

مدلسازی کنترل ارتعاشات تیر کامپوزیتی چند لایه با استفاده از لایه‌های مگنتواستریکتیو

امید رحمانی^{۱*}، رضا بیات^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۳/۱۲	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۰۸	
واژگان کلیدی: کنترل ارتعاشات، مواد مگنتواستریکتیو، تیر کامپوزیتی چند لایه.	امروزه توجه زیادی به کنترل ارتعاشات سازه‌ها با مواد هوشمند می‌شود. این مواد به علت پاسخ سریع در مقابل تحریک، وزن و حجم کم، تبدیل آسان انرژی الکتریکی به مکانیکی و بالعکس و... بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله موارد استفاده این مواد می‌توان به صنایع هوافضا (باله‌های موشک، پره‌های روتور هلیکوپتر، ماهواره‌ها و ...)، صنایع دریایی (حذف نویز و ارتعاشات در زیردریایی‌ها، ...)، وسایل ورزشی، خرپاهای فضایی و ... اشاره کرد. در این مطالعه نحوه کنترل ارتعاشات یک تیر کامپوزیتی با استفاده از لایه‌های هوشمند مگنتواستریکتیو مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور حل معادله‌ی حرکت تیر هوشمند با تکیه‌گاه ساده از روش ناویر استفاده شده و تاثیر ضخامت لایه‌ی مگنتواستریکتیو، فاصله لایه مگنتواستریکتیو، جنس کامپوزیت و چیدمان الیاف در جذب ارتعاشات مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱- مقدمه

امروزه مواد الکترومکانیک و الکترومغناطیسی به طور وسیعی در صنایع گوناگون به عنوان سنسور و محرک مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از ساختارهای لایه ای در این سیستم‌ها مرسوم می‌باشد. خواص ویژه مواد مرکب همچون چگالی کم، استحکام زیاد، سفتی بالا، مقاومت در برابر خوردگی بالا موجب شده است تا توجه تولید کنندگان در صنایع مختلف به این مواد معطوف گردد. کاربرد وسیع سازه‌های مرکب، ضرورت آگاهی یافتن از فنون طراحی و تحلیل این سازه‌ها و ایجاد شرایطی به منظور استفاده بهینه از آنها را افزایش می‌دهد. از جمله پارامترهای مهمی که در طراحی و تحلیل یک سازه باید مد نظر قرار گیرد، کنترل ارتعاشات آن در شرایط کاری است.

در گذشته به منظور کنترل ارتعاشات تنها از سیستم‌های انفعالی مانند جرم - فنر - دمپر استفاده می‌شد. محدودیت‌های زیاد این روش‌ها از جمله دامنه‌ی فرکانسی کم، عدم سازگاری با تغییر ارتعاشات و خواص سازه، استهلاک ارتعاشات به صورت انرژی گرمایی و مهم تر از همه وزن بالای آنها موجب شد محققین و دانشمندان به روش‌های دیگر کنترل ارتعاشات روی بیاورند. در روش‌های جدید کاهش ارتعاشات و صدا از کنترل فعال ارتعاشات استفاده می‌شود. در این روش‌ها سیستم‌های کنترل و مواد هوشمند برای میرایی ارتعاشات به کار برده می‌شوند. به این ترتیب که پاسخ سازه به وسیله حسگر اندازه گیری شده و پس از انجام بررسی‌های لازم توسط کنترلر پیام‌ها به محرک ارسال می‌گردد که در نهایت منجر

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: omid.rahmani@znu.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد

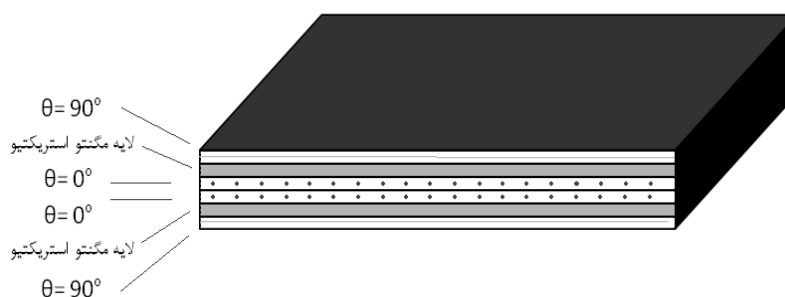
مگنتواستریکتیو را مدلسازی نمودند [۶]. در تمامی مطالعات اخیر، سازه‌های کامپوزیتی بررسی شده دارای چیدمان لایه‌ای متقارن بوده‌اند و در آنها به بررسی اثر ضخامت لایه‌های مگنتواستریکتیو در کنترل ارتعاشات تیر پرداخته نشده است، همچنین اشاره‌ای بر اثر تعداد لایه‌ها در رفتار ارتعاشاتی تیر کامپوزیتی نیز در این مطالعات یافت نمی‌شود. لذا در این مقاله علاوه بر بررسی اثر ضخامت لایه‌های مگنتواستریکتیو، شدت میدان مغناطیسی و محل قرارگیری لایه‌های مگنتواستریکتیو در جذب ارتعاشات تیر کامپوزیتی متقارن، به مطالعه‌ی اثر تعداد لایه‌های تیر و کنترل ارتعاشات سازه‌های کامپوزیتی نامتقارن نیز پرداخته شده است.

۲- مدل تحلیلی تیر مرکب با لایه‌های

مگنتواستریکتیو

یک تیر چند لایه متقارن با n لایه را در نظر بگیرید. فرض کنید دو لایه آن، به ترتیب لایه‌ی m و $n - m + 1$ ، از ماده هوشمند مگنتواستریکتیو تشکیل شده باشند، سایر لایه‌های موجود باقی‌مانده از مواد کامپوزیتی با الیاف از جنس‌های مختلف و جهت‌گیری‌های متفاوت می‌تواند انتخاب شود (شکل ۱).

به استهلاک ارتعاشات می‌شود. برای کنترل ارتعاشات به علوم مختلفی از جمله دینامیک سازه‌ها، کنترل و مهندسی مواد نیاز است [۱ و ۲]. ریزدانه‌های برخی از مواد دارای تعداد زیادی ناحیه‌ی مغناطیسی کوچک می‌باشند که به صورت تصادفی در جهات مختلف چرخیده‌اند و هرگاه این مواد تحت تاثیر میدان الکتریکی یا مغناطیسی قرار بگیرند، این نواحی مغناطیسی کوچک تمایل دارند در راستای میدان تغییر جهت دهند و هم راستا با آن شوند. این چرخش الکتریکی یا مغناطیسی نواحی کوچک، باعث ایجاد کرنش در این مواد خواهد شد. ردی و باربوسا در سال ۲۰۰۰ از دولایه‌ی مگنتواستریکتیو برای کنترل ارتعاشات تیرهای کامپوزیتی استفاده کرده و تاثیر پارامترهای مختلف را در جذب ارتعاشات موجود در تیر مطالعه کردند [۳]. ژو با استفاده از یک مدل غیرخطی به شبیه‌سازی عددی نحوه کنترل یک تیر تقویت شده با لایه‌های مگنتواستریکتیو پرداخت [۴]. لاگ و همکاران به منظور مطالعه رفتار استاتیکی صفحه کامپوزیتی هوشمند با لایه‌های مگنتواستریکتیو و الکترواستریکتیو از تکنیک المان محدود لایه‌ای ترکیبی استفاده نمودند [۵]. همچنین بهاتاچاریا و همکاران با ارائه یک روش ترکیبی کنترل همزمان غیرفعال و فعال سازه با استفاده از آلیاژهای فرومگنتیک و مواد



شکل ۱: نمایش شماتیک سازه کامپوزیتی به همراه لایه‌های مگنتواستریکتیو

۱-۲- معادلات سینماتیکی

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z c_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + z c_1 \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$-z^3 c_3 \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) = \varepsilon_{xx}^{(0)} + z \varepsilon_{xx}^{(1)} + z^3 \varepsilon_{xx}^{(1)} \quad (۶)$$

$$\gamma_{xz} = (1 - c_0) \frac{\partial w_0}{\partial x} + c_1 \phi$$

$$-3z^2 c_3 \left(\phi + \frac{\partial w_0}{\partial x} \right) = \gamma_{xz}^{(0)} + z^2 \gamma_{xz}^{(2)} \quad (۷)$$

که در این رابطه داریم:

$$\varepsilon_{xx}^{(0)} = \frac{\partial u_0}{\partial x} \quad (۸)$$

$$\varepsilon_{xx}^{(1)} = -c_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + c_1 \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (۹)$$

$$\varepsilon_{xx}^{(3)} = -c_3 \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) \quad (۱۰)$$

$$\gamma_{xz}^{(0)} = (1 - c_0) \frac{\partial w_0}{\partial x} + c_1 \phi \quad (۱۱)$$

$$\gamma_{xz}^{(2)} = -3c_3 \left(\phi + \frac{\partial w_0}{\partial x} \right) \quad (۱۲)$$

۲-۲- معادلات حاکم بر تیر

با توجه به قانون هوک برای لایه‌ی k یک تیر چند لایه داریم [۷]:

$$\sigma_{xz}^{(k)} = \overline{Q_{55}^{(k)}} \gamma_{xz}, \quad \sigma_{xx}^{(k)} = \overline{Q_{11}^{(k)}} \varepsilon_{xx} \quad (۱۳)$$

$$Q_{22}^{(k)} = \frac{E_2^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)} \nu_{21}^{(k)}}$$

$$Q_{12}^{(k)} = \frac{\nu_{12}^{(k)} E_2^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)} \nu_{21}^{(k)}}$$

$$Q_{11}^{(k)} = \frac{E_1^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)} \nu_{21}^{(k)}} \quad (۱۴)$$

در حالت کلی برای میدان جابجایی می‌توان نوشت [۷]:

$$u(x, y, z, t) =$$

$$u_0 - z c_0 \frac{\partial w_0}{\partial x} + z c_1 \phi - z^3 c_3 \left(\phi + \frac{\partial w_0}{\partial x} \right) =$$

$$f_1(z) \frac{\partial w_0}{\partial x} + f_2(z) \phi(x, t) \quad (۱)$$

$$v(x, y, z, t) = 0 \quad (۲)$$

$$w(x, y, z, t) = w_0(x, t) \quad (۳)$$

(u, v, w) به ترتیب جابجایی در راستای (x, y, z) .

w_0, u_0 جابه جایی در راستای z برای نقطه ای روی صفحه‌ی میانی ($z=0$)، همچنین $\phi(x, t)$ چرخش یک خط دلخواه عمود بر صفحه‌ی میانی از تیر می باشد. c_0, c_1, c_3 نیز مقادیری ثابت هستند.

در معادله ی (۱) توابع $f_1(x)$ و $f_2(x)$ نیز به صورت زیر تعریف می شوند:

$$f_1(z) = -z c_0 - z^3 c_3 \quad (۴)$$

$$f_2(z) = z c_1 - z^3 c_3 \quad (۵)$$

میدان جابجایی در معادله‌ی (۱) را می‌توان برای هر تئوری با توجه به ضرایب c_0, c_1, c_3 به صورت زیر به دست آورد:

$$c_0 = 1, c_1 = c_3 = 0 \quad \text{تئوری اولیبر-برنولی}$$

$$c_1 = 1, c_0 = c_3 = 0 \quad \text{تئوری تیموشنکو}$$

تئوری ردی

$$c_0 = \frac{4}{3h^2}$$

$$c_1 = 0, c_3 = 0$$

کرنش خطی تیر را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

همچنین $c(t)$ ضریب کنترل می‌باشد.

۲-۴- معادلات حرکت

بنا به اصل همیلتون داریم [۷]

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (U - K - V) dt = 0 \quad (23)$$

که در آن، K انرژی جنبشی، U انرژی کرنشی و V کار انجام شده توسط نیروهای خارجی است.

برای انرژی جنبشی می‌توان نوشت:

$$K = \frac{1}{2} \int \rho (\dot{u}^2 + \dot{w}^2) dV \quad (24)$$

با جاگذاری روابط (۱) و (۳) در معادله (۲۴) خواهیم داشت:

$$K = \frac{1}{2} \int_0^L \int_A \rho \left[f_1 \frac{\partial w_0}{\partial x} + f_2 \phi \right]^2 + w_0^2 dA dx \quad (25)$$

رابطه ی انرژی کرنشی نیز به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$U = \frac{1}{2} \int \sigma \epsilon dV \quad (26)$$

که در آن σ تنش و ϵ کرنش می‌باشد.

روابط (۶) و (۷) در معادله (۲۶) جاگذاری می‌کنیم:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \int_A [\sigma_{xx} (\epsilon_{xx}^{(0)} + z \epsilon_{xx}^{(1)} + z^3 \epsilon_{xx}^{(3)}) + \sigma_{xz} (\gamma_{xz}^{(0)} + z^2 \gamma_{xz}^{(2)})] dA dx \quad (27)$$

برای کار ناشی از نیروهای خارجی نیز می‌توان نوشت:

$$V = \int q w_0 dx \quad (28)$$

q نیروی گسترده خارجی در واحد طول و w_0 جابجایی عرضی تیر در صفحه ی میانی است.

با جاگذاری روابط (۲۵)، (۲۷) و (۲۸) در معادله (۲۳) رابطه ی زیر حاصل می‌شود:

$$Q_{66}^{(k)} = G_{12}^{(k)}, \quad Q_{44}^{(k)} = G_{23}^{(k)} \quad (15)$$

$$Q_{55}^{(k)} = G_{13}^{(k)}$$

$$\overline{Q_{11}^{(k)}} = Q_{11}^{(k)} \cos^4 \theta^{(k)} + Q_{22}^{(k)} \sin^4 \theta^{(k)} \quad (16)$$

$$+ 2(Q_{12}^{(k)} + 2Q_{66}^{(k)}) \sin^2 \theta^{(k)} \cos^2 \theta^{(k)}$$

$$\overline{Q_{55}^{(k)}} = Q_{55}^{(k)} \cos^2 \theta + Q_{44}^{(k)} \sin^2 \theta \quad (17)$$

معادله ی حاکم برای لایه ی مگنتواستریکتیو به صورت زیر تعریف می‌شود [۳].

$$\sigma_{xx}^{(m)} = \frac{1}{S^{(m)}} (\epsilon_{xx} - d^{(m)} H)$$

$$= Q^{(m)} \epsilon_{xx} - e^{(m)} H \quad (18)$$

$$S^{(m)} = \frac{1}{Q^{(m)}} \quad (19)$$

H : میدان مغناطیسی

$S^{(m)}$: ماتریس نرمی لایه مگنتواستریکتیو

$d^{(m)}$: ماتریس کوپلینگ مکانیکی - مغناطیسی

$Q^{(m)}$: مدول الاستیسیته لایه ی مگنتواستریکتیو

$e^{(m)}$: ماتریس حاصل از ضرب $d^{(m)}$ و $Q^{(m)}$

$$(e^{(m)}) = Q^{(m)} d^{(m)}$$

۲-۳- کنترل فیدبک سرعت

با توجه به حلقه ی فیدبک سرعت، شدت میدان مغناطیسی H به صورت زیر تعریف می‌شود [۳].

$$H(x, t) = k_c I(x, t) \quad (20)$$

که در آن $I(x, t)$ جریان الکتریکی سیم پیچی و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$I(x, t) = c(t) \frac{\partial w_0}{\partial t} \quad (21)$$

k_c ثابت سیم پیچی است که با توجه به مشخصات فیزیکی سیم پیچی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$k_c = - \frac{n_c}{\sqrt{b_c^2 + 4r_c^2}} \quad (22)$$

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ M_{xx} \\ P_{xx} \end{Bmatrix} = \int_A \begin{Bmatrix} 1 \\ z \\ z^3 \end{Bmatrix} \sigma_{xx} dz$$

$$= \begin{Bmatrix} A_{11}\varepsilon_{xx}^{(0)} + B_{11}\varepsilon_{xx}^{(1)} + E_{11}\varepsilon_{xx}^{(3)} \\ B_{11}\varepsilon_{xx}^{(0)} + D_{11}\varepsilon_{xx}^{(1)} + F_{11}\varepsilon_{xx}^{(3)} \\ E_{11}\varepsilon_{xx}^{(0)} + F_{11}\varepsilon_{xx}^{(1)} + H_{11}\varepsilon_{xx}^{(3)} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \eta \\ \beta \\ \kappa \end{Bmatrix} \frac{\partial w_0}{\partial t} \quad (33)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_x \\ R_x \end{Bmatrix} = \int_A \begin{Bmatrix} 1 \\ z^2 \end{Bmatrix} \sigma_{xz} dz$$

$$= \begin{Bmatrix} A_{55}\gamma_{xz}^{(0)} + D_{55}\gamma_{xz}^{(2)} \\ D_{55}\gamma_{xz}^{(0)} + F_{55}\gamma_{xz}^{(2)} \end{Bmatrix} \quad (34)$$

برای ضرایب معرفی شده در معادلات (۳۳) و (۳۴) روابط زیر برقرار است.

$$\begin{Bmatrix} B_{11} \\ D_{11} \\ F_{11} \\ E_{11} \\ H_{11} \end{Bmatrix} = \int_A \overline{Q_{11}^{(k)}} \begin{Bmatrix} z \\ z^2 \\ z^4 \\ z^3 \\ z^6 \end{Bmatrix} dz$$

$$\begin{Bmatrix} A_{55} \\ D_{55} \\ F_{55} \end{Bmatrix} = \int_A \overline{Q_{55}^{(k)}} \begin{Bmatrix} 1 \\ z^2 \\ z^4 \end{Bmatrix} dz$$

$$\begin{Bmatrix} \eta \\ \beta \\ \kappa \end{Bmatrix} = k_c c(t) \int_A \overline{Q_{11}^{(m)}} d^{(m)} \begin{Bmatrix} 1 \\ z \\ z^3 \end{Bmatrix} dz \quad (35)$$

همچنین K_1, K_2, K_3 اینرسی‌های جرمی بوده، به شکل

زیر محاسبه می‌گردند [۷].

$$\begin{Bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{Bmatrix} = \int_A \begin{Bmatrix} f_1^2 \\ f_2^2 \\ f_1 f_2 \end{Bmatrix} dz$$

$$= \begin{Bmatrix} (c_0)^2 I_2 + 2c_3 c_0 I_4 + (c_3)^2 I_6 \\ (c_1)^2 I_2 - 2c_3 c_1 I_4 + (c_3)^2 I_6 \\ -2c_0 c_1 I_2 + (c_0 - c_1) c_3 I_4 + (c_3)^2 I_6 \end{Bmatrix} \quad (36)$$

$$\int_0^T \int_0^L \int_A [\sigma_{xx} (\delta\varepsilon_{xx}^{(0)} + z \delta\varepsilon_{xx}^{(1)} + z^3 \delta\varepsilon_{xx}^{(3)}) + \sigma_{xz} (\delta\gamma_{xz}^{(0)} + z^2 \delta\gamma_{xz}^{(2)})] dA dx dt$$

$$- \int_0^T \int_0^L \int_A \rho [f_1 \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} + f_2 \dot{\phi}] (f_1 \frac{\partial \delta w_0}{\partial x} + f_2 \delta \dot{\phi}) + \dot{w}_0 \delta \dot{w}_0] dA dx dt$$

$$- \int_0^T \int_0^L q \delta w_0 dx dt + \int_0^T \int_0^L F_{load} \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial \delta w_0}{\partial x} dx dt = 0 \quad (29)$$

معادله ی (۲۹) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\int_0^T \int_0^L (M_{xx} \delta\varepsilon_{xx}^{(1)} + P_{xx} \delta\varepsilon_{xx}^{(3)} + Q_x \delta\gamma_{xz}^{(0)}) + N_{xx} \delta\varepsilon_{xx}^{(0)} + R_x \delta\gamma_{xz}^{(2)} - q \delta w_0 + F_{load} \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial \delta w_0}{\partial x} dx dt$$

$$- \int_0^T \int_0^L [(K_1 \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} + K_3 \dot{\phi}) \frac{\partial \delta \dot{w}_0}{\partial x} + (K_3 \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} + K_2 \dot{\phi}) \delta \dot{\phi} + I_0 \dot{w}_0 \delta \dot{w}_0] dx dt$$

$$= \int_0^T \int_0^L [(-\frac{\partial \bar{M}_{xx}}{\partial x} + \bar{Q}_x + K_2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + K_3 \frac{\partial^3 w_0}{\partial t^2 \partial x}) \delta \phi - (-\frac{\partial^2 \bar{M}_{xx}}{\partial x^2} + \frac{\partial \bar{Q}_x}{\partial x} + q + K_3 \frac{\partial^3 \phi}{\partial t^2 \partial x} + K_1 \frac{\partial^4 w_0}{\partial t^2 \partial x^2} - I_0 \frac{\partial^2 \dot{w}_0}{\partial t^2} + F_{load} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}) \delta w_0 - \frac{\partial N_{xx}}{\partial x} \delta u_0] dx dt$$

$$+ \int_0^T [\bar{M}_{xx} \delta \phi + \bar{M}_{xx} \frac{\partial \delta w_0}{\partial x} + (-\frac{\partial \bar{M}_{xx}}{\partial x} + \bar{Q}_x + K_1 \frac{\partial^3 w_0}{\partial t^2 \partial x} + K_3 \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + F_{load} \frac{\partial w_0}{\partial x}) \delta w_0 + N_{xx} \delta u_0]_0^L dt = 0 \quad (30)$$

علایم استفاده شده در معادله ی (۳۰) به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\bar{M}_{xx} = c_1 M_{xx} - c_3 P_{xx} \quad (31)$$

$$M_{xx} = -c_0 M_{xx} - c_3 P_{xx}$$

$$\bar{Q}_x = c_1 Q_x - 3c_3 R_x \quad (32)$$

$$Q_x = (1 - c_0) Q_x - 3c_3 R_x$$

در روابط فوق $Q_x, R_x, P_{xx}, M_{xx}, N_{xx}$ منتجه های

تنش می باشند که به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\frac{\partial^2 \tilde{M}_{xx}}{\partial x^2} - \frac{\partial \tilde{Q}_x}{\partial x} - q - K_3 \frac{\partial^3 \phi}{\partial t^2 \partial x} - K_1 \frac{\partial^4 w_0}{\partial t^2 \partial x^2} + I_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} - F_{load} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = 0 \quad (39)$$

$$\begin{Bmatrix} I_2 \\ I_4 \\ I_6 \end{Bmatrix} = \int_A \rho \begin{Bmatrix} z^2 \\ z^4 \\ z^6 \end{Bmatrix} dz \quad (37)$$

برای صفر شدن معادله ی (۳۰) باید روابط زیر برقرار باشد.

$$\frac{\partial N_{xx}}{\partial x} = 0 \quad (40)$$

$$-\frac{\partial \overline{M}_{xx}}{\partial x} + \overline{Q}_x + K_2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + K_3 \frac{\partial^3 w_0}{\partial t^2 \partial x} = 0 \quad (38)$$

در ادامه ابتدا معادلات حرکت (۳۸) و (۳۹) را با استفاده از

تعریف M_{xx} ، P_{xx} ، R_x و Q_x (معادلات (۳۳) و (۳۴)) به صورت تابعی از (w_0, ϕ) می‌نویسیم:

$$\begin{aligned} & -c_1 D_{11} \left(-c_0 \frac{\partial^3 w_0}{\partial^3 x} + c_1 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) + c_1 c_3 F_{11} \left(\frac{\partial^3 w_0}{\partial^3 x} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) + c_3 F_{11} \left(-c_0 \frac{\partial^3 w_0}{\partial^3 x} + c_1 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) \\ & - (c_3)^2 H_{11} \left(\frac{\partial^3 w_0}{\partial^3 x} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) + c_1 A_{55} \left[(1 - c_0) \frac{\partial w_0}{\partial x} + c_1 \phi \right] - 3c_1 c_3 D_{55} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi \right) \\ & - 3c_3 D_{55} \left[(1 - c_0) \frac{\partial w_0}{\partial x} + c_1 \phi \right] + 9(c_3)^2 F_{55} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi \right) + (c_1 \beta - c_3 \kappa) \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial t} \\ & + [(c_1)^2 I_2 - 2c_1 c_3 I_4 + (c_3)^2 I_6] \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + [-2c_1 c_0 I_2 + (c_0 - c_1) c_3 I_4 + (c_3)^2 I_6] \frac{\partial^3 w_0}{\partial t^2 \partial x} \\ & + (c_3 E_{11} - c_1 B_{11}) \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} = 0 \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} & c_0 D_{11} \left(c_0 \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} - c_1 \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \right) + c_0 c_3 F_{11} \left(\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} + \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \right) + c_3 F_{11} \left(c_0 \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} - c_1 \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \right) \\ & + (c_3)^2 H_{11} \left(\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} + \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \right) - (1 - c_0) A_{55} \left[(1 - c_0) \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + c_1 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] \\ & + 3(1 - c_0) c_3 D_{55} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + 3c_3 D_{55} \left[(1 - c_0) \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + c_1 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] - 9(c_3)^2 F_{55} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \\ & - q + (c_0 \beta + c_3 \kappa) \frac{\partial^3 w_0}{\partial t \partial x^2} + [2c_0 c_1 I_2 - (c_0 - c_1) c_3 I_4 - (c_3)^2 I_6] \frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial t^2} \\ & - [(c_0)^2 I_2 + 2c_0 c_3 I_4 + (c_3)^2 I_6] \frac{\partial^4 w_0}{\partial t^2 \partial x^2} + I_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} \\ & - F_{load} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - (c_0 B_{11} + c_3 E_{11}) \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

$$\phi(x, t) = X(t) \cos \frac{n\pi x}{a} \quad (44)$$

که در آن a طول تیر برحسب متر، x فاصله ی نقطه ی دلخواه روی تیر از مبدا مختصات، n شماره ی مد ارتعاشی تیر، t زمان بر حسب ثانیه و $W(t)$ دامنه ی ارتعاشات تیر است. با جایگذاری معادله ی (۴۳) و (۴۴) در معادلات (۴۱) و (۴۲) خواهیم داشت :

$$\begin{bmatrix} S_{22} & S_{23} \\ S_{23} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W \\ X \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{22} & M_{23} \\ M_{23} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{W} \\ \ddot{X} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{22} & C_{23} \\ C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{W} \\ \dot{X} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -Q_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (45)$$

که در این معادله، عبارات $M_{ij} = M_{ji}$ و $S_{ij} = S_{ji}$ به صورت زیر تعریف می شود :

$$\begin{aligned} S_{22} &= [(c_0)^2 D_{11} + 2c_0 c_3 F_{11} + (c_3)^2 H_{11}] \left(\frac{n\pi}{a}\right)^4 + [(1-c_0)^2 A_{55} - 6(1-c_0)c_3 D_{55} \\ &+ 9(c_3)^2 F_{55} + F_{load}] \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 \\ S_{23} &= [-c_0 c_3 D_{11} + c_0 c_3 F_{11} - c_1 c_3 F_{11} + (c_3)^2 H_{11}] \left(\frac{n\pi}{a}\right)^3 + [(1-c_0)c_1 A_{55} + 9(c_3)^2 F_{55} \\ &- 3(1-c_0 + c_1)c_3 D_{55}] \left(\frac{n\pi}{a}\right) \\ S_{33} &= [(c_1)^2 D_{11} - 2c_1 c_3 F_{11} + (c_3)^3 H_{11}] \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + (c_1)^2 A_{55} - 6c_1 c_3 D_{55} + 9(c_3)^2 F_{55} \\ M_{22} &= [(c_0)^2 I_2 + 2c_0 c_3 I_4 + (c_3)^2 I_6] \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + I_0 \\ M_{23} &= [-2c_0 c_1 I_2 + (c_0 - c_1)c_3 I_4 + (c_3)^2 I_6] \left(\frac{n\pi}{a}\right) \\ M_{33} &= c_1^2 I_2 - 2c_1 c_3 I_4 + (c_3)^2 I_6 \\ C_{22} &= -(c_0 \beta + c_3 \kappa) \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2, \quad C_{23} = 0, \quad C_{32} = (c_1 \beta - c_3 \kappa) \left(\frac{n\pi}{a}\right), \quad C_{33} = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

معادلات (۴۱) و (۴۲) را با کمک ضرایب c_0, c_1, c_3 می توان برای هر سه تئوری اویلر- برنولی، تیموشینکو و ردی بازنویسی کرد [۷]. هرگاه چیدمان و جنس لایه های لمینیت در دو طرف لایه ی میانی متقارن باشند در اینصورت با توجه به روابط B_{11} و E_{11} در معادله ی (۳۵) مقادیر این ضرایب صفر می شود. بنابراین می توان معادلات (۴۱) و (۴۲) را به کمک روش ناویر حل کرد. روش حل ناویر برای حالت نامتقارن زاویه ای تیر کامپوزیتی نیز قابل استفاده است. زیرا در این حالت نیز ضرایب B_{11} و E_{11} برابر صفر خواهد شد. اما برای حالتی که لمینیت نامتقارن باشد، دیگر نمی توان از روش حل دقیق ناویر استفاده کرد و در اینصورت بایستی با کمک روش المان محدود به حل عددی مساله پرداخت. برای حل دقیق مساله، ابتدا جواب معادله ی دیفرانسیل به صورت زیر فرض می شود.

$$w_0(x, t) = W(t) \sin \frac{n\pi x}{a} \quad (43)$$

$$M_{23} = [-c_3 I_4 + (c_3)^2 I_6] \left(\frac{n\pi}{a}\right)$$

$$M_{33} = I_2 - 2c_3 I_4 + (c_3)^2 I_6$$

$$C_{22} = -c_3 \kappa \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2, C_{33} = 0, C_{23} = 0$$

$$C_{32} = (\beta - c_3 \kappa) \left(\frac{n\pi}{a}\right) \quad (49)$$

برای بررسی ارتعاشات آزاد سیستم، $q = 0$ بوده و جواب معادله‌ی دیفرانسیل (۴۵) به صورت زیر فرض می‌شود.

$$W(t) = W_0 e^{\lambda t} \quad (50)$$

$$X(t) = X_0 e^{\lambda t} \quad (51)$$

با جاگذاری معادلات (۵۰) و (۵۱) در رابطه‌ی (۴۵) معادله‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} S_{22} & S_{23} \\ S_{23} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_0 \\ X_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{22} & M_{23} \\ M_{23} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_0 \lambda^2 \\ X_0 \lambda^2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{22} & C_{23} \\ C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_0 \lambda \\ X_0 \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (52)$$

معادله‌ی (۵۲) را به صورت زیر ساده می‌کنیم

$$\begin{bmatrix} S_{22} + M_{22} \lambda^2 + C_{22} \lambda & S_{23} + M_{23} \lambda^2 + C_{23} \lambda \\ S_{23} + M_{23} \lambda^2 + C_{23} \lambda & S_{33} + M_{33} \lambda^2 + C_{33} \lambda \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_0 \\ X_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (53)$$

برای به دست آوردن جواب‌های غیر بدیهی باید دترمینان ضرایب صفر شود، لذا:

- تئوری اویلر برنولی

$$\overline{S_{22}} = 0 \quad (54)$$

- تئوری تیموشینکو و ردی

$$\begin{bmatrix} \overline{S_{22}} & \overline{S_{23}} \\ \overline{S_{32}} & \overline{S_{33}} \end{bmatrix} = 0 \quad (55)$$

که در معادلات (۵۴) و (۵۵) داریم:

همچنان که ذکر گردید، برای تئوری‌های مختلف با توجه به مقادیر ثابت C_0, C_1, C_3 داریم:

- تئوری اویلر برنولی:

$$S_{22} = D_{11} \left(\frac{n\pi}{a}\right)^4,$$

$$M_{22} = I_2 \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + I_0,$$

$$C_{22} = -\beta \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 \quad (47)$$

- تئوری تیموشینکو:

$$S_{22} = A_{55} \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2, S_{23} = A_{55} \left(\frac{n\pi}{a}\right),$$

$$S_{33} = D_{11} \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + A_{55}$$

$$M_{22} = I_0, M_{23} = 0, M_{33} = I_2$$

$$C_{22} = 0, C_{23} = 0,$$

$$C_{32} = \beta \left(\frac{n\pi}{a}\right), C_{33} = 0 \quad (48)$$

- تئوری ردی:

$$S_{22} = (c_3)^2 H_{11} \left(\frac{n\pi}{a}\right)^4$$

$$+ [A_{55} - 6c_3 D_{55} + 9(c_3)^2 F_{55}] \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2$$

$$S_{22} = (c_3)^2 H_{11} \left(\frac{n\pi}{a}\right)^4$$

$$+ [A_{55} - 6c_3 D_{55} + 9(c_3)^2 F_{55}] \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2$$

$$S_{23} = [-c_3 F_{11} + (c_3)^2 H_{11}] \left(\frac{n\pi}{a}\right)^3$$

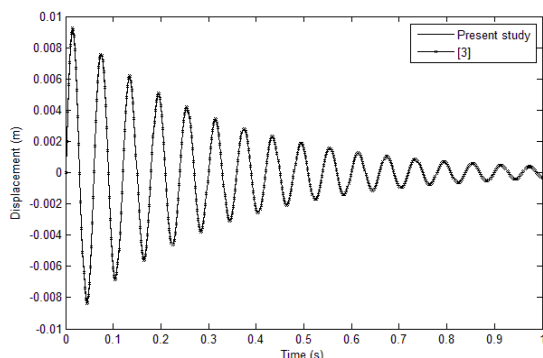
$$+ [A_{55} - 6c_3 D_{55} + 9(c_3)^2 F_{55}] \left(\frac{n\pi}{a}\right)$$

$$S_{33} = [D_{11} - 2c_3 F_{11} + (c_3)^3 H_{11}] \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2$$

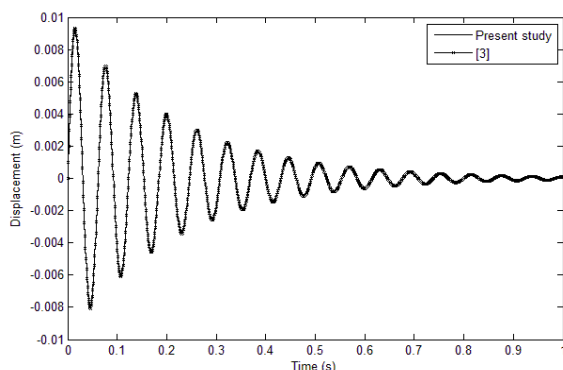
$$+ A_{55} - 6c_3 D_{55} + 9(c_3)^2 F_{55}$$

$$M_{22} = (c_3)^2 I_6 \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + I_0$$

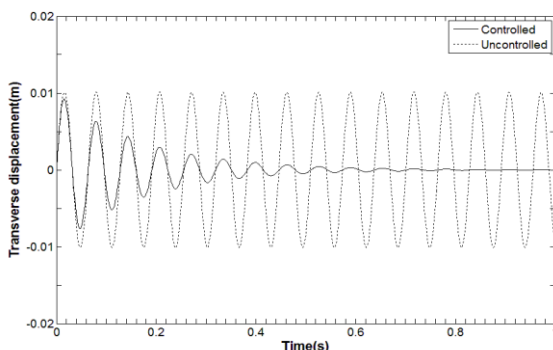
مقایسه می کند. شکل ۴ رفتار ارتعاشاتی تیر [m/۴۵/-/۹۰/s] CFRP را در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده نشان می دهد (در شکل های ۲ تا ۴ ضخامت هر لایه ۱ میلیمتر در نظر گرفته شده است).



شکل ۲: مقایسه ی نتایج حاصل برای تیر [۴۵/۰/۹۰/m]s از جنس CFRP با مرجع [۳]



شکل ۳: مقایسه ی نتایج حاصل برای تیر [۴۵/m/-/۹۰/s] از جنس CFRP با مرجع [۳]



شکل ۴: رفتار تیر [m/۴۵/-/۹۰/s] از جنس CFRP در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده

$$\begin{aligned} \overline{S_{22}} &= S_{22} + \lambda C_{22} + \lambda^2 M_{22} \quad , \\ \overline{S_{23}} &= S_{23} + \lambda C_{23} + \lambda^2 M_{23} \\ \overline{S_{32}} &= S_{23} + \lambda C_{32} + \lambda^2 M_{23} \\ \overline{S_{33}} &= S_{33} + \lambda C_{33} + \lambda^2 M_{33} \end{aligned} \quad (56)$$

از معادله ی (۵۶) دو مقدار برای λ به دست می آید که می توان آنها را به صورت $\lambda = -\alpha \pm iw_d$ نوشت که در آن α ضریب میرایی و w_d فرکانس میرایی است. با در نظر گرفتن کمترین مقدار برای w_d می توان نوشت :

$$w_0(x, t) = \frac{1}{w_d} e^{-\alpha t} \sin w_d t \sin \frac{n\pi x}{a} \quad (57)$$

به منظور استخراج معادله ی (۵۷) از شرایط اولیه ی زیر استفاده شده است [۳].

$$\begin{aligned} \dot{w}(x, 0) &= 1, w_0(x, 0) = 0, \\ \dot{\phi}(x, 0) &= 0, \phi(x, 0) = 0 \end{aligned} \quad (58)$$

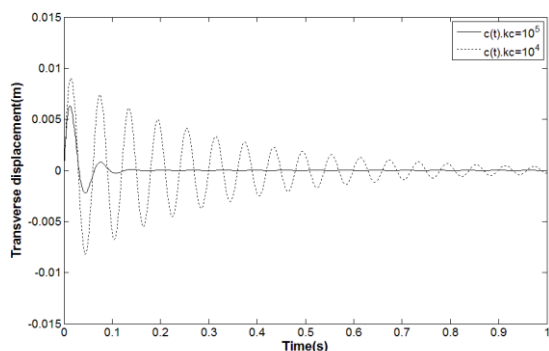
۳- نتایج و بحث

در این مطالعه از یک تیر لمینیت با دو تکیه گاه ساده به طول یک متر استفاده شده است. هدف جذب ارتعاشات این تیر است. برای این منظور ابتدا ارتعاشات تیر بدون در نظر گرفتن بار محوری بررسی شده است، سپس یک بار محوری ثابت در راستای طولی تیر در نظر گرفته شده و اثر آن در رفتار ارتعاشی تیر مورد بررسی قرار گرفته است.

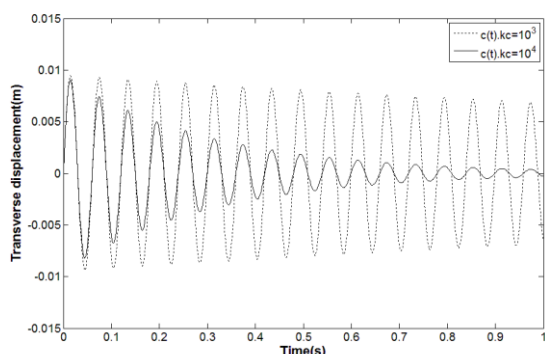
۳-۱- بررسی ارتعاشات تیر بدون اعمال بار محوری

شکل های ۲ و ۳ به ترتیب حالت کنترل شده ی تیرهای کامپوزیتی [۴۵/۰/۹۰/m]s و [۴۵/m/-/۹۰/s] CFRP را با نتایج حاصل از مرجع [۳]

تأثیرات این تغییرات در کنترل ارتعاشات تیر مورد بررسی گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است (ضخامت تمام لایه ها ۱ میلی‌متر می‌باشد).



شکل ۶: تأثیر شدت میدان مغناطیسی در کنترل ارتعاشات تیر s [۴۵/-۴۵/m/۰/۹۰] از جنس CFRP

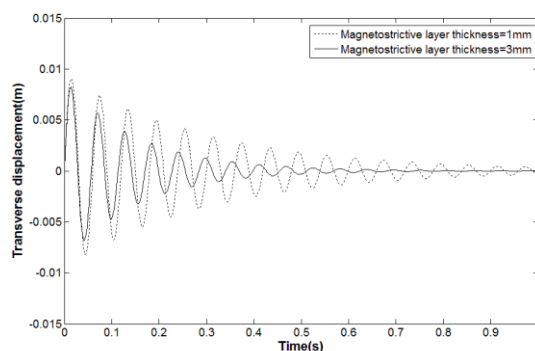


شکل ۷: تأثیر شدت میدان مغناطیسی در کنترل ارتعاشات تیر s [۴۵/-۴۵/m/۰/۹۰] از جنس CFRP

همچنین نهایتاً فرکانس میرایی و ضریب میرایی تیر s [۴۵/-۴۵/m/۰/۹۰] برای مدهای ارتعاشی ۱ تا ۵ با استفاده از تئوری‌های اوپلر-برنولی، تیموشینکو و ردی محاسبه شده و در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد علاوه بر تیرهای متقارن می‌توان برای تیرهای نامتقارن زاویه ای نیز از روش ناویر استفاده کرد. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب رفتار ارتعاشاتی تیرهای [۳۰/m/-۳۰/۳۰/m/۰/۳۰] و [۳۰/m/-۳۰/۳۰/m/۰/۳۰] را نشان می‌دهد. جنس هر دو تیر CFRP می‌باشد. جدول ۲ نیز مقادیر ضریب میرایی و فرکانس میرایی را برای این دو تیر نشان می‌دهد.

با مطالعه و مقایسه نتایج حاصل از شکل‌های ۲، ۳ و ۴ مشخص می‌گردد که محل قرارگیری لایه‌ی مگنتواستریکتیو در کنترل ارتعاشات بسیار موثر بوده و هر مقدار که فاصله‌ی لایه مگنتواستریکتیو از صفحه‌ی میانی افزایش می‌یابد، زمان نشست آن کاهش یافته و در نتیجه ارتعاشات تیر چندلایه با سرعت بیشتری میرا شده و به پایداری می‌رسد.

شکل ۵ تأثیر ضخامت لایه عملگر مگنتواستریکتیو را در میرایی ارتعاشات تیر نشان می‌دهد. در این شکل با ثابت نگه داشتن ضخامت سایر لایه‌ها (۱ میلی‌متر) و تغییر ضخامت لایه‌ی عملگر، تأثیر ضخامت لایه عملگر در کنترل ارتعاشات تیر بررسی شده است. همانطور که از شکل پیداست با افزایش ضخامت لایه عملگر (و ثابت نگه داشتن ضخامت سایر لایه‌ها)، زمان نشست ارتعاشات به طور محسوسی کاهش می‌یابد و تیر با سرعت بیشتری به حالت پایدار خود خواهد رسید.



شکل ۵: تأثیر ضخامت لایه‌ی عملگر در کنترل ارتعاشات تیر s [۴۵/-۴۵/m/۰/۹۰] از جنس CFRP

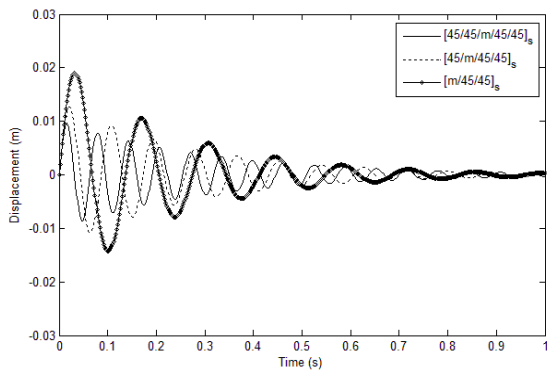
علاوه بر ضخامت لایه مگنتواستریکتیو و فاصله آن از تار خنثی، عامل دیگری نیز در کنترل میرایی ارتعاشات تیر موثر است. این عامل شدت میدان مغناطیسی اعمال شده می‌باشد که با تغییر دادن آن می‌توان ارتعاشات تیری را که تحت شرایط مختلفی در معرض ارتعاشات قرار می‌گیرد، کنترل کرد. در مطالعه‌ی انجام شده با اعمال تغییراتی در مقادیر $c(t)k_c$ میدان مغناطیسی تغییر داده شده و

جدول ۲: ضریب و فرکانس میرایی برای تیرهای نامتقارن زاویه ای از جنس CFRP (ضخامت هر لایه ۱ میلیمتر است)

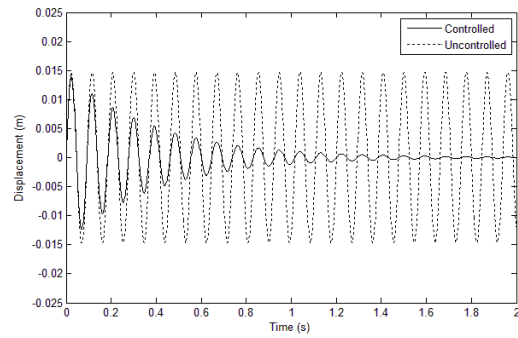
لمینیت	$-\alpha \pm \omega_d$
[30/m/-30/30/m/-30]	2/5397 ± 68/0004
[m/30/-30/30/-30/m]	4/2328 ± 53/9900

جدول ۳: ضریب و فرکانس میرایی برای تیرهای کامپوزیتی با تعداد لایه های مختلف از جنس CFRP (ضخامت هر لایه ۱ میلیمتر است)

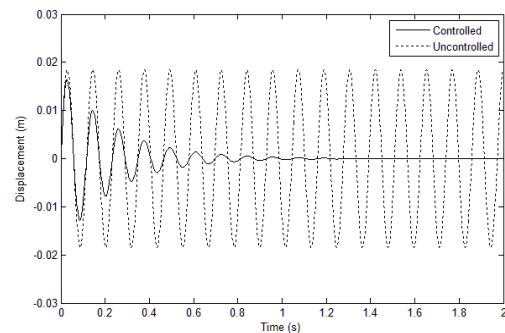
لمینیت	$-\alpha \pm \omega_d$
[45/45/m/45/45] _s	۳/۲۹۹۵ ± ۹۸/۶۲۳۹
[45/m/45/45] _s	۳/۷۰۸۳ ± ۷۲/۶۰۴۳
[m/45/45] _s	۴/۲۳۲۸ ± ۴۵/۷۸۹۵



شکل ۱۰: بررسی اثر تعداد لایه های تیر کامپوزیتی بر رفتار ارتعاشاتی



شکل ۸: رفتار تیر [۳۰/م/-۳۰/۳۰/م/-۳۰] از جنس CFRP در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده



شکل ۹: رفتار تیر [m/۳۰/-۳۰/۳۰/-۳۰/m] از جنس CFRP در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده

شکل ۱۰ نیز به بررسی اثر تعداد لایه های کامپوزیت پرداخته است. در این شکل رفتار ارتعاشاتی تیرهای [m/۴۵/۴۵/۴۵]_s، [۴۵/m/۴۵/۴۵]_s و [۴۵/۴۵/m/۴۵/۴۵]_s نشان داده شده است. ضرایب و فرکانس های میرایی این تیرها نیز در جدول ۳ آورده شده اند.

جدول ۱: مقایسه ی ضریب میرایی α و فرکانس میرایی ω_d برای تئوری های مختلف در ۵ مد ارتعاشی اول برای تیر- [۴۵/

CFRP، [۴۵/m/۰/۹۰]_s

مد ارتعاشی	اویلر-برنولی	تیموشینکو	ردی	مرجع [۳]
۱	۳/۲۹۹ ± ۱۰۴/۸۵	± ۱۰۴/۸۵۲۵ ۳/۲۹۹۵	± ۱۰۴/۸۵۲۵ ۳/۲۹۹۵	۳/۳۰ ± ۱۰۴/۸۲
۲	± ۴۱۹/۳۶۵ ۱۳/۱۹۵۱	± ۴۱۹/۳۶۰۴ ۱۳/۱۹۴۸	± ۴۱۹/۳۶۰۴ ۱۳/۱۹۴۸	۱۳/۱۷ ± ۴۱۸/۹۰
۳	± ۹۴۳/۳۹۸۵ ۲۹/۶۷۸	± ۹۴۳/۳۷۴۸ ۲۹/۶۷۶۵	± ۹۴۳/۳۷۴۸ ۲۹/۶۷۶۵	۲۹/۵۳ ± ۹۴۱/۰۵
۴	± ۱۶۷۶/۷۰ ۵۲/۷۳۳۸	± ۱۶۷۶/۶ ۵۲/۷۲۹۲	± ۱۶۷۶/۶ ۵۲/۷۲۹۲ ± ۱۶۷۶/۶	± ۱۶۶۹/۳۲ ۵۲/۲۷
۵	± ۲۶۱۹/۰۹ ۸۲/۳۴۲۳	± ۲۶۱۸/۸۰ ۸۲/۳۳۰۹	± ۲۸۸۱/۶۰ ۸۲/۳۳۰۹	± ۲۶۰۱/۰۴ ۸۲/۲۲

Data: CFRP: $E_{11}=138.6$ Gpa, $E_{22}=8.27$ Gpa, $G_{12}=4.12$ Gpa, $G_{13}=G_{23}=0.6E_{22}$, $\nu_{12}=0.26$, $\rho=1824$ kgm⁻³, $h=1$ m
Magnetostrictive layer: $E_m=26.5$ Gpa, $\rho_m=9250$ kgm⁻³, $d_m=1.67 \times 10^{-8}$ mA⁻¹, $\nu_m=0$, $h_m=1$ mm, $a=1$ m, $C(t)Kc=10^4$

کمتر باشد. به طوری که با افزایش ضخامت لایه‌ی عملگر می‌توان زمان نشست را کاهش داد و سریع‌تر آن را به حالت پایدار رساند. همانطور که قبلاً اشاره شد، شدت میدان مغناطیسی یا الکتریکی در کنترل عملکرد مواد هوشمند بسیار مهم است و خود می‌تواند یکی از پارامترهای مهم در تنظیم عملگرها برای کنترل ارتعاشات سازه باشد. همانطور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده شد، با افزایش شدت میدان مغناطیسی زمان نشست و دامنه ارتعاشات کاهش یافته و تیر با سرعت بیشتری به حالت میرایی رسیده و پایدار می‌شود. بنابراین در بررسی ارتعاشات تیر و کنترل آن با مواد هوشمند، انتخاب یک میدان مغناطیسی یا الکتریکی مناسب بسیار مهم بوده و می‌تواند در میرایی ارتعاشات سازه موثر باشد.

با مقایسه نتایج جدول ۲ برای لایه‌های نامتقارن نیز نتایج قبل به دست می‌آید. با فاصله گرفتن لایه‌ی عملگر از صفحه‌ی میانی، ضریب میرایی افزایش می‌یابد.

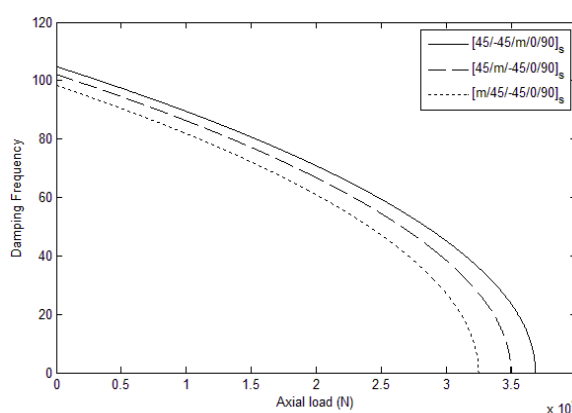
با توجه به جدول ۳ که به بررسی اثر تعداد لایه‌ها بر ضریب میرایی و فرکانس میرایی پرداخته است، مشاهده می‌شود هر چه تعداد لایه‌های تیر کاهش می‌یابد، مقدار ضریب میرایی زیاد می‌شود در حالی که فرکانس میرایی آن کاهش می‌یابد.

همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، با افزایش مقدار نیروی محوری، فرکانس میرایی تیر کاهش یافته تا آنجا که مقدار فرکانس به صفر رسیده است. از آنجایی که در لحظه‌ی کمانش یک تیر، فرکانس ارتعاشی آن صفر می‌شود لذا می‌توان با کمک شکل ۱۱ مقدار نیروی بحرانی کمانش را برای تیر مورد نظر به دست آورد. با توجه به شکل ۱۱ برای تیرهای $[45/m/0/90]_s$ ، $[45/m/0/90]_s$ و $[m/45/0/90]_s$ به ترتیب برابر $36/4$ ، 35 و 32.5 کیلو نیوتن است. مشاهده می‌شود با فاصله گرفتن لایه‌ی عملگر از صفحه‌ی میانی، مقدار نیروی بحرانی کمانش کاهش می‌یابد و استحکام تیر در برابر کمانش کم می‌شود.

۳-۲- بررسی ارتعاشات تیر با اعمال نیروی

محوری

برای این منظور یک بار محوری با مقدار ثابت در راستای طولی بر تیر اعمال شده و فرکانس میرایی آن محاسبه می‌شود. سپس مقدار این نیرو به طور مرتب افزایش می‌یابد تا به مقدار نیروی بحرانی کمانش برسد. شکل ۱۱ تغییرات فرکانس میرایی را بر حسب تغییرات نیروی محوری نشان می‌دهد. در این شکل اثر فاصله لایه‌ی عملگر از صفحه‌ی میانی بر مقدار نیروی کمانش نیز آورده شده است.



شکل ۱۱: تاثیر بار محوری بر فرکانس میرایی تیر (ضخامت هر لایه ۱ میلی‌متر، جنس CFRP)

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در مقاله حاضر کنترل ارتعاشات یک سازه کامپوزیتی با بهره‌گیری از لایه‌های هوشمند مگنتواستریکتیو مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور از یک روش تحلیلی بر پایه روش حل ناویر استفاده گردید و در ادامه به مطالعه پارامتری تاثیر لایه مگنتواستریکتیو بر رفتار ارتعاشی تیر کامپوزیتی پرداخته شد. با افزایش فاصله‌ی لایه‌ی عملگر مگنتواستریکتیو از صفحه میانی، قابلیت دفع ارتعاشات این لایه نیز افزایش می‌یابد. بنابراین بهتر است در کاربرد سازه‌ی این لایه، سعی شود ماده عملگر در بیشترین فاصله از تار خنثی واقع شود تا ارتعاشات تیر را با سرعت بیشتری میرا کند. تغییرات ضخامت لایه‌ی مگنتواستریکتیو می‌تواند روشی برای رسیدن به میرایی سریع با دامنه ارتعاشاتی

۵- مراجع

- [۱] رحیمی، غ. ح.، طورانی، ح.، جدایی، ا. (۱۳۹۱)، "تحلیل خمش و ارتعاشات آزاد تیر هدفمند پیزوالکتریک روی بستر الاستیک"، بیستمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک، شیراز، دانشگاه شیراز.
- [۲] طهانی، م.، ژرفی، ح. (۱۳۸۷)، "کنترل فعال ارتعاشات تیرهای کامپوزیتی با استفاده از لایه‌های پیزوالکتریک"، شانزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک، کرمان، دانشگاه کرمان.
- [3] Reddy, J. N., Barbosa, J. I. (2000). "on vibration suppression of magnetostrictive beam". Smart Material Structures, Vol. 9, pp. 49-58.
- [4] Zhou, H. M., Zhou, Y. H. (2007). "Vibration suppression of laminated composite beams using actuators of giant magnetostrictive materials". Smart Material Structures, Vol. 16, pp. 198-206.
- [5] Garcia Lage, R., MotaSoares, C.M., MotaSoares, C.A., Reddy, J.N. (2004). "Layerwise partial mixed finite element analysis of magneto-electro-elastic plates". Computers & Structures, Vol. 82, pp. 1293-1301.
- [6] Bhattacharya, B., Buravalla V. R., Patsias S., Tomlinson, G. R. (2000). "Active and passive vibration control of flexible structures using a combination of magnetostrictive and ferromagnetic alloys". Fifth European Conference on Smart Structures and Materials, Scotland.
- [7] Reddy, J. N. (1997), "Mechanics of Laminated Composite Plates: Theory and Analysis". CRC Press, Boca Raton.