ISAV2024
چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران
دانشگاه خوارزمی
انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران

تحلیل و شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌های چند درجه آزادی دارای جداساز لرزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار متلب

محمدعادل کرمانی[آ]، سید مهدی زهرائی[ب*]

[آ] ایران، تهران، دانشگاه شاهد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشجوی دکتری

[ب] ایران، تهران، دانشگاه تهران، دانشکدگان فنی و مهندسی، استاد.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: *mzahrai@ut.ac.ir*

چکیده

یکی از انواع مسائلی که در علم دینامیک سازه‌ها مطرح می‌گردد، تحلیل دینامیکی سازه‌های چند درجه آزادی می‌باشد. به منظور تحلیل دینامیکی این نوع سازه‌ها از روش‌های متداول تحلیل دینامیکی ارائه شده در مراجع استفاده می‌گردد. محاسبه‌ی فرکانس‌های زاویه‌ای سازه، دوره تناوب‌های سازه و نیز تعیین اَشکال مودی ارتعاشی متناظر با آن‌ها از مهمترین اهداف تحلیل سازه‌های چند درجه آزادی می‌باشد. همچنین، شبیه‌سازی دینامیکی سازه تحت تحریک تکیه‌گاهی زلزله می‌تواند بینش و درکی مناسب از رفتار سازه هنگام وقوع زلزله ایجاد کند. در نتیجه، شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌ها برای مهندسین عمران اهمیت بالایی دارد. در طول دهه‌های اخیر، استفاده از جداسازهای لرزه‌ای به منظور کاهش پاسخ‌های سازه تحت تحریک تکیه‌گاهی زلزله کاربردهای فراوانی داشته است. جداساز لرزه‌ای در یک ساختمان باعث ایجاد تغییرات خاصی در ویژگی‌های دینامیکی ساختمان می‌گردد. این تغییرات سبب کاهش پاسخ‌های دینامیکی سازه تحت تحریک زلزله می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که تحلیل دینامیکی ساختمان‌های دارای جداساز لرزه‌ای در مهندسی عمران از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی، حجم محاسبات سازه‌های چند درجه آزادی به ویژه در مواقعی که تعداد درجات آزادی سازه زیاد باشد به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. بنا بر دلایل عنوان شده، در این پژوهش برنامه‌هایی کاربردی به منظور تحلیل و شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌های چند درجه آزادی دارای جداساز لرزه‌ای در نرم‌افزار متلب نوشته شده است. این برنامه‌ها مشخصات سازه، جداساز و نیز شتاب زلزله‌ی وارد بر سازه را در قالب فایل‌های ورودی از کاربر گرفته و سپس تحلیل دینامیکی و شبیه‌سازی دینامیکی سازه را انجام می‌دهند. در پایان، نتایج مهم تحلیل دینامیکی سازه نیز توسط برنامه‌ها ارائه می‌گردد.

کلمات کلیدی: جداسازی لرزه‌ای؛ تحلیل مودال سازه‌ی چند درجه آزادی؛ پاسخ‌های دینامیکی سازه‌ی چند درجه آزادی تحت بارگذاری لرزه‌ای؛ شبیه‌سازی دینامیکی.

۱- مقدمه

جداسازی لرزه‌ای با قرار دادن یک اتصال انعطاف‌پذیر بین زمین و سازه ایجاد می‌شود و معمولاً با مکانیزمی برای اتلاف قابل توجه انرژی لرزه‌ای همراه است. جداسازی لرزه‌ای باعث افزایش دوره تناوب اصلی سازه‌ی جداسازی شده و میرایی مؤثرتر آن می‌شود که به کاهش پاسخ روسازه و برش پایه در مقایسه با یک سازه با پی ثابت می‌انجامد. به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری سازه‌ی جداسازی شده، جابجایی کلی ساختمان جداسازی شده در مقایسه با جابجایی کلی ساختمان با پی ثابت بیشتر می‌شود و در جهت کاهش این جابجایی از افزایش میرایی سیستم جداسازی کمک گرفته می‌شود. قسمت عمده‌ی تقاضای جابجایی در جداسازهای انعطاف‌پذیر رخ می‌دهد و تغییرشکل‌های انتقال یافته به روسازه محدود هستند[۱].

به طور کلی، می‌توان انتظار داشت که سازه‌های جداسازی شده سطح عملکردی بالا و دور از خسارت را ارائه دهند، که اغلب فراتر از حداقل عملکرد مورد نیاز آئین‌نامه‌های ساختمانی و سطح عملکرد بسیاری از سیستم‌های سازه‌ای معمول است. این امر به این دلیل امکان‌پذیر است که سازه‌های جداسازی شده قادر به کاهش همزمان شتاب (نیرو) وارد شده به روسازه و محتویات ساختمان و جابجایی‌های نسبی میان طبقه‌ای در روسازه هستند[۱].

طیف گسترده‌ای از مسائل دینامیک سازه‌ها در رابطه با تحلیل دینامیکی سازه‌های با تعداد درجات آزادی محدود می‌باشد. در واقعیت، سازه‌ها دارای بی‌نهایت درجات آزادی هستند. اما در ساختمان‌های با قاب خمشی متعارف (ساختمان‌های برشی) در صورتی که سقف‌های ساختمان از صلبیت کافی برخوردار باشند، می‌توان این ساختمان‌ها را با یک سازه با تعداد درجات آزادی محدود مدل‌سازی نمود؛ به طوری که تغییر مکان‌های جانبی سقف‌ها به عنوان درجات آزادی اصلی در نظر گرفته می‌شوند. در مراجع گوناگونی از جمله مراجع [۲]، [۳] و [۴] به تحلیل دینامیکی سازه‌های چند درجه آزادی با درجات آزادی محدود پرداخته شده است.

با توجه به کاربرد جداسازهای لرزه‌ای در ساختمان‌های برشی، تحلیل دینامیکی سازه‌های دارای سیستم جداسازی لرزه‌ای و به دست آوردن پاسخ‌های آن‌ها تحت تحریک زلزله از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در مراجع [۵]، [۶] و [۷] روش تحلیل دینامیکی سازه‌های دارای سیستم جداسازی لرزه‌ای تشریح شده است. نمونه‌هایی از تحلیل دینامیکی سازه‌های دارای جداساز لرزه‌ای در مراجع [۸]، [۹] و [۱۰] ارائه شده است. در تحلیل دینامیکی این نوع سازه‌ها حجم محاسبات به ویژه در مواقعی که تعداد درجات آزادی سازه زیاد باشد به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. به همین دلیل، در این پژوهش برنامه‌هایی کاربردی به منظور تحلیل و شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌های چند درجه آزادی دارای جداساز لرزه‌ای در نرم‌افزار متلب نوشته شده است. این برنامه‌ها مشخصات سازه و جداساز و نیز شتاب زلزله‌ی وارد بر سازه را در قالب فایل‌های ورودی از کاربر گرفته و سپس تحلیل دینامیکی و شبیه‌سازی دینامیکی سازه را انجام می‌دهند. پس از تحلیل دینامیکی، نتایج تحلیل شامل فرکانس‌های زاویه‌ای، دوره تناوب‌ها، اَشکال مودی ارتعاشی سازه و پاسخ‌های جابجایی طبقات سازه در قالب فایل‌هایی با فرمت دلخواه کاربر (نظیر png، emf و یا pdf) توسط برنامه‌ها ارائه می‌گردد.

۲- تحلیل دینامیکی سازه‌ی چند درجه آزادی دارای جداساز لرزه‌ای

با دو رویکرد (روش) متفاوت می‌توان تحلیل مودال یک سازه‌ی چند درجه آزادی دارای جداساز را انجام داده و فرکانس‌های زاویه‌ای، دوره تناوب‌ها و نیز اَشکال مودی ارتعاشی آن را به دست آورد. در این پژوهش، برنامه‌هایی کاربردی به منظور تحلیل و شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌ی چند درجه آزادی دارای جداساز با هر دو روش ارائه می‌گردد. در بخش‌های ۲-۱ و ۲-۲، فرمول‌بندی دو روش تحلیل و در بخش ۲-۳، روش تعیین میرایی‌های مودال سازه‌ی چند درجه آزادی دارای جداساز بیان می‌گردد.

۲-۱ *رویکرد اول (روش تقریبی)*

ابتدا، ضرایب مشارکت مودهای سازه با پی ثابت، L_i، با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شوند:

$$L_i = \frac{\underline{\phi}^{i^T}\mathbf{M}\mathbf{r}}{\underline{\phi}^{i^T}\mathbf{M}\underline{\phi}^{i}} = \frac{\underline{\phi}^{i^T}\mathbf{r}}{\underline{\phi}^{i^T}\underline{\phi}^{i}} \quad i = 1,2,\dots,N \qquad (۱)$$

که در رابطه‌ی (۱)، $\underline{\phi}^i$ مود شکلی iام سازه با پی ثابت، $\mathbf{M}$ ماتریس جرم سازه با پی ثابت و $\mathbf{r}$ بردار واحد ستونی می‌باشد. از طرفی، جرم مودی مود iام سازه با پی ثابت، M_i، با استفاده از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید:

$$M_i = \underline{\phi}^{i^T} \mathbf{M} \underline{\phi}^i \qquad (۲)$$

سپس، نسبت‌های جرمی اصلاح شده، γ_i، با استفاده از رابطه‌ی (۳) تعیین می‌گردند.

$$\gamma_i = \frac{L_i^2 M_i}{(m + m_b)} \quad i = 1,2,\dots,N \qquad (۳)$$

که در رابطه‌ی (۳)، L_i ضریب مشارکت مود iام سازه با پی ثابت، M_i جرم مودی مود iام سازه با پی ثابت، m جرم کل سازه (مجموع جرم طبقات سازه بدون احتساب جرم پی) و m_b جرم پی می‌باشد. با جایگذاری روابط (۱) و (۲) در رابطه‌ی (۳) و ساده‌سازی، رابطه‌ی (۴) برای γ_i به دست می‌آید:

$$\gamma_i = \frac{\left(\underline{\phi}^{i^T} \mathbf{M} \mathbf{r}\right)^2}{\left(\underline{\phi}^{i^T} \mathbf{M} \underline{\phi}^i\right)(m + m_b)} \quad i = 1,2,\dots,N \qquad (۴)$$

در صورتی که $\frac{\omega_i^2}{\omega_b^2} \gg 1$، آنگاه فرکانس زاویه‌ای اصلی سازه‌ی جداسازی شده، ω_b^*، با استفاده از رابطه‌ی (۵) تعیین می‌گردد:

$$(\omega_b^*)^2 = (\omega_b)^2 \left[1 - \sum_{i=1}^{N} \left(\gamma_i \frac{{\omega_b}^2}{{\omega_i}^2}\right)\right] \qquad (۵)$$

که در رابطه‌ی (۵)، ω_b فرکانس زاویه‌ای سیستم جداساز، γ_i نسبت جرمی اصلاح شده مود iام سازه با پی ثابت و ω_i فرکانس زاویه‌ای مود iام سازه با پی ثابت می‌باشد. در ادامه، فرکانس‌های زاویه‌ای مودهای بالاتر سازه‌ی جداسازی شده، ω_k^*، با استفاده از رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود:

$$(\omega_k^*)^2 = \frac{(\omega_k)^2}{1 - \gamma_k \left\{ \dfrac{1}{1 - (1 - \gamma_k)\left(\dfrac{\omega_b}{\omega_k}\right)^2 - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{N} \dfrac{\gamma_i}{\left[1 - \left(\dfrac{\omega_i}{\omega_k}\right)^2 (1 - \gamma_k)\right]}} \right\}} \quad k = 1,2,\dots,N \qquad (۶)$$

سپس، بردارهای ویژه، $\bar{q}_i$، با استفاده از رابطه‌ی (۷) به دست می‌آیند:

$$\bar{q}_i(\omega_j^*) = q_i^j = \frac{(\omega_j^*)^2 L_i}{-(\omega_j^*)^2 + (\omega_i)^2} \quad i = 1 \; to \; N \quad j = 0,1,\dots,N \qquad (۷)$$

نهایتاً، اَشکال مودی ارتعاشی سازه‌ی چند درجه آزادی با پی جداسازی شده، $\underline{\psi}^{j+1}$، مطابق با رابطه‌ی (۸) تعیین می‌گردند:

$$\underline{\psi}^{j+1^T} = \left\{1,1 + \sum_{i=1}^{N} q_i^j \phi_1^i, 1 + \sum_{i=1}^{N} q_i^j \phi_2^i, \dots, 1 + \sum_{i=1}^{N} q_i^j \phi_N^i\right\} \quad j = 0,1,\dots,N \qquad (۸)$$

۲-۲ *رویکرد دوم (روش دقیق)*

معادله‌ی حاکم بر سیستم سازه با پی جداسازی شده به فرم رابطه‌ی (۹) نوشته می‌شود:

$$\mathbf{M}^*\ddot{\mathbf{v}}^* + \mathbf{C}^*\dot{\mathbf{v}}^* + \mathbf{K}^*\mathbf{v}^* = -\mathbf{M}^*\mathbf{r}^*\ddot{u}_g \qquad (۹)$$

در رابطه‌ی (۹)، $\mathbf{M}^*$ ماتریس جرم سیستم جداسازی شده، $\mathbf{C}^*$ ماتریس میرایی سیستم جداسازی شده، $\mathbf{K}^*$ ماتریس سختی سیستم جداسازی شده، $\ddot{\mathbf{v}}^*$ بردار شتاب سیستم جداسازی شده، $\dot{\mathbf{v}}^*$ بردار سرعت سیستم جداسازی شده، $\mathbf{v}^*$ بردار جابجایی سیستم جداسازی شده، $\mathbf{r}^*$ بردار واحد سیستم جداسازی شده و $\ddot{u}_g$ معرّف شتاب زمین تحت تحریک زلزله می‌باشد. به طوری که، پارامترهای اصلی رابطه‌ی (۹) به صورت مجموعه روابط (۱۰) تعریف می‌گردند:

$$\mathbf{M}^* = \begin{bmatrix} m+m_b & \mathbf{r}^T\mathbf{M} \\ \mathbf{Mr} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}^* = \begin{bmatrix} k_b & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{K} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}^* = \begin{bmatrix} c_b & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}^* = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \mathbf{v}^* = \begin{bmatrix} v_b \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} \qquad (۱۰)$$

در روابط (۱۰)، m جرم کل سازه (مجموع جرم طبقات سازه بدون احتساب جرم پی)، m_b جرم پی، k_b سختی جانبی سیستم جداساز در تراز پی، c_b میرایی جانبی سیستم جداساز در تراز پی (در صورت وجود)، v_b جابجایی دالِ پی نسبت به زمین، $\mathbf{M}$ ماتریس جرم سیستم جداسازی نشده، $\mathbf{K}$ ماتریس سختی سیستم جداسازی نشده، $\mathbf{C}$ ماتریس میرایی سیستم جداسازی نشده، $\mathbf{v}$ بردار جابجایی طبقات سازه‌ی جداسازی شده نسبت به دال پی، $\mathbf{r}$ بردار ستونی واحد و $\mathbf{0}$ بردار ستونی صفر می‌باشد.

حال، با داشتن ماتریس سختی $\mathbf{K}^*$ و ماتریس جرم $\mathbf{M}^*$، مسئله‌ی مقدار ویژه به فرم رابطه‌ی (۱۱) تعریف می‌گردد:

$$(\mathbf{K}^* - (\omega_i^*)^2\mathbf{M}^*)\underline{\psi}^i = 0 \quad i = 1,2,\dots,N+1 \qquad (۱۱)$$

به منظور محاسبه‌ی فرکانس‌های زاویه‌ای سازه‌ی جداسازی شده، معادله‌ی مشخصه به فرم (۱۲) تشکیل می‌شود:

$$|\mathbf{K}^* - (\omega^*)^2\mathbf{M}^*| = 0 \qquad (۱۲)$$

با حل معادله‌ی مشخصه‌ی (۱۲)، فرکانس‌های زاویه‌ای سازه‌ی جداسازی شده به دست می‌آیند. پس از تعیین فرکانس‌های زاویه‌ای، با استفاده از رابطه‌ی (۱۱) اَشکال مودی نیز به دست آورده می‌شوند. به منظور حل معادله‌ی (۱۱) می‌توان مقدار ψ_1^i را برابر با واحد فرض کرده و سایر مؤلفه‌های $\underline{\psi}^i$ را به دست آورد.

۳-۲ *میرایی‌های مودال سازه‌ی چند درجه آزادی دارای جداساز لرزه‌ای*

به منظور تعیین پاسخ‌های جابجایی طبقات سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای، لازم است که میرایی‌های مودال سازه‌ی دارای جداساز در تمامی مودهای ارتعاشی محاسبه گردد. با استفاده از رابطه‌ی (۱۳)، می‌توان میرایی‌های مودال سازه‌ی دارای جداساز، β_i^*، را تعیین نمود.

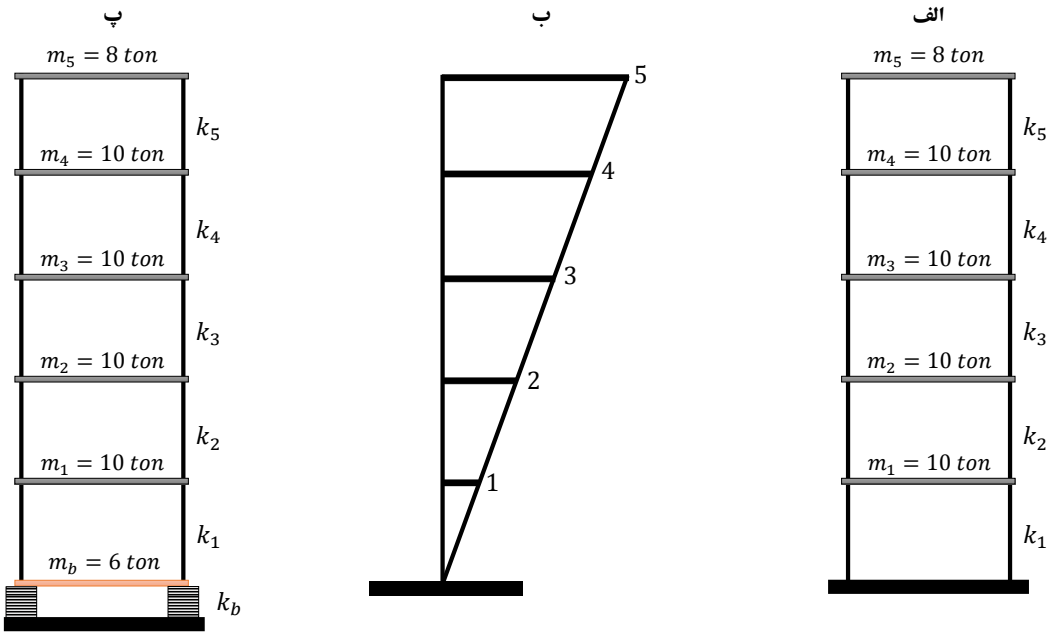
$$2\omega_i^*\beta_i^* = \frac{\underline{\psi}^{iT}\mathbf{C}^*\underline{\psi}^i}{\underline{\psi}^{iT}\mathbf{M}^*\underline{\psi}^i} \quad 1,2,\dots,N+1 \qquad (۱۳)$$

در رابطه‌ی (۱۳)، ω_i^* فرکانس‌های زاویه‌ای سیستم جداسازی شده، β_i^* میرایی‌های مودال سیستم جداسازی شده و $\underline{\psi}^i$ اَشکال مودی سیستم جداسازی شده می‌باشد. به طور معمول، مکانیزم میرایی سازه‌ی چند درجه آزادی از نوع میرایی کلاسیک در نظر گرفته می‌شود. متداول‌ترین مدل میرایی کلاسیک معرفی شده در مراجع، مدل رایلی می‌باشد. لذا، در این پژوهش به جهت تولید ماتریس میرایی سازه‌ی چند درجه آزادی از مدل رایلی استفاده می‌گردد. توجه شود که مطابق با مراجع [۳] و [۴]، ماتریس میرایی یک سازه‌ی چند درجه آزادی دارای جداساز از نوع غیر کلاسیک می‌باشد. به منظور تشکیل ماتریس میرایی سیستم دارای جداساز، ابتدا ماتریس میرایی کلاسیک برای خود سازه تشکیل داده شده و سپس مشارکت میرایی جداساز در نظر گرفته می‌شود تا نهایتاً ماتریس میرایی کل سیستم به دست آید. لازم به ذکر است که در ماتریس میرایی سیستم دارای جداساز باید اصلاحاتی انجام شود تا برای میرایی‌های مودال سیستم جداسازی شده مقادیری صحیح و منطقی به دست آیند. نمونه‌ای از این اصلاحات در مراجع [۱۱] و [۱۲] ارائه شده است.

۳- مثال عددی

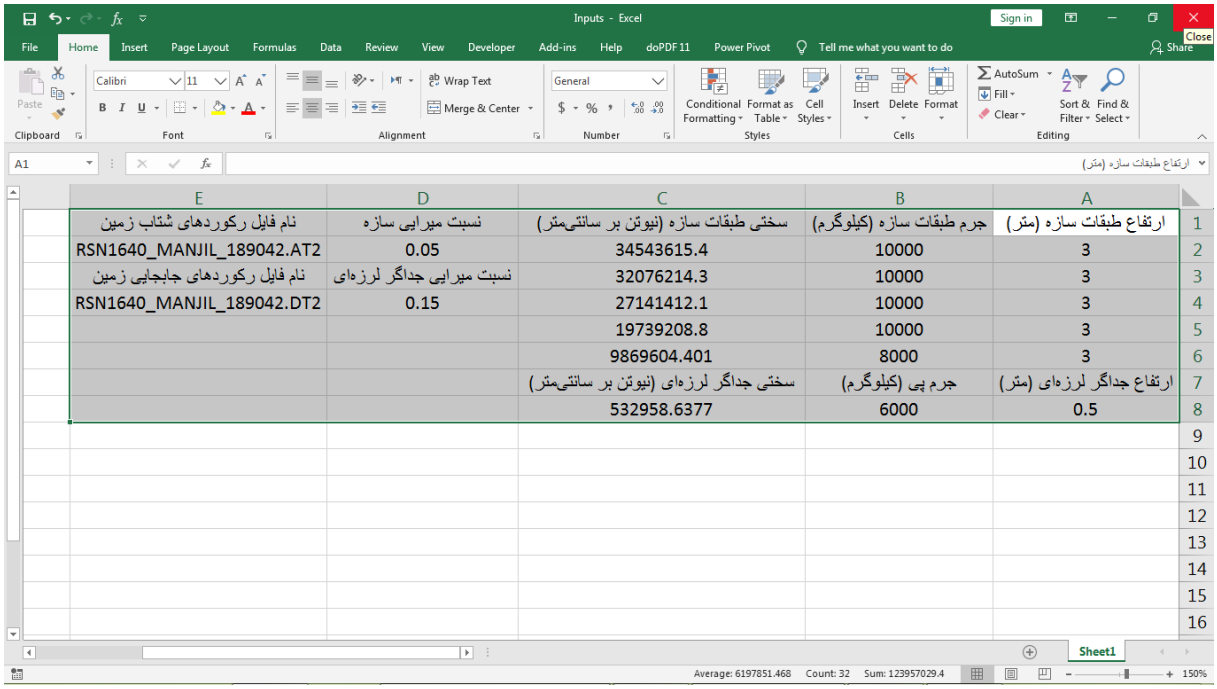
یک ساختمان برشی ۵ طبقه‌ی دلخواه مطابق با شکل (۱) در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌گردد که دوره تناوب اصلی سازه (در وضعیت پی ثابت) برابر با ۰/۴ ثانیه می‌باشد. همچنین، فرض می‌شود که سازه به گونه‌ای طراحی شده است که مود ارتعاشی اصلی سازه

از تئوری تغییرشکل‌های یکنواخت تبعیت کرده و به صورت یک خط راست است. برای سازه‌ی مذکور یک جداساز با دوره تناوب ۲ ثانیه در نظر گرفته شده است. هدف از طرح این مثال، ارزیابی برنامه‌های نوشته شده در نرم‌افزار متلب به منظور تحلیل و شبیه‌سازی دینامیکی یک سازه‌ی چند درجه آزادی دلخواه می‌باشد.



شکل ۱– الف) مدل سازه با پی ثابت ب) شکل مود ارتعاشی اول سازه با پی ثابت پ) مدل سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای

مطابق با شکل (۲)، ابتدا باید یک فایل ورودی حاوی اطلاعات سازه، جداساز لرزه‌ای و زلزله با استفاده از نرم‌افزار اکسل توسط کاربر ساخته شده و با نام Inputs در محلی که برنامه‌ی متلب قرار دارد ذخیره گردد.

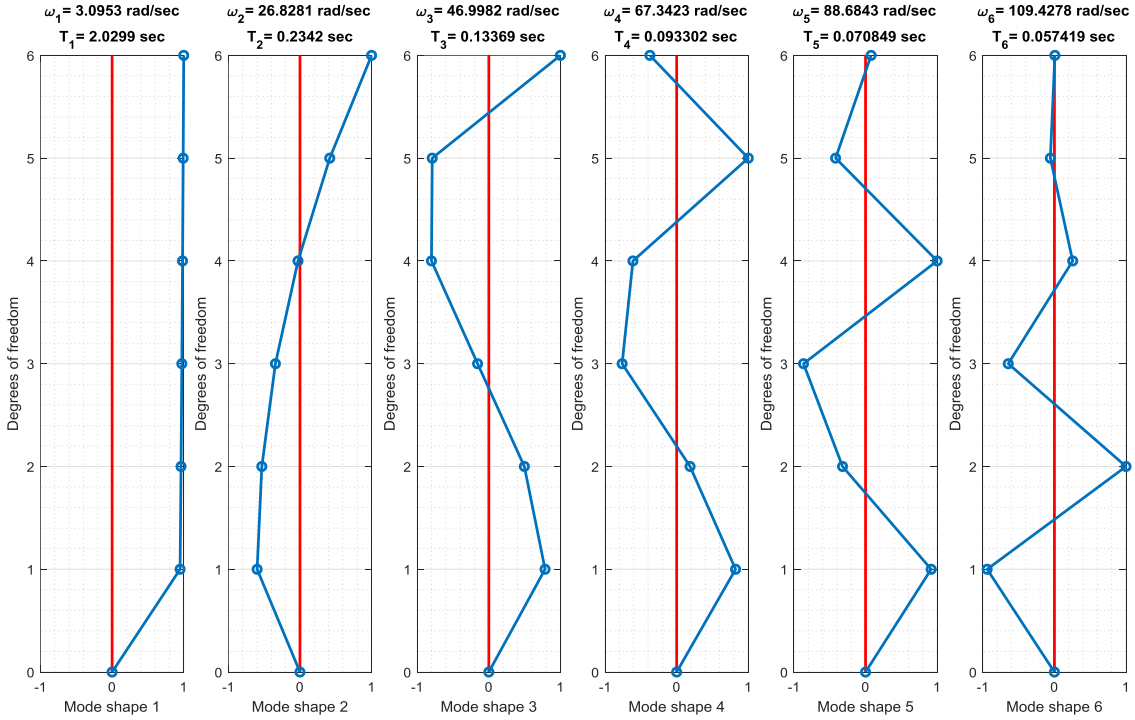


A	B	C	D	E
ارتفاع طبقات سازه (متر)	جرم طبقات سازه (کیلوگرم)	سختی طبقات سازه (نیوتن بر سانتی‌متر)	نسبت میرایی سازه	نام فایل رکوردهای شتاب زمین
3	10000	34543615.4	0.05	RSN1640_MANJIL_189042.AT2
3	10000	32076214.3	نسبت میرایی جداگر لرزه‌ای	نام فایل رکوردهای جابجایی زمین
3	10000	27141412.1	0.15	RSN1640_MANJIL_189042.DT2
3	10000	19739208.8		
3	8000	9869604.401		
ارتفاع جداگر لرزه‌ای (متر)	جرم پی (کیلوگرم)	سختی جداگر لرزه‌ای (نیوتن بر سانتی‌متر)		
0.5	6000	532958.6377		

شکل ۲- فایل اکسل حاوی اطلاعات ورودی مسئله که توسط کاربر ساخته شده است و توسط برنامه‌ی متلب فراخوانی می‌گردد.

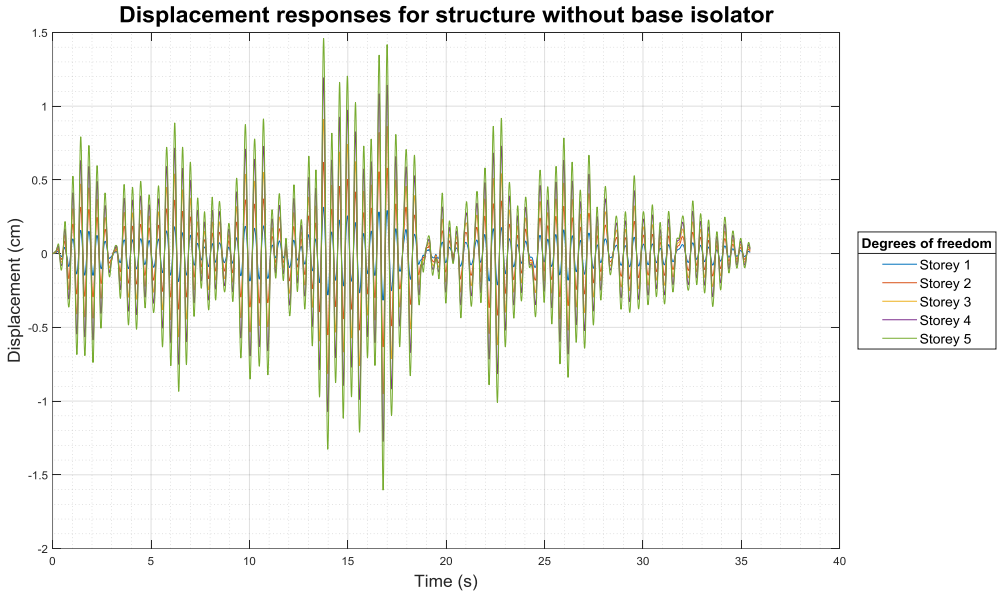
پس از تشکیل فایل ورودی، کافیست برنامه‌ی متلب اجرا شود. پس از اجرای برنامه، تحلیل دینامیکی سازه انجام شده و به صورت خودکار مجموعه‌ای از خروجی‌های تحلیل دینامیکی تولید می‌گردد. سپس شبیه‌سازی دینامیکی سازه نمایش داده می‌شود.

مطابق با شکل (۳)، برنامه‌ی متلب اَشکال مودی سازه‌ی جداسازی شده را در کنار یکدیگر ترسیم کرده و در قالب یک فایل با فرمت دلخواه کاربر (نظیر png، emf و یا pdf) به عنوان خروجی ارائه می‌دهد. مشاهده می‌گردد که دوره تناوب اصلی سازه به ۲ ثانیه افزایش یافته است و روسازه در مود ارتعاشی اصلی (مود ارتعاشی غالب)، رفتاری صلب‌مانند از خود نشان می‌دهد.



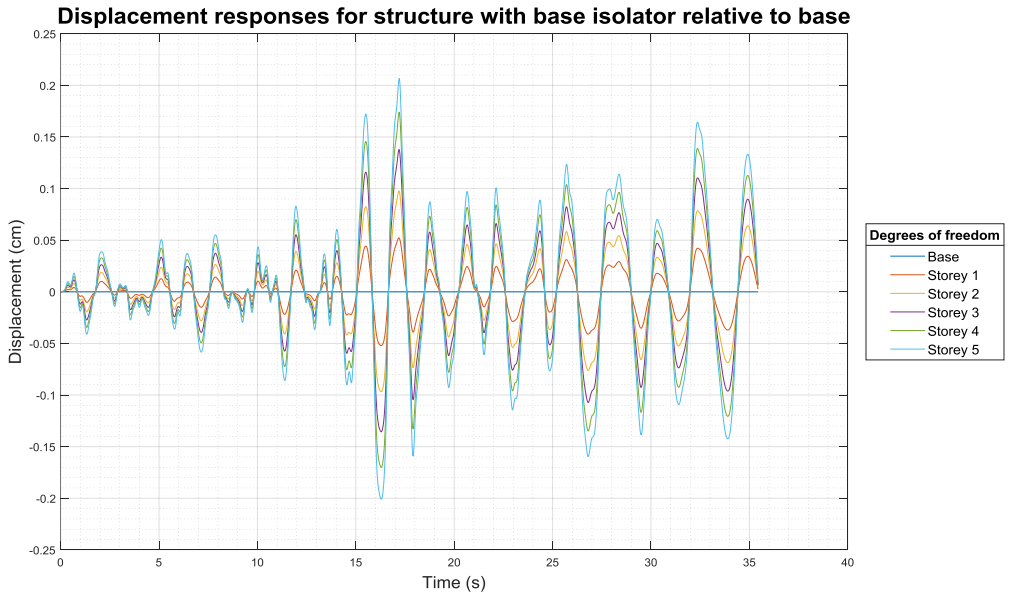
شکل ۳- اَشکال مودی سازه‌ی جداسازی شده (تولید شده توسط برنامه‌ی متلب با روش دقیق)

مطابق با شکل (۴)، برنامه‌ی متلب پاسخ‌های جابجایی طبقات سازه‌ی کنترل نشده تحت زلزله‌ی منجیل را به صورت خودکار ترسیم کرده و آن را در قالب یک فایل با فرمت دلخواه کاربر به عنوان خروجی ارائه می‌دهد.



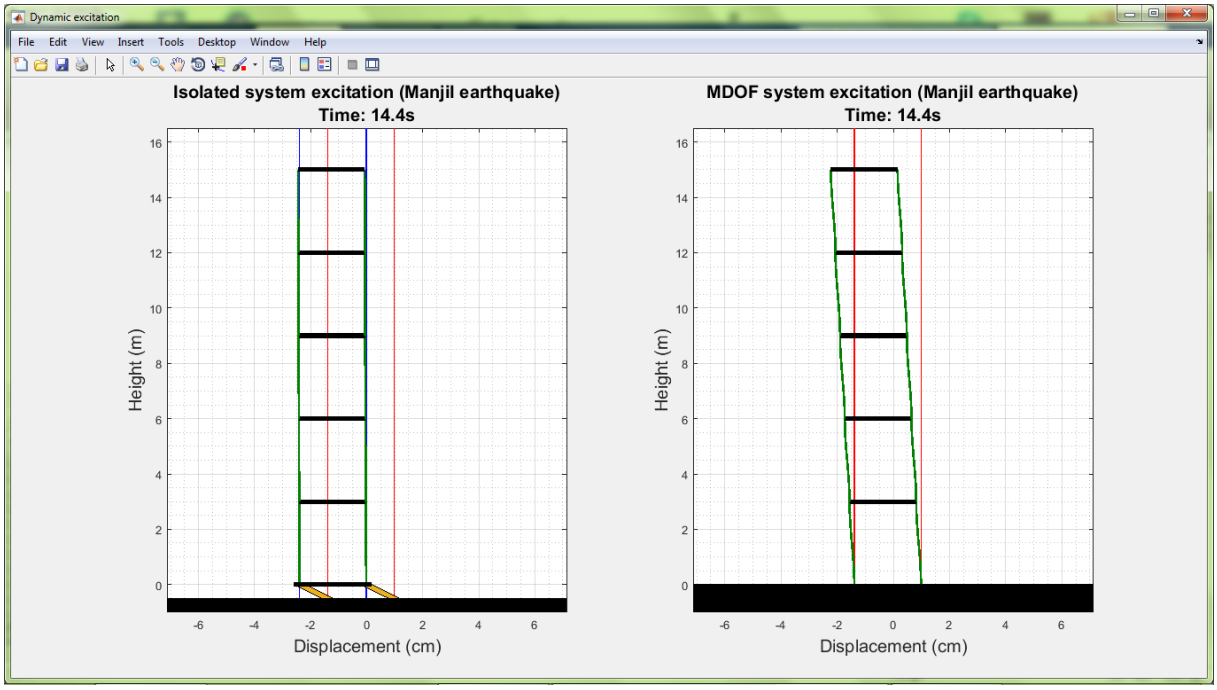
شکل ۴- پاسخ‌های جابجایی طبقات سازه‌ی بدون جداساز لرزه‌ای (تولید شده توسط برنامه‌ی متلب با روش دقیق)

مطابق با شکل (۵)، برنامه‌ی متلب پاسخ‌های جابجایی طبقات سازه‌ی جداسازی شده نسبت به پی تحت زلزله‌ی منجیل را به صورت خودکار ترسیم کرده و آن را در قالب یک فایل با فرمت دلخواه کاربر به عنوان خروجی ارائه می‌دهد.



شکل ۵- پاسخ‌های جابجایی طبقات سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای نسبت به پی (تولید شده توسط برنامه‌ی متلب با روش دقیق)

در ادامه، شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌ی جداسازی نشده و سازه‌ی جداسازی شده تحت زلزله‌ی منجیل توسط برنامه‌ی متلب انجام می‌شود. در شکل (۶)، شبیه‌سازی دینامیکی در یکی از لحظات ارتعاش سازه برای دو وضعیت با پی ثابت و پی جداسازی شده نمایش داده شده است.



شکل ۶- شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌ی جداسازی نشده و جداسازی شده (تولید شده توسط برنامه‌ی متلب با روش دقیق)

در شکل (۶)، خطوط قرمزرنگ در تراز زمین ترسیم می‌شوند. هدف از ترسیم این خطوط تشخیص جابجایی طبقات سازه نسبت به زمین در سازه‌ی بدون جداساز و نیز تشخیص جابجایی طبقات و پی سازه نسبت به زمین در سازه‌ی دارای جداساز می‌باشد. خط‌های آبی‌رنگ در محل اتصال ستون‌های سازه به جداساز ترسیم می‌شوند. هدف از ترسیم این خطوط تشخیص جابجایی طبقات سازه نسبت به پی سازه در سازه‌ی دارای جداساز می‌باشد. با توجه به شکل (۶)، مشاهده می‌گردد که جابجایی‌های طبقات سازه‌ی جداسازی شده نسبت به پی به خوبی کاهش یافته است و روسازه رفتاری صلب‌مانند از خود نشان می‌دهد.

٤- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برنامه‌هایی کاربردی به منظور تحلیل و شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌های چند درجه آزادی با دو روش تقریبی و دقیق در نرم‌افزار متلب نوشته شد. این برنامه‌ها اطلاعات سازه، جداساز و زلزله را در قالب یک فایل اکسل از کاربر گرفته و سپس تحلیل دینامیکی و شبیه‌سازی دینامیکی سازه را انجام می‌دهند. برنامه‌های متلب پس از تحلیل دینامیکی سازه، نتایج تحلیل شامل فرکانس‌های زاویه‌ای، دوره تناوب‌ها، اَشکال مودی ارتعاشی و پاسخ‌های جابجایی طبقات را در قالب فایل‌هایی با فرمت دلخواه کاربر (نظیر png، emf و یا pdf) ارائه می‌کنند. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی سازه نشان داد که استفاده از جداسازهای لرزه‌ای سبب افزایش قابل توجه دوره تناوب اصلی سازه شده و به تبع آن باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در پاسخ‌های جابجایی طبقات سازه نسبت به پی می‌گردد. این امر با شبیه‌سازی دینامیکی سازه مورد تأیید قرار گرفت. در پژوهش‌های آینده تلاش خواهد شد که یک نسخه‌ی تمام گرافیکی کاربرپسند از این برنامه‌ها در نرم‌افزار متلب ارائه شود. از طرفی، گرچه این برنامه‌ها برنامه‌هایی کاربردی و کامل هستند اما تنها پاسخگوی نیاز افرادی می‌باشند که به نرم‌افزار متلب دسترسی دارند. به همین دلیل لازم است که نسخه‌هایی دیگر از این برنامه‌ها به صورت نرم‌افزارهای تجاری تولید گردد تا کاربران بیشتری بدون محدودیت قادر به استفاده از آن‌ها باشند.

دسترسی‌ها

به منظور دریافت برنامه‌های تحلیل و شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌ی چند درجه آزادی دارای جداساز لرزه‌ای به آدرس پست الکترونیکی نویسنده‌ی اول (mohammadaadelkermani@gmail.com) پیام ارسال شود.

مراجع

[۱] م. اسماعیلی، "طراحی جداسازها و ساختمان‌های جداسازی شده"، تهران: جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر، ۱۴۰۰.

[۲] م. عظیمی، ا. رسول‌نیا و س. م. زهرائی، "دینامیک سازه‌ها و کنترل ارتعاشات با MATLAB"، تهران: نوآور، ۱۴۰۱.

[3] C. RayW. and J. Penzien, *Dynamics of structures*, 3rd ed. 1995 University Ave. Berkeley, CA 94704 USA: Computers & Structures, Inc., 2003.

[4] A. K. Chopra, *DYNAMICS OF STRUCTURES: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 5th ed. University of California at Berkeley: Pearson Education Limited, 2020.

[5] J. M. Kelly, *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, 2nd ed. 19. Springer, 1997.

[6] F. Naeim and J. M. Kelly, *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons, Inc., 1999.

[7] F. Y. Cheng, H. Jiang, and K. Lou, *Smart structures: Innovative systems for seismic response control*. 2008.

[8] S. Etedali, K. Hasankhoie, and M. R. Sohrabi, "Seismic responses and energy dissipation of pure-friction and resilient-friction base-isolated structures: A parametric study," *J. Build. Eng.*, vol. 29, no. November 2019, p. 101194, 2020.

[9] F. Li, L. Wang, and Y. Wu, "Seismic response reduction analysis of large chassis base-isolated structure under long-period ground motions," *Earthq. Res. Adv.*, vol. 1, no. 2, p. 100026, 2021.

[10] F. Peng *et al.*, "Seismic response analysis of connected dual-tower isolated structure under three-dimensional earthquakes," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 14, no. 11, p. 102538, 2023.

[11] K. L. Ryan and J. Polanco, "Problems with Rayleigh Damping in Base-Isolated Buildings," *J. Struct. Eng.*, vol. 134, no. 11, pp. 1780–1784, 2008.

[12] H. Anajafi, R. A. Medina, and E. Santini-Bell, "Effects of the improper modeling of viscous damping on the first-mode and higher-mode dominated responses of base-isolated buildings," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 49, no. 1, pp. 51–73, 2020.