



بررسی تاثیر میراگر خارجی الکترورنولوژیکیال بر رفتار کمانش دینامیکی صفحه فلزی

محمد حسین زاده^{۱*}، جلیل رضایی پژند^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی

^۲ استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۵/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۱۱/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۳/۲۰

چکیده

در این مقاله، کمانش دینامیکی صفحه فلزی با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور بهبود نواحی پایداری صفحه، از یک میراگر خارجی الکترورنولوژیکیال استفاده شده است. سیالات الکترورنولوژیکیال دسته‌ای از سیالات هستند که خصوصیات مکانیکی آن‌ها با اعمال میدان الکتریکی در کسری از ثانیه تغییر می‌کند. در مدل میراگر الکترورنولوژیکیال، رفتار پس از تسلیم سیال هوشمند (مدل بینگهام) و مد فشاری آن مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور حل معادله حاکم بر سازه هوشمند و یافتن نواحی پایداری آن، از روش نیومارک استفاده شده است. در هنگام طراحی میراگر، با تغییر در برخی از پارامترها می‌توان نواحی پایداری سازه را تغییر داد. تغییر پارامترهای میزان ولتاژ اعمالی به الکترودها، شعاع الکترودها و فاصله نسبی اولیه الکترودها در میراگر الکترورنولوژیکیال می‌تواند منجر به تغییرات پایداری سازه شود. نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان می‌دهد که هر چه شدت میدان الکتریکی بیشتر، فاصله نسبی اولیه بین الکترودها کمتر و شعاع الکترودهای میراگر الکترورنولوژیکیال بیشتر باشد، پایداری سازه افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: صفحه فلزی؛ پایداری دینامیکی؛ سیال الکترورنولوژیکیال (ER).

Effect of external electrorheological damper on dynamic buckling behavior of a metallic plate

M. Hoseinzadeh^{1*} and J. Rezaeepazhand²

¹ Ph.D. student, Mech. Eng., Ferdowsi University, Mashhad, Iran

² Prof., Mech. Eng., Ferdowsi University, Mashhad, Iran

Abstract

In this study, dynamic buckling of a metallic plate with external electrorheological (ER) damper is investigated using the finite element method. The stability region of the metallic plate is improved by applying an external ER damper to the plate. The squeeze mode and the post yield behavior of the ER fluid (nonlinear behavior) is considered for modelling the ER damper. ER fluids are a class of smart fluids that their mechanical behavior is changed considerably in milliseconds by applying the electric field. The governing equation of the motion is solved using the Newmark method. Different parameters such as the intensity of the applied electric field and the geometric properties of the external ER damper can affect the stability regions of the structure. The results show that the less relative initial gap, the larger radius of the ER damper and the higher value of applied electric field can increase the stability boundary of the structure.

Keywords: Metallic plate; Dynamic stability; Electrorheological fluid.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۵۱۰۲۸۴۶۵؛ فکس: ۰۵۱۱۳۴۳۴۷۵۸

آدرس پست الکترونیک: hoseinzadeh@mshdiau.ac.ir

۱- مقدمه

پنل‌ها و پوسته‌های نازک از المان‌های اصلی بسیاری از سازه‌های پیشرفته به شمار می‌رود که در معرض تحریک خارجی ناخواسته قرار دارد. این تحریک خارجی، یا به شکل بار نوسانی و یا به صورت بار ضربه‌ای به سیستم اعمال می‌شود که نه تنها باعث آلودگی‌های صوتی-ارتعاشی، بلکه منجر به بروز حوادث ناگوار نیز می‌گردد. در صورت وجود بار نوسانی، با تغییر فرکانس تحریک و همچنین تغییر دامنه بار اعمالی، شرایطی به وجود می‌آید که ارتعاشات عرضی از حد مجاز فراتر می‌رود و سازه ناپایدار می‌شود. به این نوع پاسخ دینامیکی در سازه‌ها اصطلاحاً تحریک پارامتری یا رزونانس پارامتری گفته می‌شود. در این حالت، ناپایداری در سازه می‌تواند در محدوده وسیعی از فرکانس‌های تحریک حتی در بارهایی کمتر از بار بحرانی سازه تحت بارهای فشاری رخ دهد. سیمیتسز^۱ [۱] در یک مقاله مروری، انواع حالت‌های بارگذاری را که منجر به رخ دادن کماتش دینامیکی در سازه‌ها می‌شود، مورد بررسی قرار داد. با توجه به مطالب ذکر شده، اهمیت این موضوع روشن می‌شود که باید رفتار دینامیکی سازه‌های مختلف در برابر بارهایی که به آنها اعمال می‌گردد، به خوبی مشخص و نوسانات ناخواسته در سازه کنترل شود. با انجام این عمل، پایداری سازه افزایش خواهد یافت. در مطالعات صورت گرفته توسط برخی محققین، نواحی پایداری صفحات مختلف به ازای بارگذاری‌های متفاوت [۳-۵] مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعات ذکر شده، راهی برای کنترل ارتعاشات و بهبود نواحی پایداری سازه ارائه نشده است. برای افزایش پایداری سیستم و کنترل رفتار ارتعاشی و دینامیکی سازه‌ها، محققین سعی کرده‌اند از روش‌هایی استفاده کنند که از کارایی و سرعت عملکرد بالاتری برخوردار است. استفاده از سیالات الکترورنولوژیکی^۲ (ER) و مگنتورنولوژیکی^۳ (MR) از جمله این روش‌ها می‌باشد. اهمیت استفاده از این سیالات در سیستم‌های مختلف این است که وسایل قابل کنترل با استفاده از این مواد تقریباً فاقد قطعات متحرک بوده و نسبت به ایجاد عیوب مکانیکی در آنها

از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار هستند. همچنین، این سیالات هوشمند سرعت عملکرد بالایی در حد میلی ثانیه دارند که اهمیت استفاده از آنها را در حوزه مهندسی افزایش داده است. برخی از کاربردهای سیالات ER در حوزه مهندسی، به کارگیری این سیالات در میراگرهای هوشمند به منظور کنترل ارتعاشات ناشی از زلزله در ساختمان‌ها [۶]، در میراگرهای هوشمند خودرو [۷] و کنترل ارتعاشات سیستم‌های دوار [۸] می‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده در قبل، می‌توان به اهمیت استفاده از سیالات ER و MR در حوزه مهندسی پی برد. این سیالات در سازه‌های مختلف به صورت یک لایه میانی و یا میراگر خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به قابلیت تغییر لزجت این سیالات به ازای اعمال جریان‌های الکتریکی و مغناطیسی مختلف، با استفاده از این مواد می‌توان میرایی سازه را تغییر داد و در نتیجه رفتار دینامیکی آن را کنترل نمود. در برخی از مطالعات انجام شده توسط سایر محققین، رفتار دینامیکی سازه ساندویچی با در نظر گرفتن سیال هوشمند ER به صورت یک لایه میانی مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه، کنگ^۴ و همکاران [۹] ارتعاشات عرضی تیرهای کامپوزیتی با دو لایه ER را به منظور افزایش ظرفیت میرایی، از طریق آزمایش و روش عددی مورد بررسی قرار دادند. یه^۵ و همکاران [۱۰] نواحی پایداری تیر ساندویچی دارای هسته ER و تحت بار دینامیکی محوری را با استفاده از روش‌های المان محدود و روش بالانس هارمونیک^۶ به دست آوردند و تاثیر این لایه هوشمند را روی رفتار پایداری دینامیکی تیر ساندویچی بررسی کردند. همچنین، یه و چن^۷ مطالعات انجام شده بر روی مقاله مربوط به تیر ساندویچی را تعمیم داده و ارتعاشات آزاد [۱۱] و رفتار پایداری دینامیکی [۱۲] صفحات ساندویچی دارای هسته ER را تحلیل نمودند. رضایی پزند و پهلوان [۱۳] پاسخ گذرای تیر ساندویچی سه لایه با هسته ER را با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به منظور مدل سازی ماده ER از مدل ویسکوپلاستیک بینگهام و از مد

⁴ Kang⁵ Yeh⁶ Harmonic balance method⁷ Chen¹ Simitses² Electrorheological fluids³ Magnetorheological fluids

ER و نیز شعاع الکترودها بر روی رفتار نقطه مینیمم نواحی پایداری سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تحلیل‌های مورد نظر، با توجه به این که هنگام ارتعاش سازه، میراگر خارجی هوشمند بخشی از انرژی مکانیکی را به واسطه تغییر خصوصیات لزجت ناشی از تغییرات جریان الکتریکی مستهلک می‌کند، از دامنه ارتعاشات کاسته می‌شود و در نتیجه پایداری سازه افزایش می‌یابد.

۲- فرمول سازی مساله و روش حل

۲-۱- مدل رفتار پس از تسلیم سیال ER

در مدل ویسکوپلاستیک بینگهام، تنش تسلیم سیال ER با میدان الکتریکی در ناحیه پس از تسلیم به صورت زیر تغییر می‌کند (پهلوان و رضایی پزند [۱۵]):

$$\tau_{ER}(E) = \eta \dot{\gamma}_{ER} + \tau_y(E) \quad (1)$$

که τ_{ER} (Pa) و η ($Pa.s$) تنش برشی و لزجت پلاستیک سیال است. $\dot{\gamma}_{ER}$ (s^{-1})، E ($V.mm^{-1}$) و τ_y (Pa) به ترتیب، نرخ برش، میدان الکتریکی و تنش نوسانی^۳ هستند. وقتی که این سیال در یک وسیله هوشمند الکتریکی استفاده می‌شود، مانند یک میراکننده خشک متغیر عمل می‌کند. در این رابطه، تنش نوسانی سیال از رابطه $\tau_y(E) = \alpha E^\beta$ تعیین می‌شود. مقادیر α و β ثابت‌های سیال ER است که به صورت تجربی به دست می‌آید. به عنوان نمونه، مقدار این ثابت‌ها برای سیال ER خاص به ترتیب برابر 427 و 1.2 می‌باشد. لزجت این سیال در غیاب میدان الکتریکی و در دمای اتاق برابر $30 cSt$ ^۴ است.

۲-۲- مدل میراگر خارجی هوشمند ER

نمای شماتیک صفحه فلزی با میراگر خارجی هوشمند و پارامترهای مربوط به میراگر در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، فرض شده است که صفحه تحت بار داخل صفحه $P(t)$ قرار گیرد. در شکل ۱، طول میراگر قبل از تغییر شکل صفحه با L_D نمایش داده شده است. قوس‌های φ و ψ نیز به ترتیب تصویر زوایه میراگر ER در صفحه افقی (xy) و عمودی (yZ) قبل از شروع

برشی سیال هوشمند استفاده نمودند. همچنین، ریحیمی نسب و رضایی پزند [۱۴] فلاتر صفحات ساندویچی ارتوتروپیک با هسته ER را که در معرض جریان هوای مافوق صوت قرار داشت، بررسی کردند. در تحلیل انجام شده، مد برشی و رفتار پیش از تسلیم سیال ER به کار گرفته شد. بر خلاف کار انجام شده در مقاله حاضر، در این مطالعه نواحی پایداری سیستم مورد بررسی قرار نگرفت.

در تعداد بسیار محدودی دیگر از مطالعات انجام شده، سیالات هوشمند ER و MR به صورت یک میراگر خارجی^۱ در سازه استفاده شده است. البته لازم به ذکر است که رفتار دینامیکی این سیالات به تنهایی و بدون در نظر گرفتن آن‌ها در سازه در مقالات زیادی بررسی شده است. در یکی از این مطالعات که توسط پهلوان و رضایی پزند [۱۵] صورت گرفت، تاثیر میراگر خارجی ER در حالت فشاری^۲ برای کنترل ارتعاشات تیر یکسرگیردار مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، در مورد نواحی پایداری تیر هوشمند تحلیلی صورت گرفت.

از بررسی‌های صورت گرفته در کار سایر محققین، ملاحظه می‌شود که تاکنون کمانش دینامیکی صفحه فلزی با میراگر خارجی ER مورد بررسی قرار نگرفته است. در مقاله حاضر، نواحی پایداری صفحه فلزی با میراگر ER با استفاده از روش المان محدود و با در نظر گرفتن رفتار پس از تسلیم و مد فشاری سیال ER (مدل بینگهام) به دست می‌آید، در صورتی که در بسیاری از مطالعات انجام شده توسط سایر محققین، مدل پیش از تسلیم سیال ER و مد برشی آن مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور حل معادله حاکم بر سازه هوشمند و یافتن نواحی پایداری، از روش نیومارک استفاده شده است. لازم به ذکر است که در بررسی کنونی، از برنامه تجاری برای شبیه سازی استفاده نشده و کد نویسی انجام گرفته است. در تحلیل‌های دینامیکی انجام شده، تاثیر پارامترهای مختلفی از قبیل میدان الکتریکی اعمالی به الکترودهای میراگر هوشمند ER و زاویه نصب میراگر نسبت به صفحه روی نواحی پایداری صفحه هوشمند بررسی می‌شود. همچنین، تاثیر فاصله نسبی اولیه الکترودهای میراگر

³ Fluctuating stress

⁴ Centistocks

¹ External damper

² Squeeze mode

$$F_d(t) = F_d^I \dot{\delta}_{Damp}(t) + F_d^{II} \operatorname{sgn}(\dot{\delta}_{Damp}(t))$$

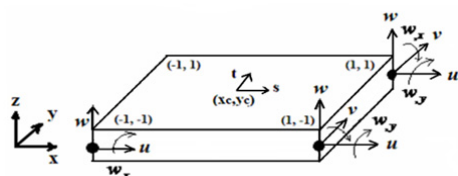
$$F_d^I = \frac{3}{2} \frac{\pi \eta R_{el}^4}{[h_0 + \delta_{Damp}(t)]^3}, \quad (7)$$

$$F_d^{II} = \frac{4}{3} \frac{\pi R_{el}^3}{h_0 + \delta_{Damp}(t)} \tau_y(E), \quad \tau_y(E) = \alpha E^\beta$$

در این روابط، شعاع هر الکترو دایروی می‌باشد و η بیانگر لزجت سیال در غیاب میدان الکتریکی است. h_0 و $\delta_{Damp}(t)$ نیز به ترتیب بیانگر فاصله اولیه الکترودها و سرعت نسبی دو الکترو دایروی می‌باشد. همچنین، مقادیر α و β ثابت‌های سیال ER است که به صورت تجربی به دست می‌آید. $F_d(t)$ بیانگر نیروی میرایی کل و شامل دو بخش است. بخش اول نشان دهنده نیروی میرایی لزج^۱ است که با سرعت نسبی الکترودها رابطه مستقیم دارد. بخش دوم که تابعی از میدان الکتریکی است، نیرویی مقاوم در برابر نوسانات را به وجود می‌آورد و مانند یک نیروی عرضی عمل می‌کند. با این تفاوت که این نیرو با علامت سرعت متناسب است و همواره در خلاف جهت نوسانات به سیستم اعمال می‌شود. در واقع، این جزء مانند یک میراگر خشک عمل می‌کند.

۲-۳- مدل المان محدود سازه هوشمند

در تحلیل‌های المان محدود صورت گرفته در مطالعه حاضر، از یک المان مستطیلی چهار گرهی با پنج درجه آزادی در هر گره مطابق شکل ۲ استفاده شده است. در این شکل، u, v و w به ترتیب بیانگر تغییر مکان در جهات x, y و z می‌باشد. w_x, w_y نیز دوران حول محورهای y و x را نشان می‌دهد. فرض شده است که صفحه از تئوری کلاسیک تبعیت کند.



شکل ۲- المان مستطیلی چهار گرهی و درجات آزادی

نوسانات میراگر می‌باشد. به علاوه، l_w و l_v به ترتیب بیانگر تصاویر L_D در جهات x, y و z است. همچنین، L_D' طول لحظه ای میراگر ER بعد از شروع نوسان میراگر می‌باشد که تصاویر آن در سه صفحه متعامد با l'_w و l'_v و l'_u نشان داده شده است. حرکت میراگر منجر به تغییر زوایای ψ و φ نیز می‌شود که این زوایای جدید با نمادهای ψ' و φ' نمایش داده شده است و در هر لحظه تغییر می‌کند. جابجایی‌های لحظه ای متناظر با نقطه اتصال میراگر به صفحه فلزی در جهات x, y و z به ترتیب با q_u, q_v و q_w مشخص شده است. بر اساس شکل ۱ برای پارامترهای هندسی ذکر شده، می‌توان روابط زیر را نوشت:

$$l_u = L_D \cos \psi \cos \varphi, \quad l_v = L_D \cos \psi \sin \varphi, \quad (2)$$

$$l_w = L_D \sin \psi$$

و

$$l'_u = l_u - q_u, \quad l'_v = l_v - q_v, \quad l'_w = l_w - q_w \quad (3)$$

برای فاصله نسبی بین الکترودهای میراگر $\delta_{Damp}(t)$ می‌توان نوشت:

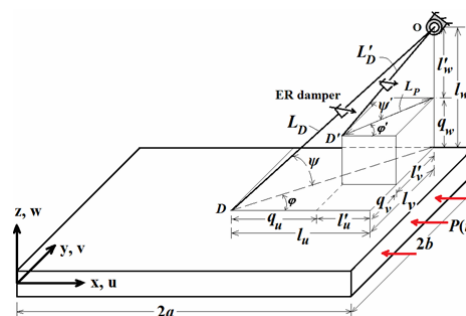
$$\delta_{Damp}(t) = L_D - L_D' \quad (4)$$

که

$$L_P(t) = \sqrt{l_u'^2 + l_v'^2}, \quad L_D'(t) = \sqrt{l_u'^2 + l_v'^2 + l_w'^2} \quad (5)$$

$$\psi'(t) = \tan^{-1} \frac{l'_w}{L_P}, \quad \varphi'(t) = \tan^{-1} \frac{l'_v}{l'_u} \quad (6)$$

که L_P تصویر افقی L_D' می‌باشد. حال می‌توان با استفاده از رابطه زیر، مقدار نیروی اتلافی ناشی از میراگر ER را در حالت فشاری به دست آورد (پهلوان و رضایی پزند [۱۵]):



شکل ۱- نمای شماتیک صفحه فلزی با میراگر خارجی

ER

¹ Viscose damping

$$\tilde{D} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

در روابط بالا، E مدول الاستیسیته و ν ضریب پواسون^۲ می‌باشد. حال با جایگزینی روابط (۸) و (۱۰) در رابطه (۱۱) و معلوم بودن رابطه بین سطح و حجم، ماتریس سفتی مربوط به المان صفحه فلزی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V = \frac{1}{2} \tilde{q}^T [K^{(e)}] \tilde{q} \quad (13)$$

$$[K^{(e)}] = \int_A \left\{ h [R]^T \tilde{D} [R] + \frac{h^3}{12} [S]^T \tilde{D} [S] \right\} dA$$

با صرف‌نظر از اثرات تغییر شکل برشی و اینرسی دورانی، انرژی جنبشی المان صفحه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$T = \frac{1}{2} \int_A \rho h (\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2) dA \quad (14)$$

در این رابطه، ρ دانسیته جرمی و h ضخامت صفحه فلزی می‌باشد. علامت "نقطه" در رابطه (۱۴) بیانگر مشتق نسبت به زمان است. با جایگزینی رابطه (۸) در رابطه قبل، ماتریس جرمی المان صفحه مطابق زیر به دست می‌آید:

$$T = \frac{1}{2} \tilde{q}^T [M^{(e)}] \tilde{q} \quad (15)$$

$$[M^{(e)}] = \int_A \rho h (N_u^T N_u + N_v^T N_v + N_w^T N_w) dA$$

با توجه به شکل (۱) هنگامی که بار داخل صفحه $P(t)$ به سازه اعمال می‌شود، کار انجام شده توسط این بار از رابطه زیر به دست می‌آید (به و چن [۱۲]):

$$W_N = \frac{1}{2} \int_A P(t) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dA \quad (16)$$

با جایگذاری مقدار w از رابطه (۸) در رابطه قبل، این رابطه به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$W = \frac{1}{2} \{q\}^T N(t) [K_g^{(e)}] \{q\} \quad (17)$$

$$[K_g^{(e)}] = \int_A \left[\frac{dN_w}{dx} \right]^T \left[\frac{dN_w}{dx} \right] dA$$

که در آن، $[K_g^{(e)}]$ ماتریس سفتی هندسی^۳ نامیده می‌شود. بر اساس اصل همپلتون^۴ می‌توان نوشت:

برای بردار جابه‌جایی گره‌های المان می‌توان نوشت:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = [N] \{q\} = \begin{bmatrix} N_u \\ N_v \\ N_w \end{bmatrix} \{q\} \quad (8)$$

$\{q\} = \{u, v, w, w_{,y}, w_{,x}\}^T$ که در آن، $[N]$ یک ماتریس 3×20 و q بردار درجات آزادی المان و N_u, N_v, N_w به ترتیب بیانگر توابع شکل متناظر با جابه‌جایی در جهات u, v و w است. همچنین، روابط کرنش-جابه‌جایی را می‌توان برای صفحه فلزی به صورت زیر بیان نمود (رحیمی نسب و رضایی پزند [۱۴]):

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^0\} + z \{\kappa\} = \begin{Bmatrix} u_{,x} \\ v_{,y} \\ u_{,y} + v_{,x} \end{Bmatrix} - z \begin{Bmatrix} w_{,xx} \\ w_{,yy} \\ 2w_{,xy} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

در این روابط، زیرنویس کاما به معنای مشتق جزئی نسبت به x یا y است. با جایگزینی رابطه (۸) در رابطه (۹) و در نظر گرفتن ژاکوبین^۱ تبدیل مختصات $x-y$ به مختصات محلی المان یعنی $s-t$ (شکل (۲)) رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\{\varepsilon^0\} = [R] \{q\}, \quad \{\kappa\} = [S] \{q\} \quad (10)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} 1/a(\partial/\partial s) & 0 & 0 \\ 0 & 1/b(\partial/\partial t) & 0 \\ 1/b(\partial/\partial t) & 1/a(\partial/\partial s) & 0 \end{bmatrix} [N],$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1/a^2(\partial^2/\partial s^2) \\ 0 & 0 & -1/b^2(\partial^2/\partial t^2) \\ 0 & 0 & -2/(ab)(\partial^2/\partial s \partial t) \end{bmatrix} [N]$$

به منظور یافتن معادله حرکت صفحه فلزی تحت بار متناوب داخل صفحه $P(t)$ ، اصل همپلتون اعمال می‌شود. بدین منظور، بایستی انرژی کرنشی (V)، انرژی جنبشی (T) و کار انجام شده توسط نیروهای داخل صفحه (W) به دست آید. رابطه انرژی کرنشی مربوط به صفحه فلزی ناشی از تنش‌های نرمال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon^T \tilde{D} \varepsilon dv \quad (11)$$

که در آن،

² Poisson's ratio

³ Geometric stiffness matrix

⁴ Hamilton's principle

¹ Jacobian

مقاوم در برابر نوسانات را به وجود می‌آورد و مانند یک نیروی عرضی عمل می‌کند. با این تفاوت که این نیرو با علامت سرعت متناسب است و همواره در خلاف جهت نوسانات به سیستم اعمال می‌شود. در واقع، رفتار بخش دوم در رابطه (۷) مشابه رفتار یک میراگر خشک است. با در نظر گرفتن این دو جزء در معادله (۲۰)، این معادله به شکل زیر به دست می‌آید (پهلوان و رضایی پزند [۱۵]):

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C_{ij}^{ER}]\{\dot{q}\} + ([K] - (\lambda_1 P_{cr} + \lambda_2 P_{cr} \cos \omega t))[K_g]\{q\} = -\{F_{ER}\} \quad (23)$$

$$\{F_{ER}\} = [D_{ij}^{ER}] \operatorname{sgn}\{\dot{q}\}$$

که در آن $[C_{ij}^{ER}]$ میرایی ناشی از لزجت سیال ER در گره میانی صفحه متناظر با موقعیت میراکننده است و $[D_{ij}^{ER}]$ بیانگر میرایی اضافی در اثر وجود میدان الکتریکی در سیال ER می‌باشد. بدیهی است که در سایر نقاط گرهی، مولفه های ماتریس های $[C_{ij}^{ER}]$ و $[D_{ij}^{ER}]$ برابر صفر است. مولفه های غیر صفر این دو ماتریس به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{Bmatrix} C_u^{ER} \\ C_v^{ER} \\ C_w^{ER} \end{Bmatrix}_i = F_d^I \times \begin{Bmatrix} \cos \psi' \cos \phi' \\ \cos \psi' \sin \phi' \\ \sin \psi' \end{Bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{Bmatrix} D_u^{ER} \\ D_v^{ER} \\ D_w^{ER} \end{Bmatrix}_i = F_d^{II} \times \begin{Bmatrix} \cos \psi' \cos \phi' \\ \cos \psi' \sin \phi' \\ \sin \psi' \end{Bmatrix}$$

که در این روابط، C_u^{ER} و C_w^{ER} بیانگر مولفه های میرایی لزج^۳ ناشی از سیال ER و D_u^{ER} و D_w^{ER} متناظر با مولفه های میرایی خشک ناشی از نیروی میرایی ER (در شرایط اعمال جریان الکتریکی) به ترتیب در جهات u و w است. بدیهی است که این مولفه های میرایی در نقطه i از صفحه، جایی که میراگر هوشمند با صفحه اتصال دارد، به وجود می‌آید.

۲-۳-۱ حل معادله حرکت

با توجه به رفتار غیر خطی سیال ER در ناحیه پس از تسلیم (مدل بینگهام)، حل معادله حرکت صفحه فلزی با میراگر خارجی ER در این حالت یک مساله مقدار ویژه نخواهد بود.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - V + W) dt = 0 \quad (18)$$

با جایگذاری انرژی جنبشی، انرژی کرنشی و کار انجام شده توسط نیروهای داخل صفحه و نیروی عرضی اعمالی به صفحه در اصل همیلتون، معادله حاکم بر المان صفحه به دست می‌آید:

$$[M^{(e)}]\{\ddot{q}\} + ([K^{(e)}] - P(t)[K_g^{(e)}])\{q\} = \{0\} \quad (19)$$

با سر هم کردن همه المان ها، معادله دینامیکی متناظر با کل صفحه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$[M]\{\ddot{q}\} + ([K] - P(t)[K_g])\{q\} = \{0\} \quad (20)$$

به منظور یافتن نواحی پایداری سازه، معمولا ضرایب مختلفی از بار کمناش استاتیکی سازه به عنوان دامنه بار استاتیکی و یا دامنه بار دینامیکی اعمالی به سازه در نظر گرفته می‌شود. نواحی پایداری سازه، به ازای مقادیر مختلفی از این ضرایب به دست می‌آید. به عبارت دیگر، به کمک هر ضریب بار کمناش استاتیکی، یک نقطه از ناحیه پایداری سازه به دست می‌آید. بدین منظور، فرض شده است که بار متناوب $P(t)$ مطابق رابطه زیر به صفحه اعمال شود:

$$P(t) = \lambda_1 P_{cr} + \lambda_2 P_{cr} \cos \omega t \quad (21)$$

که λ_1 و λ_2 به ترتیب ضرایب بار استاتیکی و دینامیکی، P_{cr} بار کمناش استاتیکی^۱ و ω فرکانس تحریک است. با قرار دادن رابطه (۲۱) در رابطه (۲۰)، معادله حرکت صفحه به شکل زیر تبدیل خواهد شد:

$$[M]\{\ddot{q}\} + ([K] - (\lambda_1 P_{cr} + \lambda_2 P_{cr} \cos \omega t)[K_g])\{q\} = \{0\} \quad (22)$$

رابطه (۲۲) یک معادله متیو-هیل^۲ با ضرایب متناوب می‌باشد که از حل آن نواحی پایداری دینامیکی سازه به دست می‌آید.

در این مرحله می‌توان اثر میراگر خارجی ER را به معادله حرکت صفحه اضافه نمود. بر اساس رابطه (۷) نیروی میرایی کل ناشی از میراگر هوشمند از دو جزء تشکیل شده است. جزء اول که با سرعت نسبی الکترودهای میراگر مرتبط است، به صورت بخشی از ماتریس میرایی در معادله حرکت ظاهر می‌شود. جزء دوم که تابعی از میدان الکتریکی است، نیرویی

¹ Static buckling load

² Mathieu-Hill equation

³ Viscous damping

- نیروی میرایی ناشی از میراگر هوشمند ER برای هر المان $\{F_{ER}^{(e)}\}$ در زمان $t + \Delta t$ به دست می‌آید و سپس برای همه المان‌ها سرهم می‌شود.
 - بار موثر^۴ در زمان $t + \Delta t$ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\{\hat{F}\}_{t+\Delta t} = -\{F_{ER}\}_{t+\Delta t} + [M](c_0 q_t + c_2 \dot{q}_t + c_3 \ddot{q}_t) + [C](c_1 q_t + c_4 \dot{q}_t + c_5 \ddot{q}_t)$$
 - $\tilde{q}_{t+\Delta t}$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$[\hat{K}]\tilde{q}_{t+\Delta t} = \{\hat{F}\}_{t+\Delta t}$$
 - شتاب و سرعت در زمان $t + \Delta t$ از روابط زیر بر اساس شتاب و سرعت در گام زمانی قبلی تعیین می‌شود:

$$\ddot{q}_{t+\Delta t} = c_0 (q_{t+\Delta t} - q_t) - c_2 \dot{q}_t - c_3 \ddot{q}_t$$

$$\dot{q}_{t+\Delta t} = \dot{q}_t + c_6 \ddot{q}_t + c_7 \ddot{q}_{t+\Delta t}$$
- با به کارگیری مراحل ذکر شده در بالا، پاسخ گذرای صفحه به ازای مقادیر مختلف بار داخل صفحه به دست می‌آید. بار پایداری دینامیکی سازه از ترسیم تغییر مکان‌های ماکزیمم صفحه نسبت به دامنه‌های متفاوت بار داخل صفحه حاصل می‌شود.

۳- بحث و بررسی پارامتری

تحلیل‌های دینامیکی انجام شده در این بخش بر روی یک صفحه فلزی با میراگر ER و با شرایط مرزی ساده در چهار طرف آن صورت گرفته است. به منظور دستیابی به نواحی پایداری صفحه فلزی با میراگر خارجی ER، پارامترهای ارائه شده در جدول ۱ استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، فرض می‌شود که بار هارمونیک $P(t)$ به یک لبه صفحه وارد شود. همانطور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، در تحلیل‌های انجام شده به روش المان محدود از یک المان ساندویچی چهار گرهی با پنج درجه آزادی در هر گره استفاده شده است. به منظور همگرایی فرکانس‌های طبیعی سازه، در مدل اجزای محدود صفحه از ۶۴ المان به صورت 8×8 استفاده شد. لازم به ذکر است که در نتایج به دست آمده در این مطالعه، فرکانس تحریک بی بعد به صورت $\bar{\Omega} = \omega a^2 \sqrt{\rho h / D_0}$ در نظر گرفته شده است که در آن $D_0 = E h^3 / 12(1 - \nu^2)$

برای به دست آوردن نواحی پایداری دینامیکی، لازم است که از معادله حرکت (۲۲) انتگرال‌گیری شود تا تغییر مکان‌های گرهی q به صورت تابعی از زمان به دست آید. برای این منظور از روش نیومارک^۱ استفاده شده است. در این روش، کل زمان حل به چندین بازه تقسیم می‌شود و حل، گام به گام صورت می‌گیرد. در هر گام، مقادیر تغییر مکان، سرعت و شتاب بر حسب مقادیر این متغیرها در گام قبلی محاسبه می‌شود (اون و هینتون^۲ [۱۶]). با اعمال این روش به معادله (۲۲)، یک فرمول برگشت پذیر حاصل می‌شود که بردار درجات آزادی q را بر اساس مقادیرش در گام‌های قبلی محاسبه می‌کند. به فرض رابطه (۲۲) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$[M]\ddot{q}_{t+\Delta t} + [C]\dot{q}_{t+\Delta t} + ([K] - P(t+\Delta t)[K_g])q_{t+\Delta t} + \{F_{ER}\}_{t+\Delta t} = \{0\} \quad (25)$$

$$P(t + \Delta t) = \lambda_1 P_{cr} + \lambda_2 P_{cr} \cos(\omega t + \omega \Delta t)$$

مراحل انجام کار را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱. ابتدا، ماتریس‌های $[K]$ ، $[M]$ و $[C]$ به دست می‌آید.
۲. در لحظه $t = 0$ ، \dot{q}_0 با استفاده از q_0 و \dot{q}_0 از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$[M]\ddot{q}_0 = -[C]\dot{q}_0 - ([K] - (\lambda_1 P_{cr} + \lambda_2 P_{cr})[K_g])q_0$$
 با انتخاب $\Delta t = 0.5$ و $\delta = 0.25 \times (0.5 + \delta)^2$ ثابت‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$c_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}, \quad c_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}, \quad c_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}$$

$$c_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right), \quad c_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1, \quad c_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$$

$$c_7 = \delta \Delta t, \quad c_6 = \Delta t(1 - \delta)$$
۳. به ازای هر گام زمانی:
 - ماتریس سفتی موثر^۳ با استفاده از رابطه زیر تشکیل می‌شود:

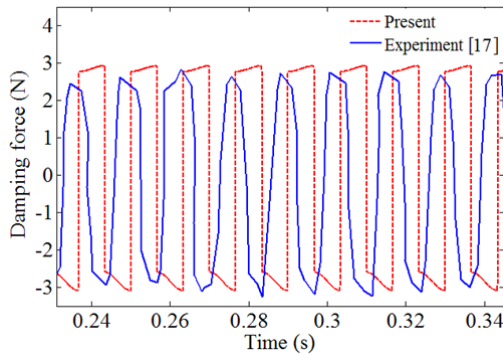
$$[\hat{K}] = [K] - N(t)[K_g] + c_0 [M] + c_1 [C]$$

¹ Newmark scheme

² Owen and Hinton

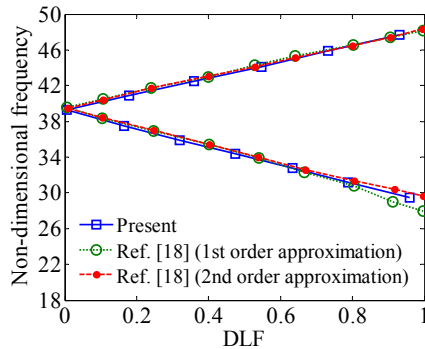
³ Effective stiffness matrix

⁴ Effective load



شکل ۱- مقایسه پاسخ زمانی نیروی منتقل شده توسط میراگر ER

حال، کافی است که صحت کد المان محدود صفحه فلزی تایید شود. بدین منظور، اولین ناحیه پایداری به دست آمده برای صفحه فلزی با نتایج حاصل از کار انجام شده توسط رامچاندرا و پاندا^۲ [۱۸] در شکل ۵ مقایسه شده است. در این شکل، DLF^۳ بیانگر نسبت بارکمانش دینامیکی به بار کمانش استاتیکی سازه می‌باشد و به گونه ای دامنه بار اعمالی به سازه را به صورت بی بعد نشان می‌دهد.



شکل ۵- اولین ناحیه پایداری صفحه فلزی تحت بار هارمونیک بدون در نظر گرفتن میراگر ER

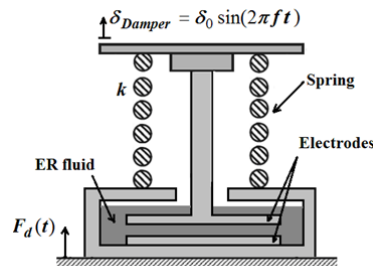
در نواحی پایداری نشان داده شده در شکل ۵، در صورتی که فرکانس تحریک بار هارمونیک اعمالی به صفحه و دامنه بار اعمالی به میزانی باشد که نقطه تلاقی این دو مقدار در

جدول ۱- پارامترهای صفحه فلزی و میراگر ER

Metallic plate	ER fluid [15]
$a = b = 0.5 \text{ m}$	$h_0 = 0.01 \text{ m}$
$h = 0.005 \text{ m}$	$R_{cr} = 0.02 \text{ m}$
$\rho = 2496 \text{ Kg/m}^3$	$\mu = 30 \text{ cSt}$
$E = 68.9 \text{ GPa}$	$\alpha = 427$
$\nu = 0.25$	$\beta = 1.2$

۳-۱- صحت سنجی کد المان محدود

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف روی اولین ناحیه پایداری صفحه فلزی با میراگر ER، ابتدا بایستی صحت روابط به دست آمده در بخش های قبلی مورد تایید قرار گیرد. به علت فقدان مطالعاتی در زمینه پایداری صفحه فلزی با میراگر خارجی ER، مدل میراگر به کار گرفته شده و المان محدود صفحه فلزی برای تحلیل های دینامیکی، هر یک به طور مجزا با مدل های ارائه شده توسط سایر محققین مقایسه می‌گردد. به منظور تایید مدل میراگر ER، یک میراگر هوشمند که بر اساس مد فشاری عمل می‌کند و تحت جابجایی هارمونیک با دامنه $\delta_0 = \pm 40 \mu\text{m}$ و فرکانس $f = 75 \text{ Hz}$ قرار دارد، مطابق شکل ۳ در نظر گرفته می‌شود. نیروی میرایی $F_d(t)$ که توسط میراگر هوشمند به تکیه گاه منتقل می‌شود با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید که پاسخ زمانی این نیرو در شکل ۴ به نمایش گذاشته شده و با نتایج تجربی به دست آمده توسط جانگ^۱ و همکاران [۱۷] مقایسه گردیده است. در این شکل، توافق قابل قبولی بین نتایج عددی و داده های تجربی مشاهده می‌شود.



شکل ۳- نمایش شماتیک میراگر هوشمند در حالت فشاری [۱۷]

² Ramachandra and Panda

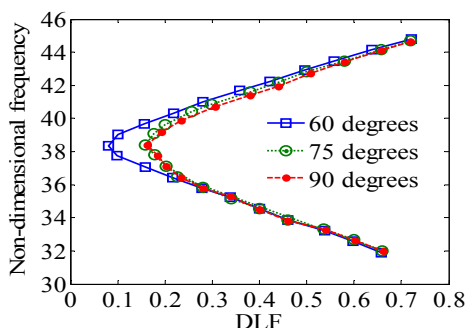
³ Dynamic load factor (DLF)

¹ Jung

اعمالی به الکترودهای میراگر هوشمند، تاثیر چندانی روی تغییرات مرز پایداری سیستم ندارد.

۳-۳- تاثیر زاویه نصب میراگر ER

به منظور بررسی تاثیر زاویه نصب میراگر به صفحه فلزی، زوایای مختلف ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق برای میراگر در نظر گرفته شده است. نواحی پایداری به دست آمده، در شکل ۷ نشان داده شده است. در این حالت، ولتاژ ۰/۱ کیلو ولت به الکترودهای میراگر ER اعمال می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش زاویه میراگر منجر به جابجایی ناحیه پایداری به سمت ضرایب بار دینامیکی (DLF) بالاتر می‌شود و در نتیجه، ناحیه پایداری سیستم افزایش می‌یابد. همچنین، در حالتی که زاویه میراگر نسبت به افق بیشتر از ۷۵ درجه است، مرزهای پایداری مشابه یکدیگر است. به عبارت دیگر، برای نصب میراگر ER به سازه در حدود ۱۵ درجه نسبت به قائم آزادی عمل وجود دارد.



شکل ۷- اولین ناحیه پایداری صفحه فلزی با میراگر ER به ازای زوایای متفاوت نصب میراگر نسبت به افق

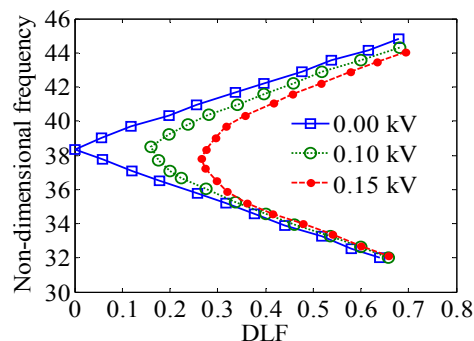
۳-۴- تاثیر شعاع الکترودهای میراگر ER

با توجه به نتایج به دست آمده در بخش‌های قبلی، مشاهده شد که بیشترین تغییرات روی مرز پایداری سیستم در نقطه مینیمم مرز پایداری رخ می‌دهد. به همین دلیل در این بخش، تاثیر مقادیر مختلف شعاع الکترودهای میراگر هوشمند تنها بر روی تغییرات نقطه مینیمم ناحیه پایداری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله در این مرحله به ازای اعمال سه ولتاژ متفاوت ۰/۱۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۰ کیلو ولت به الکترودهای میراگر هوشمند به دست آمده که در شکل ۸ به

قسمت درونی مرز پایداری قرار گیرد، جابجایی‌های ایجاد شده در سازه از حد مجاز فراتر رفته و به اصطلاح، سازه ناپایدار می‌شود. با توجه به این شکل، نزدیکی نتایج به یکدیگر نشان دهنده صحت مدل المان محدود و صحت مراحل انجام شده برای یافتن ناحیه پایداری می‌باشد. پس از تایید کد المان محدود صفحه فلزی با میراگر ER، حال می‌توان تاثیر پارامترهای مختلفی مانند ولتاژ اعمالی به الکترودهای میراگر هوشمند، زاویه نصب میراگر، فاصله نسبی اولیه الکترودها و شعاع الکترودها را روی اولین ناحیه پایداری سازه مورد بررسی قرار داد.

۳-۲- تاثیر اعمال ولتاژ به الکترودهای میراگر ER

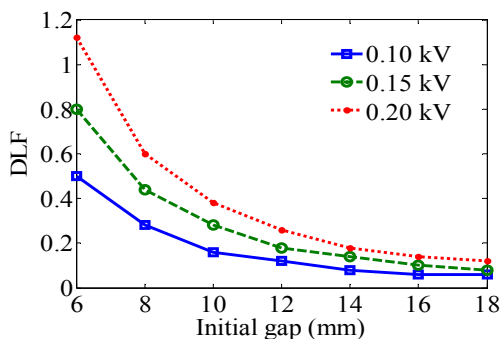
به منظور بررسی تاثیر اعمال ولتاژ ثابت به الکترودهای میراگر ER روی اولین ناحیه پایداری صفحه فلزی با میراگر هوشمند، فرض می‌شود که میراگر به صورت عمودی به نقطه میانی صفحه متصل شده باشد (شکل ۱). نواحی پایداری به دست آمده از این تحلیل به ازای سه ولتاژ اعمالی متفاوت ۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۰ کیلو ولت در شکل ۶ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ولتاژ، پایداری سازه افزایش می‌یابد. در واقع، با افزایش ولتاژ اعمالی به الکترودهای میراگر هوشمند، لزجت سیال ER و به تبع آن میرایی سازه افزایش می‌یابد که این رخداد منجر به کاهش دامنه نوسانات سیستم می‌شود.



شکل ۶- اولین ناحیه پایداری صفحه فلزی با میراگر ER به ازای ولتاژهای اعمالی متفاوت

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، بیشترین اختلاف بین منحنی‌های پایداری در محدوده فرکانس نقطه مینیمم ناحیه پایداری به وجود می‌آید. همچنین، در فرکانس‌های دورتر از فرکانس نقطه مینیمم ناحیه پایداری، ولتاژ

دو الکتروود کمتر باشد، سیستم از پایداری بیشتری برخوردار است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله نسبی اولیه الکتروودها تأثیر میراگر ER کاهش خواهد یافت و برای افزایش پایداری سیستم به ولتاژ بیشتری نیاز است.

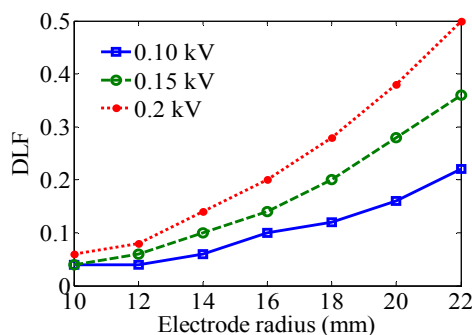


شکل ۹- تأثیر فاصله نسبی اولیه الکتروودها در میراگر ER روی تغییرات نقطه مینیمم اولین ناحیه پایداری

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل المان محدود صفحه فلزی با میراگر خارجی ER به منظور تعیین نواحی پایداری صفحه هوشمند ارائه شد. در واقع، استفاده از میراگر خارجی ER منجر به بهبود و افزایش پایداری دینامیکی صفحه فلزی گردید. نتایج تحلیل‌های دینامیکی نشان می‌دهد که با اعمال میراگر هوشمند به سازه، پایداری سازه افزایش می‌یابد. البته، پارامترهای مختلفی مانند شدت ولتاژ اعمالی به الکتروودهای میراگر ER، فاصله نسبی اولیه این الکتروودها و شعاع آن‌ها تأثیر بسزایی روی تغییرات پایداری سازه دارد. به عبارت دیگر، هر چه شدت ولتاژ اعمالی به الکتروودها و یا شعاع الکتروودها بیشتر در نظر گرفته شود، پایداری بیشتری در رفتار دینامیکی سازه مشاهده خواهد شد و سازه دچار جابجایی‌های فراتر از حد مجاز نمی‌گردد. این در حالی است که افزایش فاصله نسبی اولیه الکتروودهای میراگر هوشمند، منجر به کاهش پایداری سازه می‌گردد. بنابراین با کم کردن این فاصله در حالت اولیه ی شروع نوسانات، می‌توان پایداری سازه را افزایش داد. اما، باید توجه داشت که این کاهش در حدی نباشد که در اثر نوسانات صفحه فلزی، الکتروودهای میراگر ER به یکدیگر برخورد کنند. بنابراین، در طراحی سازه هوشمند بایستی اثر همه پارامترها با هم در نظر گرفته شود و

تصویر کشیده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع الکتروود، نقطه مینیمم ناحیه پایداری به سمت ضرایب کماتش دینامیکی بالاتر میل می‌کند. این بدان معناست که با افزایش شعاع الکتروود، ظرفیت تحمل بار توسط سازه افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که در ولتاژهای بالاتر، این ظرفیت تحمل بار بیشتر است. دلیل این رویداد این است که به ازای اعمال ولتاژهای بالاتر به الکتروودهای میراگر هوشمند، انرژی اتلافی ناشی از این میراگر بیشتر است. این انرژی اتلافی صرف غلبه بر نوسانات دینامیکی سازه می‌شود. به این ترتیب، پایداری سازه افزایش می‌یابد.



شکل ۸- تأثیر شعاع الکتروود میراگر ER روی تغییرات نقطه مینیمم اولین ناحیه پایداری

۳-۵- تأثیر فاصله نسبی اولیه الکتروودها در میراگر ER

هنگامی که میراگر ER به صورت فشاری^۱ عمل می‌کند، فاصله نسبی اولیه بین الکتروودهای میراگر تأثیر بسزایی روی نواحی پایداری سازه دارد. به منظور بررسی تأثیر این پارامتر روی نواحی پایداری صفحه فلزی، فاصله‌های نسبی اولیه بین دو الکتروود مقادیری بین ۶ تا ۱۸ میلی‌متر با گام ۲ در نظر گرفته شده است. مشابه بخش قبلی، ولتاژ اعمالی به الکتروودها در این حالت نیز برابر ۱۰/۰ کیلو ولت فرض شده است. نتایج حاصل از این تحلیل با در نظر گرفتن سه ولتاژ اعمالی متفاوت به الکتروودها، در شکل ۹ به نمایش گذاشته شده است. به وضوح می‌توان دید که هر چه فاصله اولیه بین

^۱ Squeeze mode

مراجع

[1] Simitse GJ (1987) Stability of dynamically loaded structures. *Appl Mech Rev* 40(10): 1403–1408.

[2] Moorthy J, Reddy JN (1990) Parametric instability of laminated composite plates with transverse shear deformation. *Int J Solids Struct* 26: 801–811.

[3] Gur GA, Simonetta SR (1997) Dynamic pulse buckling of rectangular composite plates. *Composites Part B*, 28B: 301–308.

[4] Honig A, Stronge WJ (2000) Dynamic buckling of an imperfect elastic, visco-plastic plate. *Int J Impact Eng* 24: 907–923.

[5] Tao Z, Tu-guang L, You-lun X, Wei-heng Z (2004) Dynamic buckling of stiffened plates under fluid-solid impact load. *J Appl Math Mech* 25(7): 827–835.

[6] Makris N, Burton SA, Hill D, Jordan M (1996) Analysis and design of ER damper for seismic protection of structures. *J Eng Mech* 122: 1003–1011.

[7] Sung KG, Han YM, Cho JW, Choi SB (2008) Vibration control of vehicle ER suspension system using fuzzy moving sliding mode controller. *J Sound Vib* 311: 1004–1019.

[8] Patil SS, Gawade SS, Patil SR (2011) Electrorheological fluid damper for vibration reduction in rotary system. *Int J Fluids Eng* 3(3): 325–333.

[9] Kang YK, Kim J, Choi SB (2001) Passive and active damping characteristics of smart electro-rheological composite beams. *Smart Mater Struct* 10: 724–729.

[10] Yeh JY, Chen LW, Wang CC (2004) Dynamic stability of a sandwich beam with a constrained layer and electrorheological fluid core. *Compos Struct* 64: 47–54.

[11] Yeh JY, Chen LW (2004) Vibration of a sandwich plate with a constrained layer and electrorheological fluid core. *Compos Struct* 65: 251–258.

[12] Yeh JY, Chen LW (2005) Dynamic stability of a sandwich plate with a constraining layer and electrorheological fluid core. *J Sound Vib* 285: 637–652.

[13] Rezaeepazhan J, Pahlavan L (2009) Transient response of sandwich beams with electrorheological core. *J Intell Mater Syst Struct* 20: 171–179.

[14] Rahiminasab J, Rezaeepazhand J (2013) Aeroelastic stability of smart sandwich plates with electrorheological fluid core and orthotropic faces. *J Intell Mater Syst Struct* 24(5): 669–677.

[15] Pahlavan L, Rezaeepazhand J (2007) Dynamic response analysis and vibration control of a

بهترین حالت برای شعاع الکتروود و فاصله اولیه الکترودهای میراگر ER انتخاب گردد.

علائم و نشانه‌ها

ابعاد صفحه	a, b
ضخامت صفحه	h
فاصله نسبی اولیه الکترودها	h_0
تصاویر L_D در سه راستای α, γ و z	l_w و l_v, l_u
تصاویر L'_D در سه راستای α, γ و z	l'_w و l'_v, l'_u
جابجایی های نقطه اتصال میراگر به صفحه	q_w و q_v, q_u
جابجایی در سه راستای α, γ و z	w و v, u
جابجایی های نقطه اتصال میراگر به صفحه	q_w و q_v, q_u
ماتریس میرایی	[C]
مولفه های میرایی لژ در جهات v, u, w و ناشی از میراگر خارجی	C_w^{ER} و C_v^{ER}, C_u^{ER}
ماتریس میرایی وابسته به میدان	[D ^{ER}]
معادل میرایی کولمب ناشی از میراگر ER	D_v^{ER}, D_u^{ER}
مولفه های میرایی کولمب در جهات v, u و w ناشی از میراگر ER	D_w^{ER}
مدول الاستیسیته یا میدان الکتریکی	E
نیروی میرایی کل	$F_d(t)$
ماتریس سختی کل	[K]
طول میراگر ER قبل از بارگذاری	L_D
طول آنی میراگر ER	L'_D
تصویر افقی L'_D	L_P
ماتریس جرمی کل	[M]
خصوصیات ذاتی سیال ER	β و α
فاصله آنی نسبی بین الکترودهای میراگر	$\delta_{Damper}(t)$
زاویه افقی نصب میراگر	φ
زاویه قائم نصب میراگر	ψ
تنش برشی وابسته به میدان	τ_E
تنش برشی مستقل از میدان	τ_{NE}
زوایای آنی میراگر ER	φ' و ψ'
کرنش برشی	$\tilde{\gamma}$
نرخ کرنش	$\dot{\gamma}$
نسبت پواسان	ν

- [17] Jung WJ, Jeong WB, Hong SR, Choi SB (2004) Vibration control of a flexible beam structure using squeeze-mode ER mounts. *J Sound Vib* 273: 185–199.
- [18] Ramachandra LS, Panda SK (2012) Dynamic instability of composite plates subjected to non-uniform in-plane loads. *J Sound Vib* 331: 53–65.
- cantilever beam with a squeeze-mode electrorheological damper. *Smart Mater Struct* 16: 2183–2189.
- [16] Owen DRJ, Hinton E (1980) *Finite elements in plasticity: Theory and practice*. Pineridge Press. Swansea.