



## تحلیل ارتعاشات آزاد ورق ساندویچی با هسته مگنتورئولوژیکال و لایه‌هایی از مواد مدرج تابعی

فرزاد شهریاری<sup>۱</sup>، مهدی شکارزاده<sup>۱\*</sup>

۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

\*نویسنده مسئول: Mehdi-shekarzadeh@iauahvaz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۱

### چکیده

در این مقاله، به بررسی ارتعاشات یک ورق ساندویچی دارای هسته‌ای با ویژگی‌های مگنتورئولوژیکال و لایه‌های فوقانی و تحتانی از مواد پیزوالکتریک هدفمند پرداخته شده است. در این ساختار، هسته و لایه‌ها به ترتیب تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی واکنش نشان می‌دهند. برای استخراج معادله ساختاری این ورق، ابتدا روابط ویژه هر لایه به طور جداگانه با استفاده از تئوری ورق کلاسیک بیان گردیده است. سپس با استفاده از روش انرژی و اصل همپلتون، معادلات دیفرانسیلی حاکم بر حرکت سیستم به دست آمده است. به دلیل وجود کوپل در معادلات، از روش ناویر که قابلیت تحلیل شرایط مرزی ساده را دارد، برای حل استفاده شده است. در نهایت، تأثیر عوامل مختلفی چون نوع ماده مگنتورئولوژیکال به عنوان هسته، نسبت ضخامت هسته به لایه‌ها، و شدت میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی بر فرکانس‌های طبیعی بی‌بعد ورق ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که اعمال میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تأثیر قابل توجهی در افزایش فرکانس‌های طبیعی بی‌بعد ورق دارد. همچنین، افزایش ضخامت لایه و نسبت طول به عرض ورق منجر به کاهش فرکانس طبیعی می‌شود. از میان سه نوع هسته مورد بررسی، نتایج نشان‌دهنده استحکام بیشتر هسته نوع دوم در ساختار ساندویچی است.

**کلمات کلیدی:** ورق ساندویچی، مگنتورئولوژیکال، پیزوالکتریک، روش انرژی، اصل همپلتون

### مقدمه

رئولوژی به‌عنوان علم مطالعه تغییر شکل و جریان مواد شناخته می‌شود. خصوصیات رئولوژیکی برخی سیالات در مواجهه با محرک‌های خارجی به سرعت و در کسری از ثانیه تغییر می‌کند. از جمله ویژگی‌های رئولوژیکی سیالات می‌توان به گرانیروی و تنش تسلیم اشاره کرد. این سیالات به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: دسته اول، سیالات الکترورئولوژیکال که به میدان الکتریکی حساس هستند و دسته دوم، سیالات مگنتورئولوژیکال که به میدان مغناطیسی واکنش نشان می‌دهند. این سیالات هوشمند شامل یک سیال عایق پایه هستند که ذراتی به صورت معلق یا سوسپانسیون درون آن‌ها پخش شده‌اند. در حضور میدان، ذرات به صورت زنجیره‌هایی آرایش می‌گیرند که باعث تبدیل سیال از حالت مایع به شبه جامد می‌شود. از ویژگی‌های بارز این نوع سیالات می‌توان به پاسخ سریع به نیروی خارجی، قابلیت برگشت پذیری و کنترل آسان آن‌ها اشاره کرد. یکی از کاربردهای این سیالات، استفاده در وسایلی است که حرکت‌ها یا ارتعاشات را کنترل یا در صورت لزوم متوقف می‌کنند.

نایاک و همکاران [۱] به مقایسه تحلیلی ارتعاشات آزاد یک تیر ساندویچی با هسته مگنتورئولوژیکال و رویه‌های کامپوزیتی با استفاده از تئوری مرتبه بالای برشی، تئوری کلاسیک و روش اجزا محدود پرداختند. همچنین نایاک و همکاران [۲] با جداسازی مایع مگنتورئولوژیکال در وسط لایه هسته ویسکوالاستیک، فرکانس طبیعی را با روش اجزا محدود و تست آزمایشگاهی بررسی نمودند. یینگ و نی [۳] در بررسی ارتعاشات آزاد تیرهای ساندویچی از ماده الاستومر مگنتورئولوژیکال در لایه وسط تیر استفاده کردند. مانوهاران و همکاران [۴] با استفاده از روش المان محدود، رفتار دینامیکی ورق ساندویچی با رویه‌های کامپوزیت لایه‌ای و هسته سیال مگنتورئولوژیکال را بررسی کردند و تأثیر نحوه چیدمان لایه‌های کامپوزیتی روی فرکانس طبیعی و ضریب استهلاک را تحلیل نمودند.



در زمینه مطالعه ورق‌های ساندویچی، ینگ و همکاران [۵] به نقش و کاربرد هسته ویسکوالاستومری مگنتورئولوژیکال در ورق‌های ساندویچی به منظور دفع میکرو ارتعاشات تحقیق کردند. آگویب و همکاران [۶] تحلیل رفتار دینامیکی یک ورق ساندویچی با هسته الاستومری مگنتورئولوژیکال و رویه‌های آلومینیومی را انجام دادند. رامامورثی و راجاموهان [۷] نیز با در نظر گرفتن یک ورق ساندویچی با هسته‌ای از جنس لاستیک و سیالات مگنتورئولوژیکال به‌طور همزمان، رفتار ارتعاشی آن را مورد مطالعه قرار دادند. به [۸] مولفه‌های ارتعاشی ورق ساندویچی ارتوتروپیک با هسته الاستومری مگنتورئولوژیکال را تحلیل و بررسی نمود. همچنین، ملک‌زاده و همکاران [۹] در تحقیقی به تحلیل ارتعاشات آزاد و تأثیر سرعت کم در ورق ساندویچی با هسته از جنس مواد هوشمند مگنتورئولوژیکال پرداختند. اشاقی و همکاران [۱۰] ارتعاشات ورق مستطیلی ساندویچی با لایه میانی سیال مغناطیس را به‌صورت عددی و تجربی برای شرایط مرزی مختلف بررسی کردند. یانگ و همکاران [۱۱] نیز ارتعاشات ورق ساندویچی با لایه ویسکوالاستیک و رویه‌هایی از جنس مواد مدرج تابعی را مورد مطالعه قرار دادند و برای حل معادلات استخراج شده از روش اصلاح شده فوریه ریتز استفاده کردند. یانگ و یو [۱۲] نیز به بررسی ارتعاشات آزاد و اجباری ورق مستطیلی مدرج تابعی پیزوالکتریک پرداختند و روابط جابجایی را به فرم سری فوریه نوشتند و معادلات استخراج شده را به‌طور دقیق حل کردند.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون ارتعاشات ورق ساندویچی با لایه میانی سیال هوشمند مگنتورئولوژیکال و رویه‌هایی از جنس ماده پیزوالکتریک مورد مطالعه قرار نگرفته است.

### معادلات حرکت سیستم و حل آن‌ها

برای استخراج معادلات حاکم بر ارتعاش آزاد ورق ساندویچی با هسته مگنتورئولوژیکال بر اساس روابط همیلتون، ابتدا باید انرژی کل سیستم تعریف شود. انرژی کل معمولاً شامل انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی است. بر اساس اصل همیلتون، تغییرات انرژی سیستم در هر بازه زمانی باید صفر باشد. به عبارت دیگر، باید انتگرال زمانی تغییرات انرژی محاسبه شده و برابر صفر قرار گیرد.

$$\Pi = \delta \int_{t_1}^{t_2} (U - T - V) dt = 0 \quad (1)$$

که در این معادله،  $U$  انرژی کرنشی،  $T$  انرژی جنبشی و  $V$  کار ناشی از نیروهای خارجی است. به منظور دستیابی به معادلات حرکت حاکم بر سیستم مورد مطالعه، کافی است پس از جایگذاری روابط کرنش جابجایی در معادلات تنش - کرنش، اصل حساب تغییرات اعمال شود. سپس، با قرار دادن ضرایب  $\delta w, \delta v, \delta u, \delta t$  برابر صفر، معادلات حرکت به دست می‌آیند. برای یک ورق ساندویچی با صفحات تابعی پیزوالکتریک و هسته مگنتورئولوژیکال معادلات حرکت به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} N_{x,x}^t + N_{xy,y}^t + \frac{Q_x^c}{h_c} &= I_0^t \ddot{u}^t + \frac{I_{MR} d}{h_c^2} \ddot{w}_{,x} + \frac{I_{MR}}{h_c^2} (\ddot{u}^t - \ddot{u}^b) \\ N_{x,x}^b + N_{xy,y}^b + \frac{Q_x^c}{h_c} &= I_0^b \ddot{u}^b + \frac{I_{MR} d}{h_c^2} \ddot{w}_{,x} + \frac{I_{MR}}{h_c^2} (\ddot{u}^t - \ddot{u}^b) \\ N_{y,y}^t + N_{xy,x}^t + \frac{Q_y^c}{h_c} &= I_0^t \ddot{v}^t + \frac{I_{MR} d}{h_c^2} \ddot{w}_{,y} + \frac{I_{MR}}{h_c^2} (\ddot{v}^t - \ddot{v}^b) \\ N_{y,y}^b + N_{xy,x}^b + \frac{Q_y^c}{h_c} &= I_0^b \ddot{v}^b + \frac{I_{MR} d}{h_c^2} \ddot{w}_{,y} + \frac{I_{MR}}{h_c^2} (\ddot{v}^t - \ddot{v}^b) \\ M_{x,xx}^t + M_{x,xx}^b + 2(M_{xy,xy}^t + M_{xy,xy}^b) + M_{y,yy}^t + M_{y,yy}^b + \frac{d}{h_c} \left( \frac{\partial Q_y^c}{\partial y} + \frac{\partial Q_x^c}{\partial x} \right) \\ &= I_0^{t,c,b} \ddot{w} + 2I_0 (\ddot{w}_{,xx} + \ddot{w}_{,yy}) + \frac{I_{MR}}{h_c^2} (\ddot{u}^t - \ddot{u}^b + \ddot{v}^t - \ddot{v}^b) \end{aligned} \quad (2)$$



$$\int_{z_k}^{z_{k+1}} \left( \frac{\partial D_x}{\partial x} \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) + \frac{\partial D_y}{\partial y} \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) + \frac{\pi}{h} D_z \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \right) dz = 0$$

که برای معادلات فوق روابط زیر را می‌توان تعریف کرد:

$$\begin{aligned} N &= \int \sigma dz \\ M &= \int \sigma z dz \\ Q &= \int \tau dz \\ I_0 &= \int \rho dz \\ I_{MR} &= \int \rho_{MR} Z^2 dz \end{aligned} \quad (3)$$

با قراردادن روابط جابجایی در کرنش‌ها و باز نویسی مجدد نیروها و گشتاورها:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} N_x^i \\ N_y^i \\ N_{xy}^i \end{Bmatrix} &= \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} c_{11}(z) & c_{12}(z) & 0 \\ c_{12}(z) & c_{22}(z) & 0 \\ 0 & 0 & c_{66}(z) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{0,x}^i - z w_{,xx} \\ v_{0,y}^i - z w_{,yy} \\ u_{0,y}^i + v_{0,x}^i - 2z(w_{,xy}) \end{Bmatrix} dz \\ &- \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{13}(z) \\ 0 & 0 & e_{23}(z) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\phi_{,z} \end{Bmatrix} dz \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} M_x^i \\ M_y^i \\ M_{xy}^i \end{Bmatrix} &= \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} c_{11}(z) & c_{12}(z) & 0 \\ c_{12}(z) & c_{22}(z) & 0 \\ 0 & 0 & c_{66}(z) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{0,x}^i - z w_{,xx} \\ v_{0,y}^i - z w_{,yy} \\ u_{0,y}^i + v_{0,x}^i - 2z(w_{,xy}) \end{Bmatrix} z dz \\ &- \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{13}(z) \\ 0 & 0 & e_{23}(z) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\phi_{,z} \end{Bmatrix} z dz \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ e_{31}(z) & e_{32}(z) & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{0,x}^i - z w_{,xx} \\ v_{0,y}^i - z w_{,yy} \\ u_{0,y}^i + v_{0,x}^i - 2z(w_{,xy}) \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \eta_{11}(z) & 0 & 0 \\ 0 & \eta_{22}(z) & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{33}(z) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix} \\ i &= t, c, b \end{aligned} \quad (6)$$

نیروها و گشتاورها در سه لایه استخراج و در نهایت معادلات حرکت کلی به صورت زیر به دست می‌آید:



$$A_{11}u_{0,xx}^t - B_{11}w_{,xxx} + A_{12}v_{0,yx}^t - B_{12}w_{,yyx} + E_{11}\phi_{,x} + A_{66}(u_{0,yy}^t + v_{0,xy}^t) - 2B_{66}w_{,xyy} + \frac{G^*d}{h_c^2} \left( \frac{u_t - u_b}{d} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (7)$$

$$= I_0^t \ddot{u}^t + \frac{I_{MR}d}{h_c^2} \ddot{w}_{,x} + \frac{I_{MR}}{h_c^2} (\ddot{u}^t - \ddot{u}^b)$$

$$A_{11}u_{0,xx}^b - B_{11}w_{,xxx} + A_{12}v_{0,yx}^t - B_{12}w_{,yyx} + E_{11}\phi_{,x} + A_{66}(u_{0,yy}^t + v_{0,xy}^t) - 2B_{66}w_{,xyy} + \frac{G^*d}{h_c^2} \left( \frac{u_t - u_b}{d} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (8)$$

$$= I_0^t \ddot{u}^t + \frac{I_{MR}d}{h_c^2} \ddot{w}_{,x} + \frac{I_{MR}}{h_c^2} (\ddot{u}^t - \ddot{u}^b)$$

$$A_{11}u_{0,xy}^t - B_{12}w_{,xxy} + A_{22}v_{0,yy}^t - B_{22}w_{,yyy} + G_{11}\phi_{,y} + A_{66}(u_{0,yx}^t + v_{0,xx}^t) - 2B_{66}w_{,xxy} + \frac{G^*d}{h_c^2} \left( \frac{v_t - v_b}{d} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (9)$$

$$= I_0^t \ddot{v}^t + \frac{I_{MR}d}{h_c^2} \ddot{w}_{,y} + \frac{I_{MR}}{h_c^2} (\ddot{v}^t - \ddot{v}^b)$$

$$A_{12}u_{0,xy}^b - B_{12}w_{,xxy} + A_{22}v_{0,yy}^t - B_{22}w_{,yyy} + G_{11}\phi_{,y} + A_{66}(u_{0,yx}^t + v_{0,xx}^t) - 2B_{66}w_{,xxy} + \frac{G^*d}{h_c^2} \left( \frac{v_t - v_b}{d} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (10)$$

$$= I_0^t \ddot{v}^t + \frac{I_{MR}d}{h_c^2} \ddot{w}_{,y} + \frac{I_{MR}}{h_c^2} (\ddot{v}^t - \ddot{v}^b)$$

$$E_{11}u_{0,x}^t + G_{11}v_{0,y}^t + E_{22}w_{,xx} + G_{22}w_{,yy} + X_1\phi_{,xx}^t + X_2\phi_{,yy}^t - X_3\phi^t = 0 \quad (11)$$

$$E_{11}u_{0,x}^b + G_{11}v_{0,y}^b + E_{22}w_{,xx} + G_{22}w_{,yy} + X_1\phi_{,xx}^b + X_2\phi_{,yy}^b - X_3\phi^b = 0 \quad (12)$$

$$(B_{11}u_{0,xxx}^t - 2D_{11}w_{,xxx} + B_{12}v_{0,yxx}^t - 2D_{12}w_{,yxx} + E_{22}\phi_{0,xx}^t) + (B_{11}u_{0,xxx}^b + B_{12}v_{0,yxx}^b + E_{22}\phi_{0,xx}^b) + \quad (13)$$

$$2(B_{66}(u_{0,xyy}^t + v_{0,yxx}^t) - 2D_{66}w_{,yxx}) + 2(B_{66}u_{0,xyy}^b + v_{0,yxx}^b) - 2D_{66}w_{,yxx} + (B_{12}u_{0,xyy}^t -$$

$$2D_{12}w_{,xyy} + B_{22}v_{0,yyy}^t - 2D_{22}w_{,yyy} + G_{22}\phi_{0,xx}^t) + (B_{12}u_{0,xyy}^b + B_{22}v_{0,yyy}^b + G_{22}\phi_{0,yy}^b) +$$

$$\frac{G^*d}{h_c^2} \left( \frac{v_t - v_b}{d} + w_{,yy} \right) + \frac{G^*d}{h_c^2} \left( \frac{v_t - v_b}{d} + w_{,xx} \right) = I_0^{t.c.b} \ddot{w} + 2I_0(\ddot{w}_{,xx} + \ddot{w}_{,yy}) + \frac{I_{MR}d}{h_c^2} (\ddot{u}_x^t - \ddot{u}_x^b + \ddot{v}_y^t - \ddot{v}_y^b + d\ddot{w}_{,xx} +$$

$$d\ddot{w}_{,yy})$$

در این روش، توابع زیر برای میدان‌های جابه‌جایی پیشنهاد می‌شوند:

$$u_0(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} U_{nm}(t) \cos(\alpha x) \sin(\beta y)$$

$$v_0(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} V_{nm}(t) \sin(\alpha x) \cos(\beta y) \quad (14)$$

$$w_0(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} W_{nm}(t) \sin(\alpha x) \sin(\beta y)$$

$$\phi(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \phi_{nm}(t) \sin(\alpha x) \sin(\beta y)$$

$$\alpha = \frac{m\pi}{a} \quad \beta = \frac{n\pi}{b}$$

با قرار دادن روابط بالا در معادلات دیفرانسیلی حرکت، رابطه زیر به دست می‌آید:

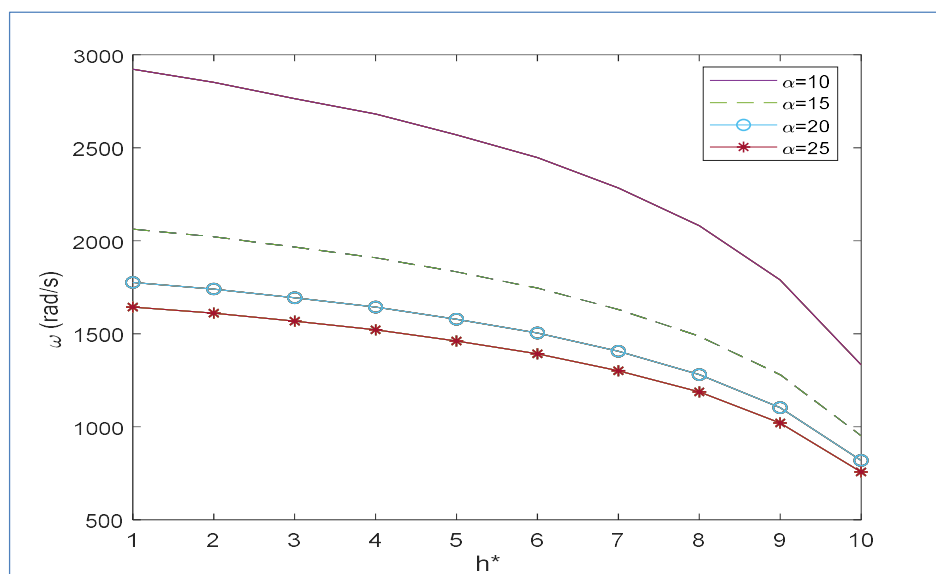


$$\{[K] - [M]\omega^2\}[q] = 0 \quad (15)$$

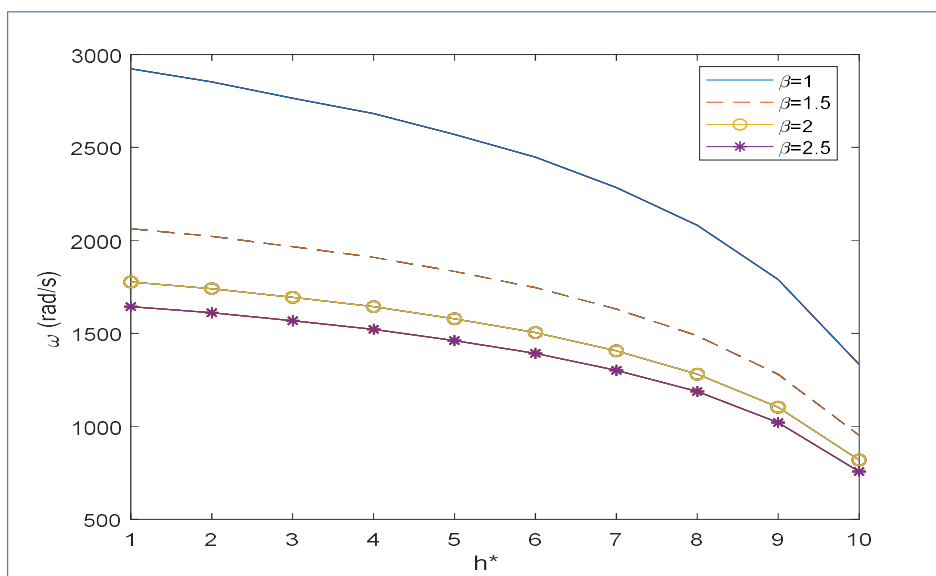
که در آن  $K$  ماتریس سختی و  $M$  ماتریس جرم و  $q$  بردار جابجایی می‌باشد. حال، برای تحلیل سیستم مورد نظر باید دترمینان ماتریس ضرایب محاسبه شده و ریشه‌های معادله حاصل شده به دست آیند. کمترین ریشه این معادله، برابر با فرکانس طبیعی سیستم خواهد بود.

### نتایج

در این بخش، هدف بررسی اثرات تغییر پارامترهای هندسی ورق شامل طول، عرض و ضخامت هسته و رویه‌ها روی فرکانس طبیعی و ضریب استهلاک سیستم است. از این رو، می‌توان با تغییر پارامترهای بی‌بعد متناظر و ثابت نگه داشتن سایر شرایط حاکم بر مسئله، اثر این پارامترها را بررسی کرد. پارامتری بی‌بعد  $\alpha = \frac{a}{h}$  برابر است با نسبت طول به ضخامت کل ورق که به عنوان نسبت طولی ورق شناخته می‌شود. همچنین  $\beta = \frac{a}{b}$ ، نسبت طول به عرض ورق ساندویچی است که به آن نسبت جانبی گفته می‌شود. نسبت  $h^* = \frac{h_c}{h_f}$  نیز برابر با نسبت ضخامت هسته به رویه‌ها است که نسبت ضخامت لایه‌ای نام‌گذاری می‌شود. شکل (۱) تغییرات فرکانس طبیعی ورق ساندویچی را نسبت به ضخامت لایه‌ای در طول‌های مختلف نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت، فرکانس طبیعی ورق کاهش می‌یابد. زمانی که ضخامت هسته مگنتورئولوژیکال، که دارای سفتی بسیار کمتری نسبت به لایه‌های پیزوالکتریک تابعی هدفمند است، افزایش می‌یابد، سفتی کلی ورق ساندویچی کاهش یافته و انتظار می‌رود که سریع‌تر به فرکانس طبیعی اولیه برسد. همچنین، با افزایش طول ورق، فرکانس طبیعی ورق کاهش خواهد یافت. بنابراین، در این شرایط، بالاترین فرکانس طبیعی در کمترین ضخامت هسته و طول ورق، و پایین‌ترین فرکانس در بیشترین ضخامت هسته و طول ورق مشاهده خواهد شد. در شکل (۲)، تغییرات فرکانس طبیعی ورق ساندویچی به نسبت ضخامت لایه‌ای در نسبت‌های جانبی مختلف قابل مشاهده است. آنچه که واضح است، این است که با افزایش نسبت جانبی ورق، فرکانس طبیعی ارتعاشات کاهش می‌یابد. این کاهش فرکانس به‌ویژه در نسبت‌های ضخامت لایه پایین‌تر بیشتر مشهود است، در حالی که با افزایش این نسبت، تأثیر آن کمتر به چشم می‌آید.

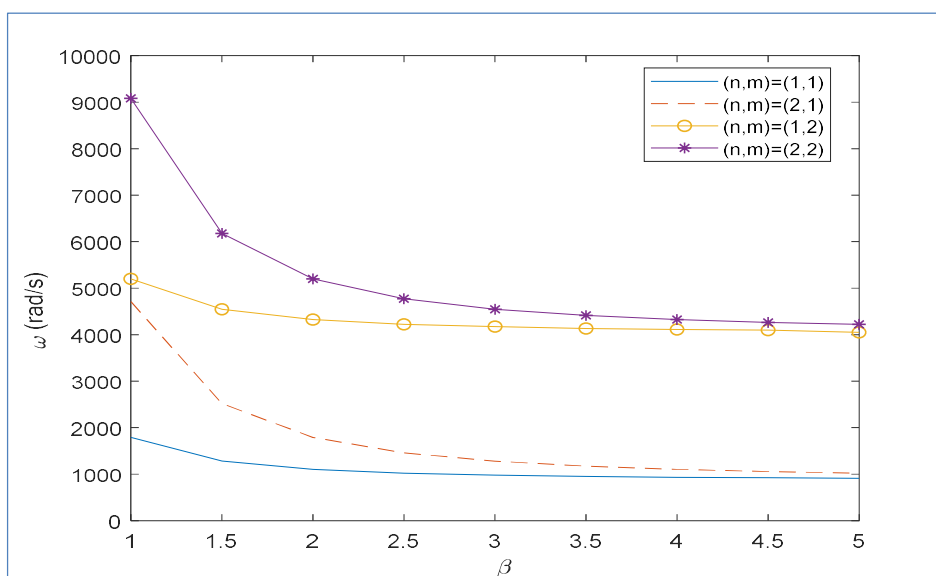


شکل ۱: تغییرات فرکانس طبیعی بر حسب نسبت ضخامت لایه‌ای در نسبت‌های طولی مختلف



شکل ۲: تغییرات فرکانس طبیعی بر حسب نسبت ضخامت لایه‌ای در نسبت‌های جانبی مختلف

در شکل (۳)، تغییرات فرکانس طبیعی ورق ساندویچی به نسبت‌های جانبی در مدهای ارتعاشی مختلف نمایش داده شده است. در این شکل، فرکانس طبیعی برای چهار مود اول رسم شده است و مطابق با نتایج، مدهای بالاتر دارای فرکانس ارتعاشی بیشتری هستند. این نتایج می‌توانند در طراحی سازه‌ها بسیار مفید باشند، زیرا شناخت و عبور از مدهای ارتعاشی سازه یکی از اهداف مهم طراحان به شمار می‌آید. این اطلاعات به طراحان کمک می‌کند تا سازه‌هایی با عملکرد بهینه و ایمنی بالا طراحی کنند.

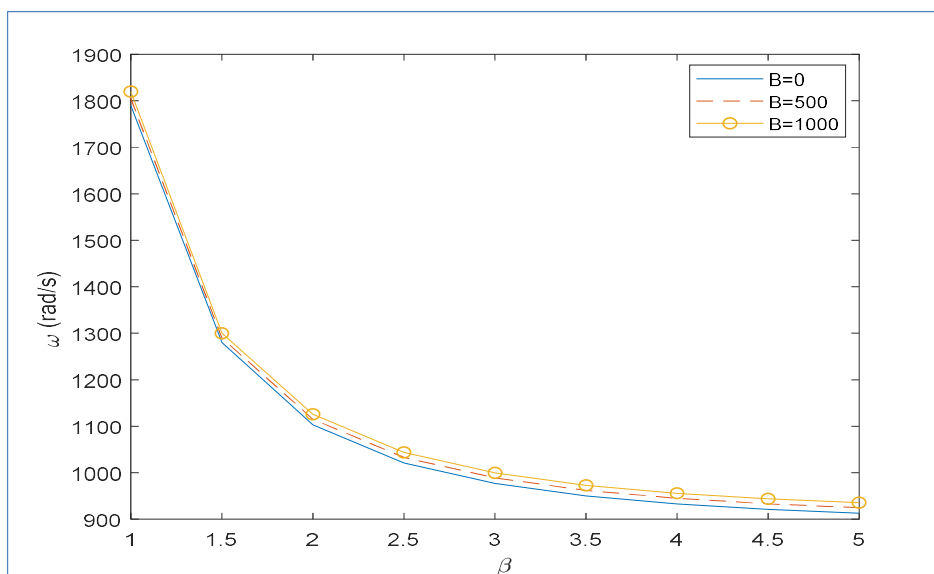


شکل ۳: تغییرات فرکانس طبیعی ورق ساندویچی بر حسب نسبت‌های جانبی در مدهای ارتعاشی مختلف

تغییرات فرکانس طبیعی ورق ساندویچی بر حسب نسبت جانبی تحت شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی در شکل (۴) نشان داده شده است. با افزایش مقدار شدت میدان مغناطیسی، مدول برشی مختلط سیال، زیاد شده و لزجت هسته مگنتورئولوژیکال تغییر

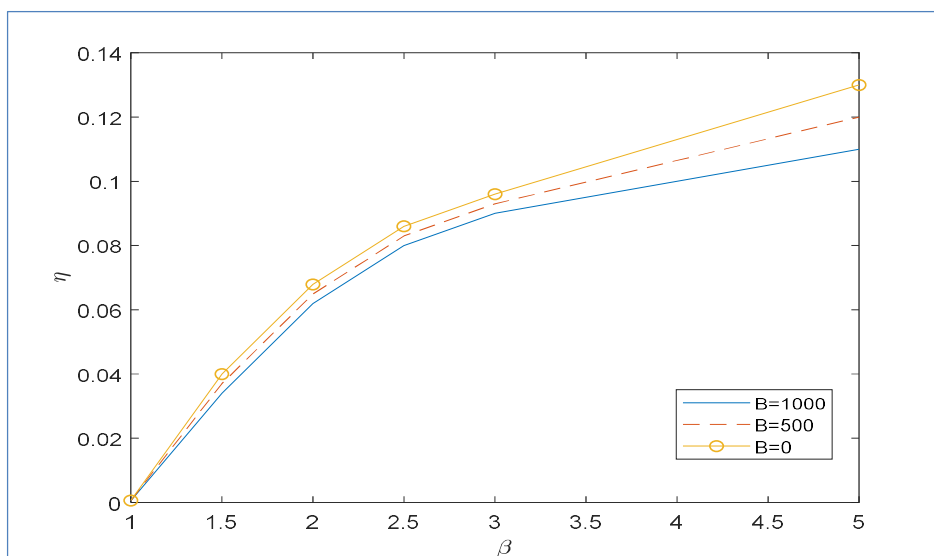


می‌کند. بنابراین ذرات سیال با تشکیل زنجیره‌های جامد، منجر به تبدیل سیال به زلی شبه جامد شده که این امر در نهایت، باعث افزایش پایداری ورق ساندویچی می‌شود. نکته دیگر در شکل (۴) این است که اثر میدان مغناطیسی روی فرکانس طبیعی ارتعاشات ورق ساندویچی در شدت‌های میدان بالاتر، به تدریج کمتر خواهد شد. به این معنا که افزایش شدت میدان مغناطیسی تا حد خاصی موجب افزایش فرکانس طبیعی می‌شود و افزایش بیش از حد آن، تاثیری در تغییرات فرکانس نخواهد داشت.



شکل ۴: تغییرات فرکانس طبیعی ورق ساندویچی بر حسب نسبت جانبی تحت شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی

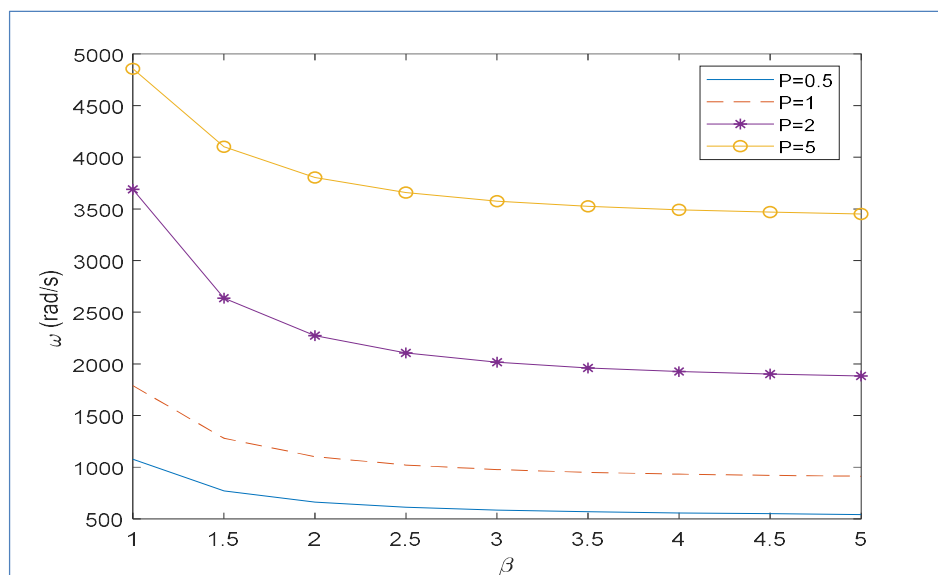
تغییرات ضریب استهلاک ورق ساندویچی بر حسب نسبت جانبی تحت شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی در شکل (۵) نشان داده شده است. ضریب استهلاک ورق ساندویچی در شدت‌های میدان مغناطیسی بالاتر، به تدریج کمتر خواهد شد به این معنا که افزایش شدت میدان مغناطیسی تا حد خاصی موجب کاهش ضریب استهلاک می‌شود و با کاهش نسب جانبی، مقدار آن به حداقل می‌رسد.



شکل ۵: تغییرات ضریب استهلاک ورق ساندویچی بر حسب نسبت جانبی تحت شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی

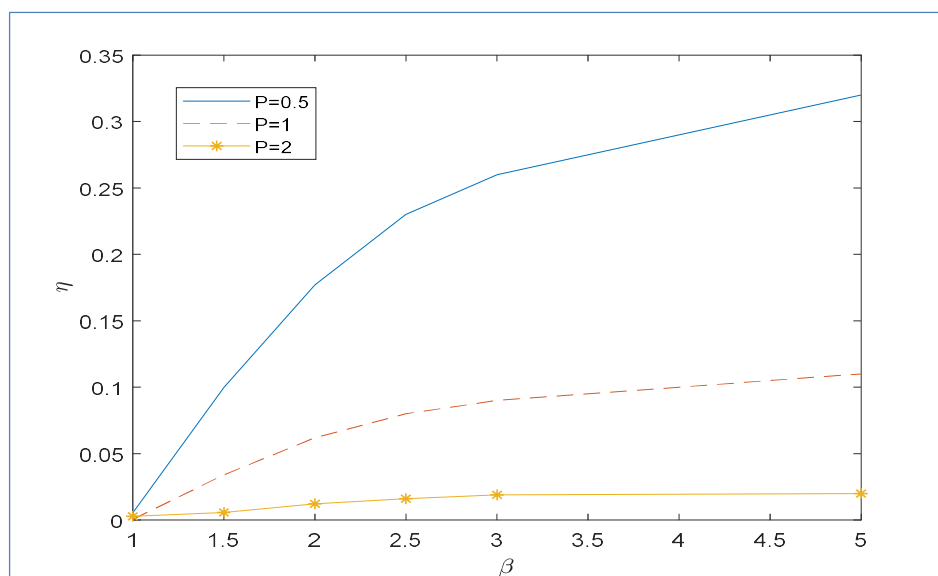


شکل (۶) تأثیر اندیس توانی بر فرکانس طبیعی را بر حسب افزایش نسبت جانبی ورق نشان می‌دهد. در این شکل نسبت ضخامت هسته به ورق‌های تابعی هدفمند بالا و پایین در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش اندیس توانی، فرکانس طبیعی افزایش می‌یابد.



شکل ۶: تغییرات فرکانس طبیعی ورق ساندویچی بر حسب نسبت جانبی با اندیس توانی مختلف

شکل (۷) تأثیر اندیس توانی بر ضریب استهلاک را بر حسب افزایش نسبت جانبی ورق نشان می‌دهد. در این شکل نسبت ضخامت هسته به ورق‌های تابعی هدفمند بالا و پایین در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش اندیس توانی، ضریب استهلاک کاهش می‌یابد.



شکل ۷: تغییرات ضریب استهلاک ورق ساندویچی بر حسب نسبت جانبی با اندیس توانی مختلف





### نتیجه‌گیری

- در ورق‌های ساندویچی متشکل از هسته مگنتورئولوژیکال و رویه‌های تابعی هدفمند پیزوالکتریک، به دلیل نرم و انعطاف پذیرتر بودن هسته نسبت به رویه‌ها، افزایش نسبت ضخامت لایه‌ای منجر به کاهش فرکانس طبیعی می‌شود.
- اعمال میدان مغناطیسی می‌تواند باعث افزایش فرکانس طبیعی ورق ساندویچی شود، زیرا افزایش شدت میدان مغناطیسی موجب سفت‌تر شدن سیال مگنتورئولوژیکال شده و باعث بهبود فرکانس‌های سازه ساندویچی و کاهش ضریب استهلاک می‌گردد.
- افزایش اندیس توانی باعث افزایش فرکانس‌های طبیعی و کاهش ضریب استهلاک ورق ساندویچی تابعی هدفمند پیزوالکتریک با لایه مگنتورئولوژیکال می‌شود.

### مراجع

- [1] Nayak, B., Sastri, J.B.S., Dwivedy, S.K., Murthy, K.K., (2012). A comparative study of the classical and higher order theory for free vibration analysis of MRE cored sandwich beam with composite skins using finite element method. In IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM), pp 172-178. IEEE,.
- [2] Nayak, B., Dwivedy, S.K., Murthy, K.S.R.K., (2013). Vibration analysis of a three-layer magnetorheological elastomer embedded sandwich beam with conductive skins using finite element method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 227(4), pp 714-729.
- [3] Ying, Z.G., Ni, Y.Q., (2009). Micro-vibration response of a stochastically excited sandwich beam with a magnetorheological elastomer core and mass. Smart materials and structures, 18(9), p 095005.
- [4] Manoharan, R., Vasudevan, R., Jeevanantham, A.K., (2014). Dynamic characterization of a laminated composite magnetorheological fluid sandwich plate. Smart Materials and Structures, 23(2), p 025022.
- [5] Ying, Z., Chen, H., Ni, Y., (2012). Magnetorheological visco-elastomer and its application to suppressing microvibration of sandwich plates. In Third International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, 8409, pp 356-363. SPIE.
- [6] Aguib, S., Nour, A., Zahloul, H., Bossis, G., Chevalier, Y., Lançon, P., (2014). Dynamic behavior analysis of a magnetorheological elastomer sandwich plate. International Journal of Mechanical Sciences, 87, pp 118-136.
- [7] Ramamoorthy, M., Rajamohan, V., AK, J., (2016). Vibration analysis of a partially treated laminated composite magnetorheological fluid sandwich plate. Journal of Vibration and Control, 22(3), pp 869-895.
- [8] Yeh, J.Y., (2014). Vibration characteristics analysis of orthotropic rectangular sandwich plate with magnetorheological elastomer. Procedia Engineering, 79, pp 378-385.
- [9] Malekzadeh, K., Payganeh, G., Saghavaz, F.R., (2015). Free vibration and Low velocity impact Analysis of sandwich plates with Smart Flexible cores. Modares Mechanical Engineering, 14(13).
- [10] Eshaghi, M., Sedaghati, R., Rakheja, S., (2017). Vibration analysis and optimal design of multi-layer plates partially treated with the MR fluid. Mechanical Systems and Signal Processing, 82, pp 80-102.
- [11] Yang, C., Jin, G., Ye, X., Liu, Z., (2016). A modified Fourier-Ritz solution for vibration and damping analysis of sandwich plates with viscoelastic and functionally graded materials. International Journal of Mechanical Sciences, 106, pp 1-18.
- [12] Zhong, Z. and Yu, T., 2006. Vibration of a simply supported functionally graded piezoelectric rectangular plate. Smart materials and structures, 15(5), pp 1404-1412.