



ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات

۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



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

محمد عادل کرمانی^۱، سید مهدی زهرائی^{۲*}

^۱ایران، تهران، دانشگاه شاهد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشجوی دکتری

^۲ایران، تهران، دانشگاه تهران، دانشکدگان فنی و مهندسی، استاد.

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

چکیده

یکی از مسائل بنیادینی که در علم دینامیک سازه‌ها مطرح می‌گردد، تحلیل دینامیکی سازه‌های تک درجه آزادی می‌باشد. به منظور تحلیل دینامیکی این نوع سازه‌ها از روش‌های متداول ارائه شده در مراجع استفاده می‌گردد. گرچه تحلیل دینامیکی این قبیل مسائل از پیچیدگی زیادی برخوردار نیست اما کمک شایانی به درک مفهوم دینامیک سازه‌های پیچیده‌تر با تعداد درجات آزادی بیشتر می‌کند. در طول دهه‌های اخیر، استفاده از جداسازهای لرزه‌ای به منظور کاهش پاسخ‌های سازه تحت تحریک زلزله کاربردهای فراوانی داشته است. جداساز لرزه‌ای در یک ساختمان باعث ایجاد تغییرات خاصی در ویژگی‌های دینامیکی ساختمان می‌شود. این تغییرات سبب کاهش پاسخ‌های دینامیکی سازه تحت تحریک زلزله می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که تحلیل دینامیکی ساختمان‌های دارای جداساز لرزه‌ای از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. همچنین، شبیه‌سازی دینامیکی سازه تحت تحریک زلزله می‌تواند بینش و درکی مناسب از رفتار سازه هنگام وقوع زلزله ایجاد کند. از این رو، شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌ها برای مهندسین عمران اهمیت بالایی دارد. بنا بر دلایل عنوان شده، در این پژوهش برنامه‌هایی کاربردی به منظور تحلیل دینامیکی سازه‌های تک درجه آزادی دارای جداساز لرزه‌ای ارائه می‌گردد. 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. لازم به ذکر است که، نتایج مهم تحلیل دینامیکی سازه نیز توسط برنامه‌ها ارائه می‌گردد. در پایان، اثر پارامترهای میرایی سیستم جداساز و جرم پی سازه بر پاسخ سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

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

۱ - مقدمه

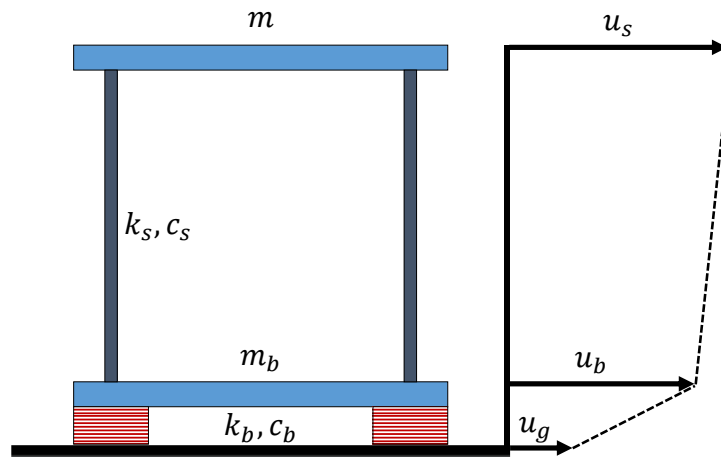
جداسازی لرزه‌ای با قرار دادن یک اتصال انعطاف پذیر بین زمین و سازه ایجاد می‌شود و معمولاً با مکانیزمی برای اتلاف قابل توجه انرژی لرزه‌ای همراه است. جداسازی لرزه‌ای باعث افزایش دوره تناوب اصلی سازه‌ی جداسازی شده و میرایی مؤثرتر آن می‌شود که به کاهش پاسخ روسازه و برش پایه در مقایسه با یک سازه با پی ثابت می‌انجامد. به دلیل افزایش انعطاف پذیری سازه‌ی جداسازی شده، جابجایی کلی ساختمان جداسازی شده از 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 انعطاف پذیر رخ می‌دهد و تغییر شکل‌های 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 امکان پذیر 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].

یکی از ساده‌ترین و در عین حال اساسی‌ترین مسائل دینامیک سازه‌ها در رابطه با تحلیل دینامیکی سازه‌های تک درجه آزادی 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 نوع از 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 مختلف پیش از پرداختن به تحلیل دینامیکی سازه‌های چند درجه آزادی ابتدا مبانی تحلیل دینامیکی سازه‌های تک درجه آزادی به تفصیل بیان می‌گردد. چرا که مبانی تحلیل دینامیکی سازه‌های تک درجه آزادی اساس تحلیل دینامیکی سازه‌های چند درجه آزادی می‌باشد و روابط تحلیل دینامیکی سازه‌های چند درجه آزادی از تعمیم روابط تحلیل دینامیکی سازه‌های تک درجه آزادی حاصل می‌گردند. لذا، تحلیل دینامیکی سازه‌های تک درجه آزادی به درک مفهوم دینامیک سازه‌های پیچیده‌تر با تعداد درجات آزادی بیشتر کمک می‌کند. در مراجع گوناگونی از جمله مراجع [۲]، [۳] و [۴] به تحلیل دینامیکی سازه‌های تک درجه آزادی پرداخته شده است. با توجه به کاربرد جداسازهای لرزه‌ای در ساختمان‌های دارای قاب خمشی (ساختمان‌های برشی) تحلیل دینامیکی سازه‌های دارای سیستم جداسازی لرزه‌ای و به دست آوردن پاسخ‌های آن‌ها تحت تحریک تکیه‌گاهی زلزله از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در مراجع [۵]، [۶] و [۷] تحلیل دینامیکی سازه‌های تک درجه آزادی دارای سیستم جداسازی لرزه‌ای به طور مفصل شرح داده شده است. در پژوهش حاضر، برنامه‌هایی کاربردی به منظور شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌های تک درجه آزادی دارای جداساز لرزه‌ای ارائه می‌گردد. 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 متعاقباً شبیه‌سازی دینامیکی سازه را انجام می‌دهند. پس از اتمام تحلیل دینامیکی، نتایج تحلیل شامل پاسخ‌های جابجایی نسبی پی و روسازه در قالب فایل‌هایی با فرمت دلخواه کاربر (نظیر emf، png یا pdf) توسط برنامه‌ها ارائه می‌گردد. در انتها، در قالب یک تحلیل پارامتریک اثر افزایش میرایی سیستم جداساز و نیز اثر افزایش جرم پی سازه بر روی بیشینه‌ی پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه‌ی جداسازی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲ - تئوری خطی جداسازی لرزه‌ای

به منظور به دست آوردن بینشی در مورد رفتار ساختمان‌های جداسازی شده، می‌توان یک تحلیل ابتدایی با استفاده از یک مدل دو درجه آزادی ساده با فنرهای خطی و میرایی ویسکوز خطی را توسعه داد. از آنجا که اکثر سیستم‌های جداسازی ذاتاً غیرخطی هستند، این تحلیل فقط برای چنین سیستم‌هایی تقریبی خواهد بود و سختی و میرایی موثر باید توسط فرآیند خطی‌سازی معادل تخمین زده شود. همانطور که در ادامه مشاهده خواهد شد، با استفاده از فرمول‌بندی ارائه شده، می‌توان پارامترهای تحلیل دینامیکی نظیر فرکانس‌های زاویه‌ای، اشکال مودی ارتعاشی، ضرایب مشارکت مودها و میرایی‌های مودال سازه‌ی جداسازی شده را به دو روش دقیق و تقریبی به دست آورده و برنامه‌هایی مجزا برای تحلیل و شبیه‌سازی دینامیکی ارائه نمود. پارامترهای مدل در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- پارامترهای سیستم جداسازی شدهی دو درجه آزادی

معادلات اساسی حرکت مدل ساختمان برشی دو درجه آزادی عبارتند از:

$$(m + m_b)\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \quad (1)$$

$$m\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_s = -m\ddot{u}_g \quad (2)$$

سیستم معادلات دو درجه آزادی (۱) و (۲)، که می‌تواند مستقیماً حل شده و یا اینکه از طریق تجزیه‌ی مودال حل شود، بینشی در مورد پاسخ سیستم‌های جداسازی شده ارائه می‌دهد و برای مدل‌های پیچیده‌تر قابل استفاده است. برای توسعه‌ی مودها، فرکانس‌ها و ضرایب مشارکت سیستم، معادلات به فرم ماتریسی (۳) نوشته می‌شوند:

$$\mathbf{M}^* \dot{\mathbf{v}}^* + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{v}}^* + \mathbf{K}^* \mathbf{v}^* = -\mathbf{M}^* \mathbf{r}^* \ddot{u}_g \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)، \mathbf{M}^* ماتریس جرم سیستم جداسازی شده، \mathbf{C}^* ماتریس میرایی سیستم جداسازی شده، \mathbf{K}^* ماتریس سختی سیستم جداسازی شده، $\dot{\mathbf{v}}^*$ بردار شتاب نسبی سیستم جداسازی شده، $\dot{\mathbf{v}}^*$ بردار سرعت نسبی سیستم جداسازی شده، \mathbf{v}^* بردار جابجایی نسبی سیستم جداسازی شده، \mathbf{r}^* بردار واحد سیستم جداسازی شده و \ddot{u}_g معرف شتاب زمین تحت تحریک زلزله می‌باشد که پارامترهای اصلی آن به صورت مجموعه روابط (۴) تعریف می‌گردند:

$$\mathbf{M}^* = \begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}^* = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}^* = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \quad \mathbf{v}^* = \begin{bmatrix} v_b \\ v_s \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}^* = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

به طوری که، m جرم کل سازه (بدون احتساب جرم پی)، m_b جرم پی، M مجموع جرم کل سازه و جرم پی ($M = m + m_b$)، k_b سختی جانبی جداساز در تراز پی، c_b میرایی جانبی جداساز در تراز پی (در صورت وجود)، v_b جابجایی نسبی دال پی نسبت به زمین، k_s سختی جانبی سازه، c_s میرایی جانبی سازه و v_s جابجایی نسبی سازه‌ی جداسازی شده نسبت به دال پی می‌باشد.

نسبت جرمی γ مطابق با رابطه‌ی (۵) تعریف می‌شود:

$$\gamma = \frac{m}{M} = \frac{m}{m + m_b} \quad (5)$$

فرکانس‌های اسمی ω_b و ω_s به صورت روابط (۶) و (۷) تعریف می‌شوند:

$$\omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{M}} = \sqrt{\frac{k_b}{m + m_b}} \quad (6)$$

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m}} \quad (7)$$

نسبت‌های میرایی برای سازه و سیستم جداسازی به صورت روابط (۸) و (۹) تعریف می‌شوند:

$$\xi_b = \frac{c_b}{2M\omega_b} = \frac{c_b}{2(m+m_b)\omega_b} \quad (۸)$$

$$\xi_s = \frac{c_s}{2m\omega_s} \quad (۹)$$

در ادامه، فرض می‌گردد که:

$$\varepsilon = \left(\frac{\omega_b}{\omega_s}\right)^2 \quad (۱۰)$$

سپس، معادله‌ی مشخصه به فرم (۱۱) تشکیل داده می‌شود:

$$(1-\gamma)\omega_n^4 - (\omega_b^2 + \omega_s^2)\omega_n^2 + \omega_b^2\omega_s^2 = 0 \quad (۱۱)$$

ریشه‌ی پایین‌تر معادله‌ی فوق (ω_1) که با ω_b^* نشان داده می‌شود نشان‌دهنده‌ی فرکانس جداسازی جابجا شده است و ریشه‌ی بالاتر معادله‌ی فوق (ω_2) که با ω_s^* نشان داده می‌شود نشان‌دهنده‌ی فرکانس سازه است که در حضور سیستم جداسازی اصلاح شده است. با حل معادله مشخصه‌ی (۱۱) فرکانس‌های زاویه‌ای سازه‌ی جداسازی شده به طور دقیق محاسبه می‌شوند. با فرض اینکه $\omega_b \ll \omega_s$ ، ریشه‌های معادله‌ی (۱۱) با روابط (۱۲) و (۱۳) تقریب زده می‌شوند:

$$\omega_1 \approx \omega_b \quad (۱۲)$$

$$\omega_2 \approx \frac{\omega_s}{\sqrt{1-\gamma}} \quad (۱۳)$$

مودهای طبیعی سیستم جداسازی شده، $\underline{\phi}^n$ ، به فرم برداری (۱۴) نوشته می‌شود:

$$\underline{\phi}^n = \{\phi_b^n, \phi_s^n\}^T = \begin{Bmatrix} \phi_b^n \\ \phi_s^n \end{Bmatrix} \quad (۱۴)$$

برای شکل مود ارتعاشی اول، $\underline{\phi}^1$ ، روابط (۱۵) و (۱۶) نوشته می‌شوند:

$$-((\omega_b^*)^2 + (\omega_b)^2)\phi_b^1 + (-\gamma(\omega_b^*)^2)\phi_s^1 = 0 \quad (۱۵)$$

$$-(\omega_b^*)^2\phi_b^1 + ((\omega_s)^2 - (\omega_b^*)^2)\phi_s^1 = 0 \quad (۱۶)$$

اگر ترم‌های از مرتبه‌ی ε را نگه داشته و ϕ_b^1 برابر با واحد در نظر گرفته شود، آنگاه می‌توان شکل مود ارتعاشی اول را به فرم رابطه‌ی (۱۷) تقریب زد:

$$\underline{\phi}^1 \approx \begin{Bmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{Bmatrix} \quad (۱۷)$$

سپس، شکل مود ارتعاشی دوم، $\underline{\phi}^2$ ، با همان مرتبه از ε به فرم رابطه‌ی (۱۸) تقریب زده می‌شود:

$$\underline{\phi}^2 \approx \begin{Bmatrix} 1 \\ -\frac{1-(1-\gamma)}{\gamma}\varepsilon \end{Bmatrix} \quad (۱۸)$$

وقتی دو مود ارتعاشی $\underline{\phi}^1$ و $\underline{\phi}^2$ تعیین شدند، جابجایی‌های نسبی v_b و v_s با استفاده از روابط (۱۹) و (۲۰) به دست خواهند آمد:

$$v_b = q_1\phi_b^1 + q_2\phi_b^2 \quad (۱۹)$$

$$v_s = q_1\phi_s^1 + q_2\phi_s^2 \quad (۲۰)$$

به طوری که در روابط (۱۹) و (۲۰)، q_1 و q_2 ضرایب مودال وابسته به زمان هستند.

سپس، معادله‌ی ماتریسی (۳) به فرم معادلات (۲۱) و (۲۲) کاهش می‌یابد:

$$\ddot{q}_1 + 2\omega_b^* \xi_b^* \dot{q}_1 + (\omega_b^*)^2 q_1 = -L_1 \ddot{u}_g \quad (21)$$

$$\ddot{q}_2 + 2\omega_s^* \xi_s^* \dot{q}_2 + (\omega_s^*)^2 q_2 = -L_2 \ddot{u}_g \quad (22)$$

در روابط (۲۱) و (۲۲)، L_1 و L_2 ضرایب مشارکت مود اول و دوم هستند که به طور دقیق از رابطه‌ی (۲۳) به دست می‌آیند:

$$L_n = \frac{\underline{\phi}^{nT} \underline{M}^* \underline{r}^*}{\underline{\phi}^{nT} \underline{M}^* \underline{\phi}^n} \quad (23)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۲۳)، L_1 و L_2 پس از ساده‌سازی مطابق با روابط (۲۴) و (۲۵) تقریب زده می‌شوند:

$$L_1 \approx 1 - \gamma \varepsilon \quad (24)$$

$$L_2 \approx \gamma \varepsilon \quad (25)$$

نسبت‌های میرایی مودال سازه‌ی جداسازی شده با استفاده از رابطه‌ی (۲۶) به طور دقیق محاسبه می‌گردند:

$$\xi_n^* = \frac{\underline{\phi}^{nT} \underline{C}^* \underline{\phi}^n}{2\omega_n \underline{\phi}^{nT} \underline{M}^* \underline{\phi}^n} \quad (26)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۲۶)، ξ_b^* و ξ_s^* پس از ساده‌سازی مطابق با روابط (۲۷) و (۲۸) تقریب زده می‌شوند:

$$\xi_b^* \approx \xi_b \left(1 - \frac{3}{2} \gamma \varepsilon \right) \quad (27)$$

$$\xi_s^* \approx \frac{\xi_s + \gamma \varepsilon^2 \xi_b}{(1 - \gamma)^{\frac{1}{2}}} \quad (28)$$

با استفاده از مقادیر به دست آمده برای L_1 ، L_2 ، ξ_b^* و ξ_s^* می‌توان پاسخ سیستم جداسازی شده را تحت یک زلزله‌ی مشخص به دست آورد. در صورتی که تاریخچه زمانی حرکت زمین $\ddot{u}_g(t)$ مشخص باشد، مؤلفه‌های مودال $q_1(t)$ و $q_2(t)$ با استفاده از روابط (۲۹) و (۳۰) قابل محاسبه می‌باشند:

$$q_1(t) = -\frac{L_1}{\omega_b^*} \int_0^t \ddot{u}_g(t - \tau) e^{-\omega_b^* \xi_b^* \tau} \sin \omega_b^* \tau d\tau \quad (29)$$

$$q_2(t) = -\frac{L_2}{\omega_s^*} \int_0^t \ddot{u}_g(t - \tau) e^{-\omega_s^* \xi_s^* \tau} \sin \omega_s^* \tau d\tau \quad (30)$$

نهایتاً، با جایگذاری روابط (۲۹) و (۳۰) در روابط (۱۹) و (۲۰)، جابجایی‌های نسبی v_b و v_s به دست خواهند آمد.

۳- مثال عددی

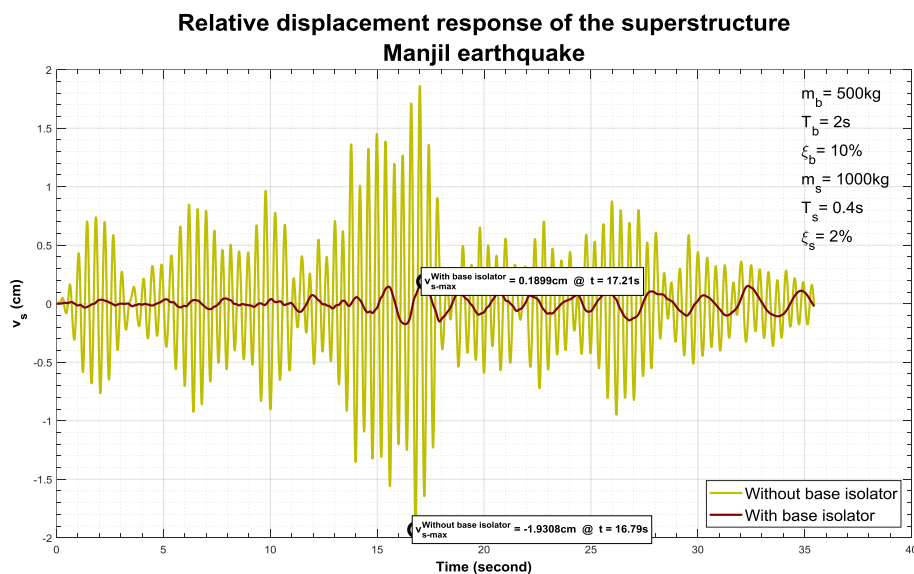
یک ساختمان برشی ۱ طبقه با جرم طبقه‌ی ۱۰۰۰ کیلوگرم، جرم پی ۵۰۰ کیلوگرم و میرایی ۲٪ در نظر گرفته می‌شود. در این سیستم فرض می‌شود که دوره تناوب اصلی سازه (در وضعیت پی ثابت) برابر با ۰/۴ ثانیه می‌باشد. برای کنترل ارتعاشات سازه‌ی مذکور از یک جداساز با دوره تناوب ۲ ثانیه و نسبت میرایی ۱۰٪ استفاده شده است. هدف از طرح این مثال، تحلیل دینامیکی و نیز شبیه‌سازی دینامیکی یک سازه‌ی تک درجه آزادی دلخواه و نیز صحت‌سنجی برنامه‌های نوشته شده در نرم‌افزار متلب و ارزیابی توانایی آن‌ها برای

حل مسائل گوناگون می‌باشد. 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
1	جرم طبقه‌ی سازه (کیلوگرم)	جرم پی سازه (کیلوگرم)	نام فایل رکوردهای شتاب زمین	
2	1000	500	RSN1640_MANJIL_189042.AT2	
3	دوره تناوب سازه (ثانیه)	دوره تناوب جداساز لرزه‌ای (ثانیه)	نام فایل رکوردهای جابجایی زمین	
4	0.4	2	RSN1640_MANJIL_189042.DT2	
5	نسبت میرایی سازه	نسبت میرایی جداساز لرزه‌ای		
6	0.02	0.1		
7	ارتفاع سازه (متر)	ارتفاع جداساز لرزه‌ای (متر)		
8	3	0.5		

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

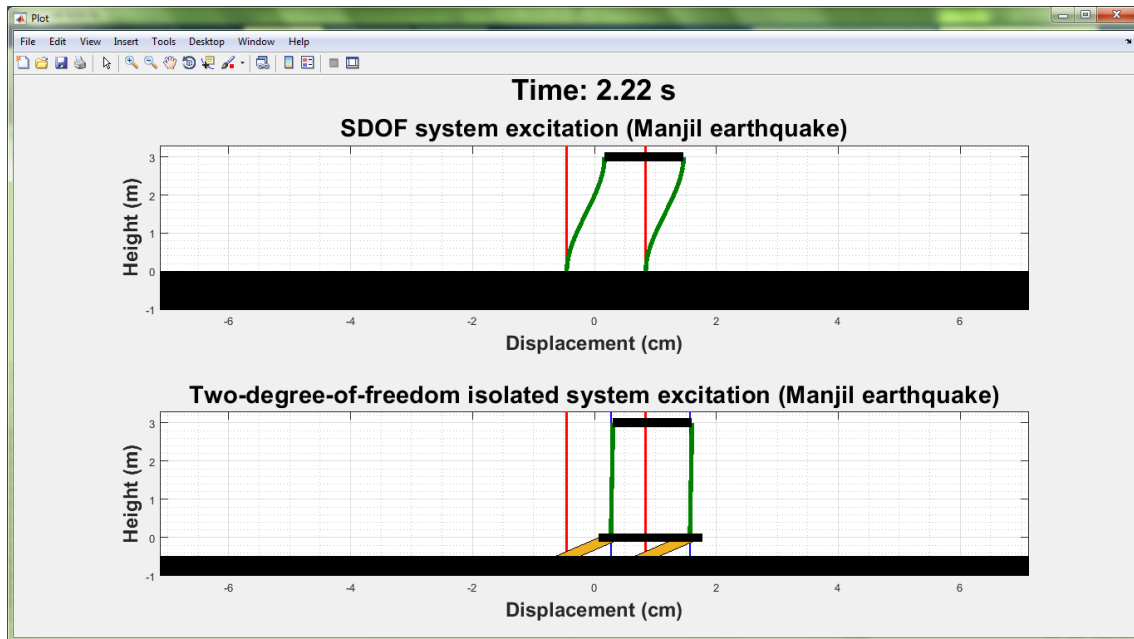
توجه شود که برای تشکیل فایل ورودی لازم است مرجع [۸] ملاک عمل قرار گرفته و همچنین نتایج حاصل از تحلیل با ضوابط ارائه شده در آن کنترل گردد. پس از تشکیل فایل ورودی در نرم‌افزار اکسل، کفایت برنامه‌ی متلب اجرا شود. مطابق با شکل (۳)، برنامه‌ی متلب پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه نسبت به پی را با و بدون جداساز لرزه‌ای تحت زلزله‌ی منجیل به صورت خودکار ترسیم کرده و آن را در قالب یک فایل با فرمت دلخواه کاربر به عنوان خروجی ارائه می‌دهد.



شکل ۳- مقایسه‌ی پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه با و بدون جداساز لرزه‌ای (تولید شده توسط برنامه‌ی متلب با روش تقریبی)

با توجه به شکل (۳)، مشاهده می‌گردد که در صورت استفاده از سیستم جداساز لرزه‌ای پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

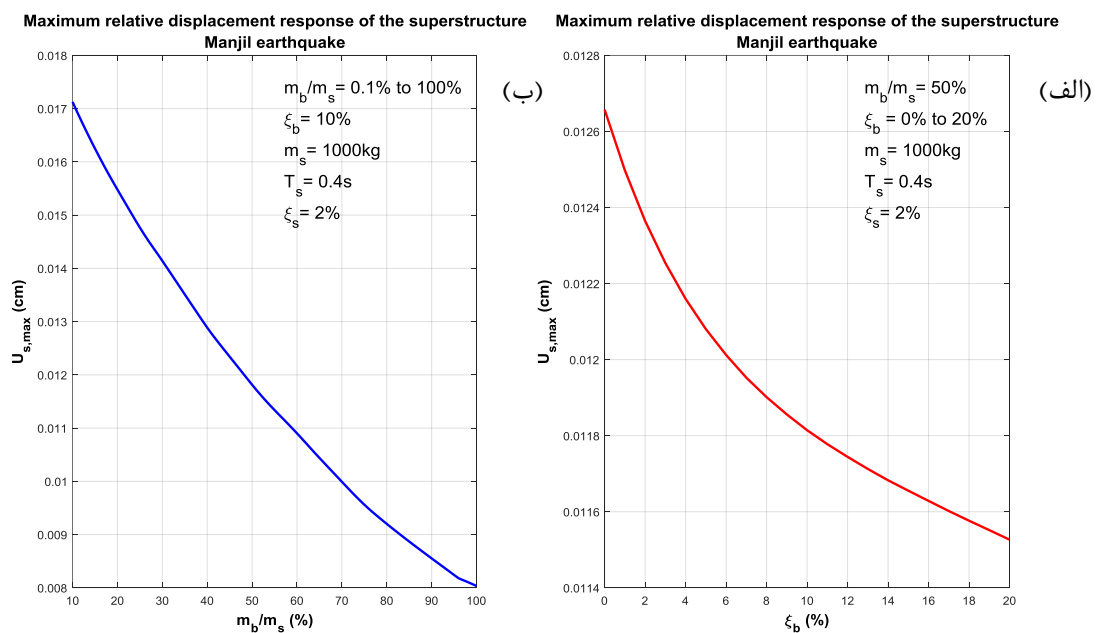
در ادامه، برنامه‌ی متلب پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی مربوطه شروع به شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌ی کنترل نشده (بدون جداساز لرزه‌ای) و نیز سازه‌ی کنترل شده (دارای جداساز لرزه‌ای) تحت زلزله‌ی منجیل می‌کند. در شکل (۴)، شبیه‌سازی دینامیکی در یکی از لحظات ارتعاش سازه برای دو وضعیت با پی ثابت و پی جداسازی شده نمایش داده شده است.



شکل ۴- شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌ی جداسازی نشده و جداسازی شده (تولید شده توسط برنامه‌ی متلب با روش تقریبی)

در شکل (۴)، خط‌های قرمز رنگ در تراز زمین ترسیم می‌شوند. هدف از ترسیم این خطوط تشخیص جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه نسبت به زمین در سازه‌ی بدون جداساز و نیز تشخیص جابجایی نسبی طبقه و پی سازه نسبت به زمین در سازه‌ی دارای جداساز می‌باشد. خط‌های آبی رنگ در محل اتصال ستون‌های سازه به جداساز ترسیم می‌شوند. هدف از ترسیم این خطوط تشخیص جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه نسبت به پی سازه در سازه‌ی دارای جداساز می‌باشد.

در ادامه، می‌توان در یک تحلیل پارامتریک اثر میرایی سیستم جداساز و اثر جرم پی سازه را بر روی بیشینه‌ی پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه‌ی جداسازی شده بررسی نمود. بدین منظور، در یک تحلیل با فرض ثابت ماندن جرم پی تغییرات بیشینه‌ی پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه بر حسب تغییرات میرایی جداساز ترسیم می‌گردد (شکل (۵-الف)). در تحلیل دیگر با فرض ثابت ماندن میرایی جداساز تغییرات بیشینه‌ی پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه بر حسب تغییرات جرم پی ترسیم می‌گردد (شکل (۵-ب)).



شکل ۵- بیشینه‌ی پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه‌ی جداسازی شده با در نظر گرفتن اثر تغییرات (الف) میرایی جداساز و (ب) جرم پی سازه (تولید شده توسط برنامه‌ی متلب با روش تقریبی)

با توجه به شکل (۵-الف)، مشاهده می‌گردد که با افزایش میرایی جداساز لرزه‌ای (با ثابت ماندن جرم پی سازه) بیشینه‌ی پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه کاهش می‌یابد. مطابق با شکل (۵-ب)، مشاهده می‌گردد که با افزایش جرم پی سازه (با ثابت ماندن میرایی جداساز) بیشینه‌ی پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه کاهش می‌یابد.

۴ - جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برنامه‌هایی کاربردی به منظور تحلیل دینامیکی و شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌های تک درجه آزادی در نرم‌افزار متلب نوشته شد. این برنامه‌ها اطلاعات سازه، جداساز و زلزله را در قالب یک فایل اکسل از کاربر گرفته و تحلیل دینامیکی و شبیه‌سازی دینامیکی سازه را انجام می‌دهند. برنامه‌های متلب پس از تحلیل دینامیکی سازه، نتایج تحلیل شامل پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه‌ی جداسازی نشده و پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه‌ی جداسازی شده را در قالب فایل‌هایی با فرمت دلخواه کاربر (نظیر emf, png و pdf) ارائه می‌کنند. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی سازه نشان داد که استفاده از جداساز لرزه‌ای باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه نسبت به پی می‌گردد. این امر با شبیه‌سازی دینامیکی سازه مورد تأیید قرار گرفت. همچنین، مشاهده گردید که در صورت افزایش میرایی سیستم جداساز و یا افزایش جرم پی سازه، بیشینه‌ی پاسخ جابجایی نسبی طبقه‌ی سازه کاهش می‌یابد. در پژوهش‌های آتی تلاش خواهد شد که یک نسخه‌ی تمام گرافیکی کاربرپسند از این برنامه‌ها نیز 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 یک نسخه از هر یک از این برنامه‌ها به صورت یک نرم‌افزار تجاری تولید گردد تا کاربران بیشتری بدون محدودیت قادر به استفاده از آن‌ها باشند.

دسترسی‌ها

به منظور دریافت برنامه‌های تحلیل و شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌ی تک 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] C. Christopoulos and A. Filiatrault, "Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation," *IUSS Press*, vol. 133, no. 8. p. 1192, 2006.
- [۸] نشریه شماره ۵۲۳، "راهنمای طراحی و اجرای سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها"، ۱۳۸۹.