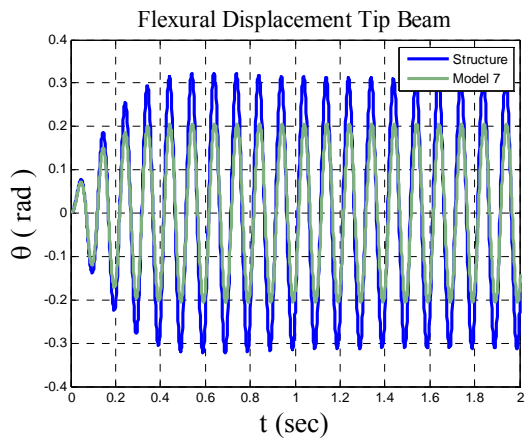
شکل ۳۹ جابجایی دورانی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۵



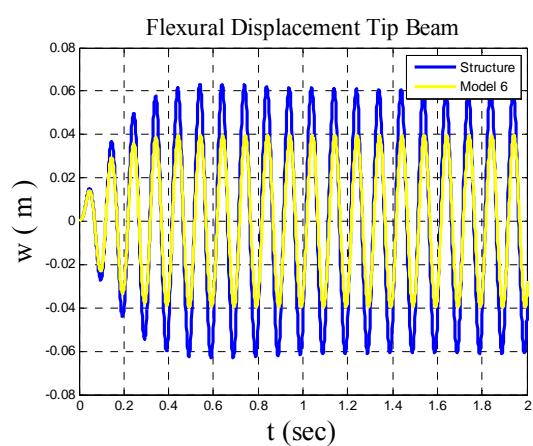
شکل ۴۰ جابجایی دورانی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۷



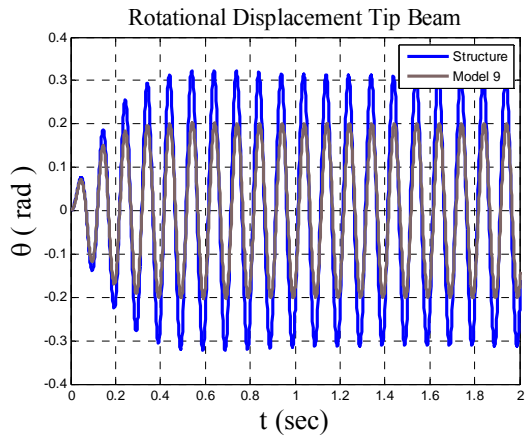
شکل ۴۱ جابجایی دورانی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۵



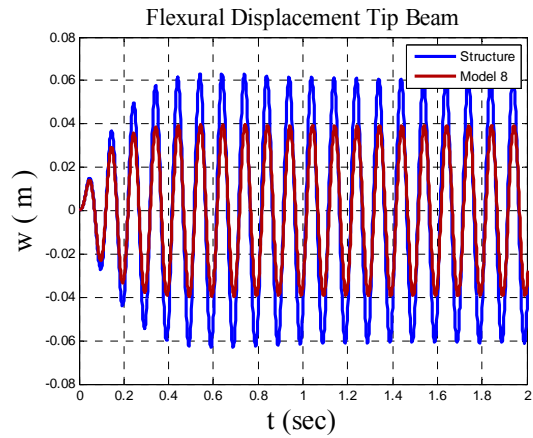
شکل ۴۲ جابجایی عرضی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۷



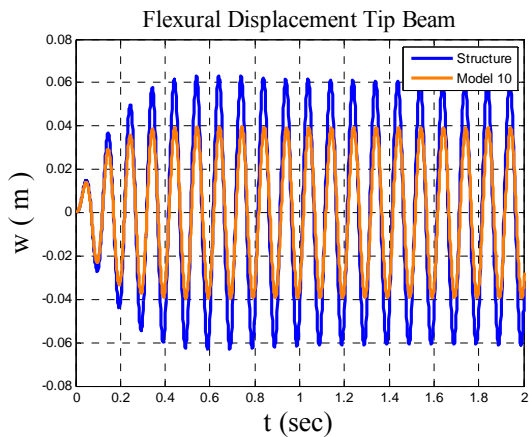
شکل ۴۳ جابجایی عرضی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۶



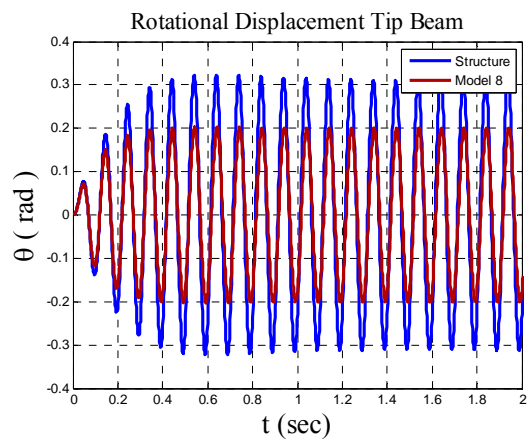
شکل ۴۷ جابجایی دورانی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۹



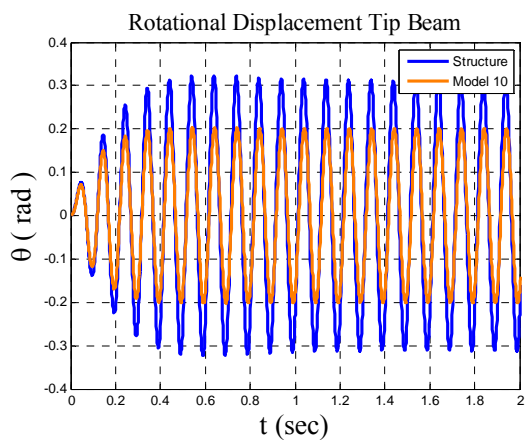
شکل ۴۴ جابجایی عرضی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۸



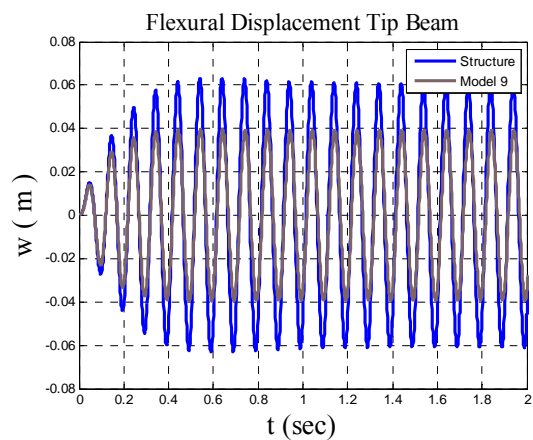
شکل ۴۸ جابجایی عرضی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۱۰



شکل ۴۵ جابجایی دورانی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۸



شکل ۴۹ جابجایی دورانی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۱۰



شکل ۴۶ جابجایی عرضی در اثر ورودی Sinusoidal در مدل ۹

Vibration Control based on GA and Modal LQR, Computers and Structures, 128(2013)101-115.

- [14] D.Chhabra, G.Bhushan, P.Chandra, Optimal Placement of Piezoelectric Actuators on Plate Structures for Active Vibration Control Using Modified Control Matrix and Singular Value Decomposition Approach, International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering, Vol.7, No.3, 2013.
- [15] S.Wrona, M.Pawelczyk, Controllability Oriented Placement of Actuators for Active Noise Vibration Control of Rectangular Plate Using a Memetic Algorithm, Vol.38, No.4, pp.529-526(2013).
- [16] S.Worna, M.Pawelczyk, Application of a Memetic Algorithm to Placement to Placement of Sensors for Active Noise Vibration Control, Mechanic and Control, Vol.32, No.3, 2013.
- [17] T.C.Manjunath, B.Bandyopadhyay, Vibration Control of Timoshenko Smart Structure Using Multirate Output Feedback Based Discrete Sliding Mode Control for SISO Systems, Journal Sound and Vibration, 326-50-74, 2009.
- [18] H.H.Ning, Optimal Number and Placements of Piezoelectric Patch Actuators in Structural Active Vibration Control, Engineering Computations, Vol.21, No.6, pp.601-665, 2004.
- [19] Jae.Hung Han, In.Lee, Optimal Placement of Piezoelectric Sensors and Actuators for Vibration Control of a Composite Plate Using Genetic Algorithms, Smart Material and Structures, 8(1999)257-267.
- [20] M.Clerc, J.Kennedy, The Particle Swarm-Explosion Stability and Convergence in a Multidimensional Complex Space, IEEE Transaction on Evolutionary Computation, Vol.6, No.1, February 2002.2004.

جدول ۵ مقادیر استخراج شده در اثر بهینه سازی سیستم کنترلی

مدل	المان PZT	ضرایب کنترل LQR			ماکزیمم جابجایی نوک تیر (متر)	ولتاژ عملگر (ولت)
		α_1	α_2	γ		
1	12	845.499	63.0386	0.00770	0.02599	98.52
2	6	426.8358	912.0218	0.76403	0.01476	150
3	20	1317.4509	1508.541	1.8627	0.03378	150
4	20	3107.8693	3665.187	3.8269	0.03764	150
5	20	4860.9101	4169.554	4.3074	0.03811	150
6	20	5446.4577	5188.711	5.1301	0.03833	150
7	20	6905.9012	6139.9	6.6891	0.03843	150
8	20	7567.892	7815.328	7.3212	0.03865	150
9	20	8924.5178	8159.666	8.135	0.03904	150
10	20	9451.7392	9609.857	9.0594	0.03928	150

مراجع

- [1] S.T.Quek, S.Y.Wang, K.K.Ang, Vibration Control of Composite Plates via Optimal Placement of Piezoelectric Patches, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.14, 2003.
- [2] H.Y.Gua, L.Zhang, L.L.Zhang, J.X.Zhou, Optimal Placement of Sensors for Structural Health Monitoring Using Improved Genetic Algorithms, Smart Material and Structures.
- [3] A.S.de Oliveira, J.J.L.Junior, Placement Optimization of Piezoelectric Actuators in a Simply Supported Beam Through SVD Analysis and Shape Function Critic Point, 6th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- [4] S.Y.Wang, K.Tai, S.T.Quek, Topology Optimization of Piezoelectric Sensors/Actuators for Torsional Vibration Control of Composite Plates, Smart Materials and Structures, 15(2006)253-269.
- [5] Z.C.Qiu, X.M.Zhang, H.X.Wu, H.H.Zhang, Optimal Placement and Active Vibration Control for Piezoelectric Smart Flexible Cantilever Plate, Journal of Sound and Vibration, 301(2007)521-543.
- [6] T.Roy, D.Chakraborty, GA-LQR Based Optimal Vibration Control of Smart FRP Composite Structures with Bonded PZT Patches, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 28:1383, 2009.
- [7] M.R.Safizadeh, I.Z.mat Darus, M.Mailah, Optimal Placement of Piezoelectric Actuator for Active Vibration Control of Flexible Plate, Faculty of Mechanical Engineering Universiti Teknologi Malaysia (UTM) 81310 Skudai, Johor, Malaysia.
- [8] V.Gupta, M. Sharma, N.Thakur, Optimization Criteria for Optimal Placement of Piezoelectric Sensors and Actuators on a Smart Structure: A Technical Review, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.21, 2010.
- [9] 9-F.Bachmann, A.E.Bergamini, P.Ermanni, Optimum Piezoelectric Patch Positioning: A Strain Energy-Based Finite Element Approach, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 2012 23:1576.
- [10] 10- J.Zhang, L.He, E.Wang, Active Vibration Control of Piezoelectric Intelligent Structures, Journal of Computers, Vol.5, No.3, 2010.
- [11] J.M.Hale, A.H.Daraji, Optimal Placement of Sensors and Actuators for Active Vibration Reduction of A Flexible Structure Using A Genetic Algorithm Based on Modified H_{∞} , Modern Practice in Stress and Vibration Analysis, Journal of Physics, Conference Series 382(2012)012036.
- [12] N.D.Zoric, A.M.Simonovic, Z.S.Mitrovic, S.N.Stuper, Multi-Objective Fuzzy Optimization of Sizing and Location of Piezoelectric Actuators and Sensors, FME Transactions (2012)40, 1-9.
- [13] S.L.Schulz, H.M.Gomes, A.M.Awruch, Optimal Discrete Piezoelectric Patch Allocation on Composite Structures for