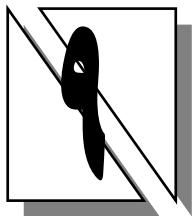




سیستم های جداساز لرزه ای

فصل ۹





زمانی که یک ساختمان از فونداسیون خود با استفاده از سیستم جداساز، منفک می‌گردد، سازه جدا شده تحت نیروی لرزه‌ای کمتری قرار خواهد گرفت و در نتیجه پاسخ‌های ساختمان به شدت کاهش می‌یابد. این مفهوم توجه بسیاری از محققان و مهندسان سازه را به خود جلب نموده است. در طی پنج دهه گذشته، مطالعات زیادی در خصوص گسترش تئوری سیستم‌های جداساز انجام گرفت و پایداری و دوام آنها از طریق مطالعات آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. از آن زمان به بعد، سیستم‌های جداساز در بیش از ۲۰۰ ساختمان و پل در ایالات متحده به کار گرفته شدند که نشان دهنده‌ی توانایی موفق این نوع از سیستم‌های نوین در محافظت لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشند. امروزه استفاده از سیستم‌های جداساز به عنوان یک تکنولوژی کارآمد به منظور طراحی سازه‌های مهم به طور گستردۀ مورد پذیرش قرار گرفته است.

مطالعات گستردۀ بر روی تئوری سیستم‌های جداساز و کاربرد تکنولوژی آنها انجام شد. ارائه مفهوم و جزئیات کاربردی آنها در یک فصل امکان پذیر نیست و البته ضرورتی هم ندارد. بنابراین تنها مفاهیمی پایه و تئوری‌های بسیار مهم در این فصل ارائه خواهد شد که می‌تواند خواننده را در راستای پیشرفت این حوزه علاقمند نماید. این فصل شامل بخش‌های زیر است:

در بخش ۲-۹ نخست مفاهیم پایه از سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای معرفی می‌گردد سپس در بخش ۲-۹ خواص مکانیکی جداسازی‌های لرزه‌ای ارائه می‌گردد. در بخش ۳-۹ ضوابط مهم طراحی مطابق با استاندارد جامعه مهندسین عمران آمریکا^۱ (ASCE 7-0.5) [۲] ارائه شده است. در بخش ۴-۹ یک مثال طراحی بر مبنای ASCE 7-05 بیان شده است. ارزیابی و اصلاح خواهی مکانیکی جداساز در بخش ۵-۹ ارائه شده است.

۱-۹ - مفاهیم پایه از سازه‌های ساختمانی جداسازی شده لرزه‌ای^۱ ۱-۹ - معادلات یک درجه آزادی^۲

حرکت سازه ساختمانی جداسازی شده لرزه‌ای می‌تواند با معادله حرکت سیستم یک درجه آزادی با فرض آنکه سازه بالای سطح جداساز کاملاً صلب است و حرکت سیستم سازه‌ای در پی و یا سیستم جداساز اتفاق خواهد افتاد، نشان داده شود. واحد جداساز^۳ معمولاً به بالشتک‌ها اطلاق می‌شود، هنگامی که یک سیستم جداساز به عنوان یک دسته از واحدهای جداساز تعریف می‌شود، اعضاء به صورت سازه‌ای، واحدهای جداساز را متصل می‌کنند. به عنوان مثال این اعضاء شامل تیرهای فولادی با انتهای گیردار و اتصالات میان واحدهای جداساز و سایر اعضاء سازه‌ای است. علاوه بر واحد جداساز و سیستم جداساز در شکل ۲-۹ مفاهیم دیگر، نظیر سازه بالا و پایین سیستم جداساز نیز نشان داده شده است. در شکل ۲-۹، شما یک سازه جداسازی شده یک درجه آزادی نشان داده شده است. یک جسم صلب به جرم m ، نمایشگر سازه ساختمانی روی سطح جداسازی شده است، سیستم جداساز دارای سختی جانبی k_b و ضریب میرایی c_b است. حرکت سیستم جداسازی شده و زمین به ترتیب با (t) و (t) و x_g نشان داده می‌شود که برای سادگی با u و x_g نمایش داده می‌شوند. بر مبنای شرایط تعادل، معادله حرکت به صورت زیر استخراج خواهد شد:

$$m\ddot{u} + c_b(\dot{u} - \dot{x}_g) + k_b(u - x_g) = 0 \quad (1-9)$$

با به کار بردن جابجایی نسبی $x_g - u$ ، فرکانس زاویه‌ای $\omega_b = \sqrt{k_b/m}$ و نسبت میرایی

$\beta_b = c_b / 2\omega_b m$ رابطه ۱-۹ به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\text{or } \ddot{x} + 2\omega_b\beta_b\dot{x} + \omega_b^2 = -\ddot{x}_b m \ddot{x} + c_b \dot{x} + k_b x = -m \ddot{x}_g \quad (1-9-\text{الف})$$

با به کار بردن روش پارامترهای ارتعاش^۴، جواب کلی رابطه ۱-۹ الف به صورت زیر

خواهد شد:

$$x(t) = C_1(t)e^{-\beta_b\omega_b t \sin \bar{\omega}_b t} + C_2(t)e^{-\beta_b\omega_b t \cos \bar{\omega}_b t}$$

1 - Basic Concepts of Seismically Isolated Building Structures

2 - Single-Degree-of-Freedom Motion Equations

3 - Isolator Units

4 - method of variation parameters

که در آن فرکانس میرایی برابر است با $\bar{\omega}_b = \omega_b \sqrt{1 - \omega_b^2} \cdot C_1(t), C_1(t)$ که می‌بایست شرایط زیر را اقنانع نماید:

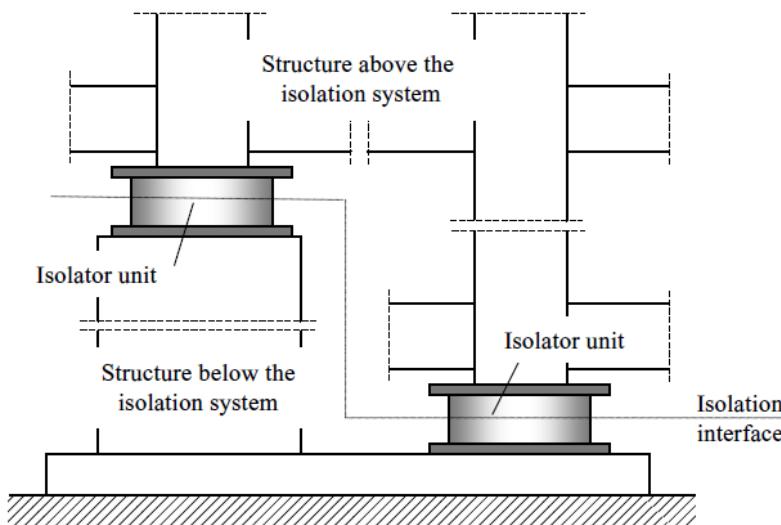
$$\dot{C}_1(t) e^{-\beta_b \omega_b t} \sin \bar{\omega}_b t + \dot{C}_2(t) e^{-\beta_b \omega_b t} \cos \bar{\omega}_b t = 0$$

با مشتق گیری متوالی از رابطه ۲-۹، رابطه میان $\dot{C}_1(t)$ و $\dot{C}_2(t)$ به صورت زیر حاصل

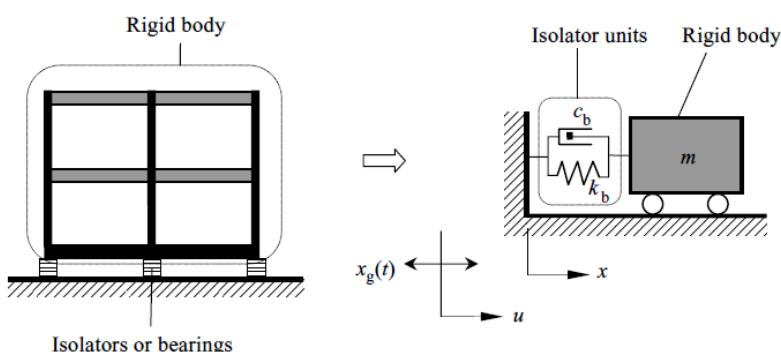
می‌شود:

$$\dot{C}_1(t) e^{-\beta_b \omega_b t} (\bar{\omega}_b \cos \bar{\omega}_b t - \beta_b \omega_b \sin \bar{\omega}_b t) + \quad \text{(الف) ۳-۹}$$

$$\dot{C}_2(t) e^{-\beta_b \omega_b t} (\bar{\omega}_b \sin \bar{\omega}_b t + \beta_b \omega_b \cos \bar{\omega}_b t) = \ddot{x}_g(t)$$



شکل ۱-۹ سازه جداسازی شده لرزه‌ای



شکل ۲-۹ طرح شماتیک از سازه جداسازی شده لرزه‌ای

با ارائه روابط ۳-۹ و ۳-۹-الف، ضرایب $\dot{C}_1(t)$ و $\dot{C}_2(t)$ به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$\dot{C}_1(t) = -\frac{1}{\bar{\omega}_b} \ddot{x}_g(t) e^{\beta_b \omega_b t} \cos \bar{\omega}_b t \quad (4-9)$$

$$\dot{C}_2(t) = -\frac{1}{\bar{\omega}_b} \ddot{x}_g(t) e^{\beta_b \omega_b t} \sin \bar{\omega}_b t \quad (4-9-\text{الف})$$

با انتگرال گیری از روابط ۴-۹ و ۴-۹-الف مقادیر $C_1(t)$ و $C_2(t)$ به صورت زیر خواهد

شد:

$$C_1(t) = -\frac{1}{\bar{\omega}_b} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{\beta_b \omega_b \tau} \cos \bar{\omega}_b \tau d\tau + C_1$$

$$C_2(t) = -\frac{1}{\bar{\omega}_b} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{\beta_b \omega_b \tau} \sin \bar{\omega}_b \tau d\tau + C_2$$

که در آن C_1 و C_2 ضرایب ثابت می‌باشند که مستقل از زمان می‌باشند.

با جایگذاری $C_1(t)$ و $C_2(t)$ در روابط ۲-۹، حرکت سازه جداسازی شده لرزه‌ای C با استفاده از انتگرال دوهامل^۱ به صورت زیر نشان داده می‌شود:

(۵-۹)

$$x(t) = e^{-\beta_b \omega_b t} (C_1 \sin \bar{\omega}_b t + C_2 \cos \bar{\omega}_b t) - \frac{1}{\bar{\omega}_b} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\beta_b \omega_b (\tau-t)} \sin \omega_b (t-\tau) d\tau$$

محاسبه ضرایب C_1 و C_2 در صفحه ۱۵ از مرجع [۳] توسط چنگ^۲ ارائه شده است. با توجه به آنکه سرعت و جابجایی سازه مورد مطالعه در ابتدای زلزله صفر است، لذا $C_1 = C_2 = 0$ است بنابراین رابطه (۵-۹) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$x(t) = -\frac{1}{\bar{\omega}_b} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\beta_b \omega_b (\tau-t)} \sin \bar{\omega}_b (t-\tau) d\tau \quad (5-9-\text{الف})$$

از آنجا که، در مورد سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای بدون وسیله میراگر، میزان نسبت میرایی (β_b) معمولاً بیش از ۲۰٪ میرایی بحرانی نیست، لذا تاثیر جمله $\sqrt{1 - \omega_b^2}$ ناچیز می‌باشد و فرکانس میرایی $\bar{\omega}_b$ با فرکانس زاویه ای ω_b جایگزین خواهد شد. به عبارت دیگر رابطه (۵-۹-الف) به صورت صفحه بعد ساده می‌شود:

1 - Duhamel's integral

2 - Cheng

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_b} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\beta_b \omega_b (\tau-t)} \sin \omega_b (t-\tau) d\tau \quad (5-9)$$

مقدار حداقل قدر مطلق قسمت انتگرال رابطه (5-9) به صورت شبه سرعت^۱ تعریف می‌شود (صفحات ۳۶۲ تا ۳۶۸ [۳]) و به صورت زیر ارائه خواهد شد:

$$S_V = \left| \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\beta_b \omega_b (\tau-t)} \sin \omega_b (t-\tau) d\tau \right|_{\max} \quad (6-9)$$

رابطه جابجایی طیفی^۲ (SD) با شبیه سرعت به صورت زیر می‌باشد:

$$S_V = \omega_b S_D \quad (7-9)$$

برای ضرایب میرایی β_b کمتر از ۲۰٪ میرایی بحرانی، رابطه میان شبه ستاد^۳ (SA) و جابجایی طیفی با دقت قابل قبولی می‌تواند به صورت زیر ساده شود:

$$S_V = \omega_b^2 S_D \quad (8-9)$$

معمولأً حرکت زمین ($\ddot{x}_g(t)$) که در رابطه (6-9) نشان داده شده، معلوم می‌باشد. بنابراین S_D و S_V و تابع فرکانس زاویه ای ω_b و نسبت میرایی β_b سازه جاسازی شده لرزه‌ای می‌باشند. رابطه (8-9)، رابطه پایه جهت استخراج روش نیروی جانبی معادل^۴ برای طراحی سازه‌های جاسازی شده لرزه‌ای است که در بخش ۳-۹ به تفصیل بحث خواهد شد.

۱-۲-۱- روابط حرکت چند درجه آزادی^۵

در شکل (۳-۹)، یک سازه چند طبقه جاسازی شده لرزه‌ای نشان داده شده است. با استفاده از شرایط تعادل رابطه حرکت طبقه بام (n) به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$m_n \ddot{u}_n + C_n (\dot{x}_n - \dot{u}_{n-1}) + K_n (u_n - u_{n-1}) = 0 \quad (9-9)$$

که در آن m_n جرم طبقه بام است، C_n و K_n به ترتیب اشاره به ضرایب میرایی و سختی بین طبقه بام و طبقه زیرین دارد؛ u_n و u_{n-1} که ساده شده (t) و (t) است، بیانگر حرکت طبقه بام و طبقه زیرین آن است.

1 - Pseudovelocity

2 - Spectral Displacement

3 - Pseudoacceleration

4 - Equivalent Lateral Force Procedure

5 - Multi-Degree-of-Freedom Motion Equations

با به کار بردن روش مشابه، رابطه حرکت طبقه m به صورت زیر خواهد شد:

(۱۰-۹)

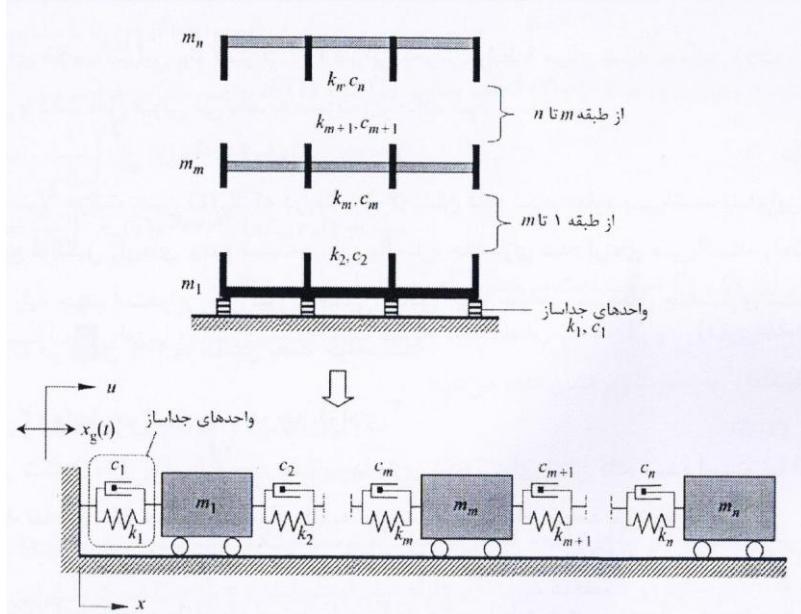
$$m_m \ddot{u}_m + C_m (\dot{u}_m - \dot{u}_{m-1}) - C_{m+1} (\dot{u}_{m+1} - \dot{u}_m) + K_m (u_m - u_{m-1}) - K_{m+1} (u_{m+1} - u_m) = 0$$

که در آن m_m جرم طبقه m است، C_m و C_{m+1} به ترتیب ضریب میرایی بین طبقه 1 و m و طبقه m و $m-1$ است. K_m و K_{m+1} به ترتیب به سختی طبقه بین 1 و m و طبقه m و $m-1$ اشاره دارد؛ u_m و u_{m-1} جابجایی طبقه 1 و m و $m-1$ را نشان می‌دهند.

در تراز بالاصله بالای سیستم جداساز که به عنوان طبقه اول معرفی شده است، با در نظر گرفتن حرکت زمین $x_g(t)$ که ساده شده است رابطه حرکت به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$m_1 \ddot{u}_1 + C_1 (\dot{u}_1 - \dot{x}_g) - C_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + K_1 (u_1 - x_g) - K_2 (u_2 - u_1) = 0 \quad (11-9)$$

که در آن m_1 جرم طبقه اول C_1 و k_2 به ترتیب ضریب میرایی و سختی طبقه، بین طبقات 1 و 2 می‌باشد. C_1 و k_1 به ترتیب به عنوان ضریب میرایی و سختی سیستم جداساز طراحی شده‌اند. u_1 و u_2 حرکت طبقه اول و دوم را نشان می‌دهند.



شکل ۳-۹ طرح شماتیک از سازه چند درجه آزادی جداسازی شده لرزه‌ای

با معرفی جابجایی نسبی میان طبقه و زمین که به صورت $x_m = u_m - x_g$ نمایش داده می‌شود، روابط (۹-۹)، (۱۰-۹) و (۱۱-۹) به صورت زیر خواهند شد:

$$m_n \ddot{x}_n + C_n (\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) - K_n (x_n - x_{n-1}) = -m_n \ddot{x}_g \quad (۹-۹\text{-الف})$$

(۱۰-۹\text{-الف})

$$m_m \ddot{x}_m + C_m (\dot{x}_m - \dot{x}_{m-1}) - C_{m+1} (\dot{x}_{m-1} - \dot{x}_m) + K_m (x_m - x_{m-1}) - K_{m+1} (x_{m+1} - x_m) = -m_n \ddot{x}_g \quad (۱۱-۹\text{-الف})$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + C_1 \dot{x}_1 - C_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K_1 x_1 - K_2 (x_2 - x_1) = -m_n \ddot{x}_g \quad (۱۱-۹\text{-الف})$$

روابط (۹-۹\text{-الف})، (۱۰-۹\text{-الف}) و (۱۱-۹\text{-الف}) روابط حرکت سیستم‌های چند درجه

آزادی را تشکیل می‌دهند، این روابط می‌تواند به شکل ماتریسی ارائه شود:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -\ddot{x}_g [M]\{1\} \quad (۱۲-۹)$$

که در آن $[M]$ ماتریس جرم، $[C]$ ماتریس میرایی و $[K]$ ماتریس سختی است که به صورت

زیر می‌باشند:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \ddots & \vdots & & & \\ & m_m & \dots & 0 & 0 \\ & & & \ddots & \\ & \text{sym.} & & m_{n-1} & \\ & & & & m_n \end{bmatrix} \quad (۱۲-۹\text{-الف})$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ c_2 + c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \ddots & \vdots & & & \\ & c_m + c_{m+1} & \dots & 0 & 0 \\ & & & \ddots & \\ & \text{sym.} & & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ & & & & c_n \end{bmatrix} \quad (۱۲-۹\text{-ب})$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ & k_2 + k_3 & 0 & 0 & 0 \\ & & \ddots & \vdots & \\ & & & k_m + k_{m+1} & \dots & 0 & 0 \\ & & & & \ddots & \\ \text{sym.} & & & & & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ & & & & & & k_n \end{bmatrix} \quad (12-9)$$

در رابطه (12-9)، $\{1\}$ بردار واحد $n \times 1$ است، $\{x\}$ و $\{\ddot{x}\}$ بردار ججابجایی نسبی، بردار سرعت و بردار شتاب سازه جداسازی شده لرزه‌ای است:

$$\{x\}^T = \{x_1 \ x_2 \dots x_m \dots x_{n-1} \ x_n\} \quad (13-9)$$

$$\{\dot{x}\}^T = \{\dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \dots \dot{x}_m \dots \dot{x}_{n-1} \ \dot{x}_n\} \quad (13-9\text{-الف})$$

$$\{\ddot{x}\}^T = \{\ddot{x}_1 \ \ddot{x}_2 \dots \ddot{x}_m \dots \ddot{x}_{n-1} \ \ddot{x}_n\} \quad (13-9\text{-ب})$$

یا نمایش بردار ججابجایی نسبی بر حسب بردار پاسخ کلی $\{x'\}$ رابطه (13-9) به صورت زیر خواهد شد:

$$\{x\} = [\phi]\{x'\} \quad (14-9)$$

که در آن $[\phi]$ ماتریس مودال است و به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$[\phi] = \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \phi_{1,1} & \dots & \phi_{1,m} & \dots & \phi_{1,n-1} & \phi_{1,n} \\ \phi_{2,1} & \phi_{2,2} & \dots & \phi_{2,m} & \dots & \phi_{2,n-1} & \phi_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_{m,1} & \phi_{m,2} & \dots & \phi_{m,m} & \dots & \phi_{m,n-1} & \phi_{m,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_{n-1,1} & \phi_{n-1,2} & \dots & \phi_{n-1,m} & \dots & \phi_{n-1,n-1} & \phi_{n-1,n} \\ \phi_{n,1} & \phi_{n,2} & \dots & \phi_{n,m} & \dots & \phi_{n,n-1} & \phi_{n,n} \end{bmatrix}$$

با مشتق گیری متوالی از رابطه (14-9) خواهیم داشت که:

$$[M][\phi]\{\ddot{x}'\} + [C][\phi]\{\dot{x}'\} + [K][\phi]\{x'\} = -\ddot{x}_g[M]\{1\} \quad (15-9)$$

ابتدا رابطه (15-9) را در $\{\phi\}^T$ و سپس آنرا بر $[\phi][\phi]^T$ تقسیم کرده، رابطه حرکت به صورت صفحه بعد می‌شود:

$$\{\ddot{x}'\} + \frac{\{\phi\}^T [C][\phi]}{\{\phi\}^T [M][\phi]} \{\dot{x}'\} + \frac{\{\phi\}^T [K][\phi]}{\{\phi\}^T [M][\phi]} \{x'\} = \frac{\{\phi\}^T [M][\phi]}{\{\phi\}^T [M][\phi]} \ddot{x}_g \quad (15-9\text{-الف})$$

با تعریف نسبت میرایی در هر مردم $\beta_m = C_m / 2\omega_m m_m$ و $m = 1, \dots, n$ آنگاه:

(۱۶-۹)

$$\frac{\{\phi\}^T [C][\phi]}{\{\phi\}^T [M][\phi]} = \begin{bmatrix} 2\beta_1\omega_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 2\beta_2\omega_2 & 0 & 0 & 0 \\ & & \ddots & \vdots & \\ & & & 2\beta_m\omega_m & \dots & 0 & 0 \\ & & & & \ddots & & \\ \text{sym.} & & & & & 2\beta_{n-1}\omega_{n-1} & 0 \\ & & & & & & 2\beta_n\omega_n \end{bmatrix} = [2\beta\omega]$$

که در آن $[2\beta\omega]$ یک ماتریس قطری $n \times n$ است. توجه شود که برای ساده‌سازی β و ω به جای β_n و ω_n استفاده خواهد شد. از نظر تئوری $\{\phi\}^T [C][\phi] (\{\phi\}^T [M][\phi])^{-1}$ نمی‌تواند به ماتریس قطری $[2\beta\omega]$ تفکیک گردد چرا که میرایی سیستم جداساز بزرگتر از سازه واقع بر روی سطح جداساز می‌باشد. اگر چه ثابت شده که اثر میرایی جفت شده^۱ که بر روی اعضای غیرقطري^۲ ماتریس $\{\phi\}^T [C][\phi] (\{\phi\}^T [M][\phi])^{-1}$ ، قرار دارد، برای اکثر سازه‌ها کوچک و قابل چشم‌پوشی است [۱۲]. بنابراین فرض آنکه نسبت میرایی می‌تواند تفکیک شود (همانطور که در رابطه ۱۶-۹ نشان داده شده)، دقت تحلیلی مطالعه رفتار کلی سیستم را از بین نمی‌برد. چنانچه وسیله میرایی به سیستم جداساز متصل گردد، اثر میرایی جفت شده قابل چشم‌پوشی نیست و آنالیز مودال پیچیده به منظور یافتن جواب لازم است [۳ و ۱۳]. بر پایه خواص سیستم سازه‌ای، سختی قطری $[\omega^2]$ نیز حاصل می‌شود:

$$\frac{\{\phi\}^T [K][\phi]}{\{\phi\}^T [M][\phi]} = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \omega_2^2 & 0 & 0 & 0 \\ & & \ddots & \vdots & \\ & & & \omega_m^2 & \dots & 0 & 0 \\ & & & & \ddots & & \\ \text{sym.} & & & & & \omega_{n-1}^2 & 0 \\ & & & & & & \omega_n^2 \end{bmatrix} = [\omega^2] \quad (۱۶-۹-\text{الف})$$

1 - Coupled damping effects

2- Off-diagonal

برای قسمت سمت راست رابطه (۱۵-۹-الف)، فاکتور مشارکت Γ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma = \frac{\{\phi\}^T [M] [\phi]}{\{\phi\}^T [M] [\phi]} \quad (16-9-ب)$$

فاکتور مشارکت می‌تواند به صورت $\Gamma = \{\Gamma_1 \dots \Gamma_m \dots \Gamma_n\}^T$ نوشته شود که Γ_m فاکتور مشارکت مد m را نشان می‌دهد بر اساس خاصیت متعامد روابط (۱۶-۹)، (۱۶-۹-الف) و (۱۶-۹-ب)، رابطه (۱۵-۹-الف) به صورت زیر تفکیک خواهد شد:

$$\ddot{x}_m + [2\beta\omega] \{x\} + [\omega^2] \{x\} = -\Gamma \ddot{x}_g \quad (17-9)$$

رابطه (۱۷-۹) مشابه رابطه (۱-۹-الف) برای حرکت سیستم‌های یک درجه آزادی است. اما این رابطه شامل n رابطه مستقل است که به طور مجزا می‌تواند برای هر مد ارتعاشی حل گردد:

$$\ddot{x}_m + 2\beta_m \dot{x}_m - \omega_m^2 x_m = -\Gamma_m \ddot{x}_g = \frac{\{\phi\}_m^T [M] [1]}{\{\phi\}_m^T [M] [\phi]_m} \ddot{x}_g \quad (17-9-الف)$$

که در آن $\{\phi\}_m^T = \{\phi_{1,m} \dots \phi_{m,m} \dots \phi_{n,m}\}$ است. با استفاده از انتگرال دوهامل حل رابطه (۱۷-۹-الف) برای هر طبقه از سازه جداسازی شده لرزه‌ای به صورت زیر می‌باشد:

$$x'_m(t) = \frac{1}{\bar{\omega}_m} \Gamma_m \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\beta_m \omega_m (\tau-t)} \sin \bar{\omega}_m (t-\tau) dt \quad (18-9)$$

که در آن $\bar{\omega}_m = \omega_m \sqrt{1 - \beta_m^2}$ ، فرکانس میرایی در مد m است. همانطور که در بخش ۱-۹ بیان شد $\sqrt{1 - \beta^2}$ برای سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای بدون وسیله میرایی ناچیز می‌باشد از این رو $\omega_m \approx \bar{\omega}_m$ و رابطه (۱۸-۹) به صورت زیر ساده می‌گردد:

$$x'_m(t) = -\frac{1}{\bar{\omega}_m} \Gamma_m \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\beta_m \omega_m (\tau-t)} \sin \omega_m (t-\tau) dt \quad (18-9-الف)$$

زمانی که بردار پاسخ کلی $\{x'\}$ از رابطه (۱۸-۹-الف) محاسبه شد، بردار جابجایی نسبی $\{x\}$ از رابطه (۱۴-۹) قابل محاسبه می‌گردد. بردار سرعت $\{\dot{x}\}$ و بردار شتاب $\{\ddot{x}\}$ با استفاده از روابط زیر به سادگی حاصل می‌شوند:

$$\{\dot{x}\} = \{\phi\} \{x'\} \quad (19-9)$$

$$\{\ddot{x}\} = \{\phi\} \{\ddot{x}'\} \quad (19-9-الف)$$

روش ارائه شده به روش جمع آثار جابجایی مودی که برای سازه‌ای با پای گیردار بکار می‌رود. همانطور که نشان داده شد برای سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای چند درجه آزادی که دارای واحدهای جداساز با نسبت میرایی کمتر از ۲۰٪ مقدار بحرانی هستند، قابل کاربرد است.

مثال ۱-۱-۹

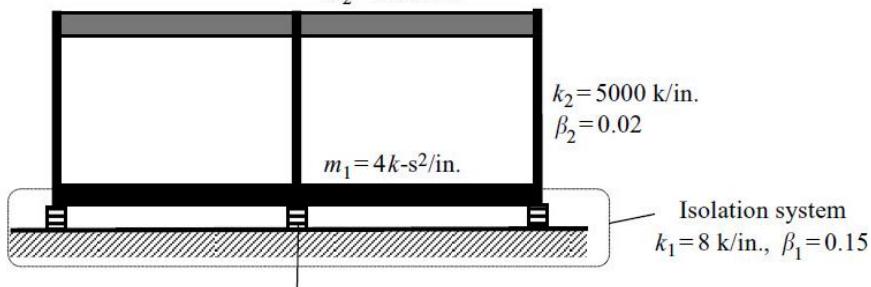
یک سازه یک طبقه جداسازی شده لرزه‌ای دار به جرم $(876.4 \times 10^3 \text{ kg})5 \text{ k.S}^2 / \text{in}$ است. جرم طبقه‌ای که بلا فاصله بعد از جداساز قرار دارد $(700.5 \times 10^3 \text{ kg})4 \text{ k.S}^2 / \text{in}$ است. سختی روسازه و سیستم جداساز به ترتیب $(1.4 \text{ KN/mm})8 \text{ k/in}$ و $(875.6 \text{ KN/mm})500 \text{ k/in}$ و $(875.6 \text{ KN/mm})500 \text{ k/in}$ است. فرض ارائه شده و میرایی بحرانی ۱۵٪ به طور آزمایشگاهی برای سیستم جداساز تعیین شده است. این سازه در شکل (۴-۹) نشان داده شده است. موارد زیر را محاسبه نمایید؟

$$1) \text{ زمان تناوب سیستم را محاسبه نمایید } T_m = \frac{2\pi}{\omega_m}, m=1,2$$

۲) ماتریس م DAL را تعیین کنید $[\phi]$

۳) بردار جابجایی $\{x\}$ و شتاب $\{\dot{x}\}$ سیستم را محاسبه نمایید.

$$m_2 = 5 \text{ k.s}^2/\text{in.}$$



شکل ۱-۱-۹ مثال ۴

۱) مطابق با داده‌های مثال، ماتریس جرم به صورت زیر خواهد بود:

$$\omega^2 [M] = \begin{bmatrix} 4\omega^2 & 0 \\ 0 & 5\omega^2 \end{bmatrix} [M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix} \quad (\text{الف})$$

ماتریس سختی برابر است با:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 + 5000 & -5000 \\ -5000 & 5000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5008 & -5000 \\ -5000 & 5000 \end{bmatrix} \quad (\text{ب})$$

با استفاده از رابطه زیر و فرض دترمینان صفر برای متغیر $\{x\}$ ، فرکانس زاویه‌ای قابل محاسبه است:

$$\left([K] - \omega^2 [M] \right) \{x\} = \{0\}$$

$$\begin{vmatrix} 5008 - 4\omega^2 & -5000 \\ -5000 & 5000 - 5\omega^2 \end{vmatrix} \quad (\text{ج})$$

$$\text{برای } \omega_1 = 2.974 \text{ rad/S و } \omega_1^2 = 8.845$$

زمان تناوب مربوط به مود اول برابر است با:

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2\pi}{2.974} = 2.113 \text{ s} \quad (\text{د})$$

برای $\omega_1 = 47.552 \text{ rad/S}$ و $\omega_2^2 = 226.155$ ؛ زمان تناوب مربوط به مود دوم برابرست با:

$$T_2 = \frac{2\pi}{\omega_2} = \frac{2\pi}{47.552} = 0.132 \text{ s} \quad (\text{ه})$$

۲) فرض شود که مود طبیعی متناظر با فرکانس اول و دوم به صورت زیر ارائه شود:

$$\{\phi\}_1 = \begin{Bmatrix} \phi_{1,1} \\ \phi_{2,1} \end{Bmatrix} \text{ و } \{\phi\}_2 = \begin{Bmatrix} \phi_{1,2} \\ \phi_{2,2} \end{Bmatrix} \quad (\text{و})$$

$$\text{برای } \omega_1^2 = 8.845$$

$$\begin{bmatrix} 5008 - 4(8.845) & -5000 \\ -5000 & 5000 - 5(8.845) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{1,1} \\ \phi_{2,1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{ز})$$

$$\begin{Bmatrix} \phi_{1,1} \\ \phi_{2,1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.9912 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (\text{ح})$$

$$\text{برای } \omega_2^2 = 2261.155$$

$$\begin{bmatrix} 5008 - 4(2261.155) & -5000 \\ -5000 & 5000 - 5(2261.155) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{1,1} \\ \phi_{2,1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{ط})$$

$$\begin{Bmatrix} \phi_{1,1} \\ \phi_{2,1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -0.7929 \end{Bmatrix} \quad (\text{ی})$$

بنابراین ماتریسی مودال به صورت زیر خواهد شد:

$$[\phi] = \begin{bmatrix} 0.9912 & 1.0000 \\ 1.0000 & -0.7929 \end{bmatrix} \quad (\text{ک})$$

(۳) بر پایه ماتریس مودال محاسبه شده از رابطه (ک)،

$$\{\phi\}_1^T [M] \{\phi\}_1 = \{\phi_{1,1} \quad \phi_{2,1}\} \begin{Bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{1,1} \\ \phi_{2,1} \end{Bmatrix} \quad (\text{ل})$$

$$\{0.9912 \quad 1\} \begin{Bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 5 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 0.9912 \\ 1 \end{Bmatrix} = 8.9299$$

$$\{\phi\}_2^T [M] \{\phi\}_2 = \{\phi_{1,1} \quad \phi_{2,1}\} \begin{Bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{1,2} \\ \phi_{2,2} \end{Bmatrix} \quad (\text{م})$$

$$\{1 \quad -0.7929\} \begin{Bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 5 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} -0.7929 \\ 1 \end{Bmatrix} = 7.1435$$

$$[\phi]^T [M] [\phi] = \begin{bmatrix} 8.9299 & 0 \\ 0 & 7.1435 \end{bmatrix} \quad (\text{ن})$$

$$\left([\phi]^T [M] [\phi] \right)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{8.9299} & 0 \\ 0 & \frac{1}{7.1435} \end{bmatrix} \quad (\text{ص})$$

مطابق رابطه (۱۶-۹-الف):

$$\begin{aligned} [\phi]^T [K] [\phi] &= \begin{bmatrix} 0.9912 & 1.0000 \\ 1.0000 & -0.7929 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5080 & -5000 \\ -5000 & 5000 \end{bmatrix} \\ [\phi]^T [M] [\phi] &= \begin{bmatrix} 8.9299 & 0 \\ 0 & 7.1435 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{ع})$$

$$\begin{bmatrix} 0.9912 & 1.0000 \\ 1.0000 & -0.7929 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{8.9299} & 0 \\ 0 & \frac{1}{7.1435} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.845 & 0 \\ 0 & 2261.155 \end{bmatrix}$$

از آنجا که با توجه به شرایط ارائه شده ترکیب اثر میرایی وجود ندارد، رابطه (۱۶-۹) قابل

استفاده و به صورت صفحه بعد محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} [\phi]^T [C] [\phi] &= \begin{bmatrix} 2(0.15)(2.974) & 0 \\ 0 & 2(0.02)(47.552) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 8.845 & 0 \\ 0 & 0.9021 \end{bmatrix} \\ [\phi]^T [M] [\phi] &= \end{aligned} \quad (\text{ف})$$

فاکتور مشارکت که با استفاده از رابطه (۱۶-۹-ب) تعیین می‌شود، برای هر یک از درجات

آزادی به صورت صفحه بعد محاسبه می‌شود:

$$\Gamma_1 = \frac{\{\phi\}_1^T [C]\{1\}}{\{\phi\}_1^T [M]\{\phi\}_2} = [0.9912 \quad 1] \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{1}{8.9299} = 1.0039 \quad (\text{ض})$$

$$\Gamma_2 = \frac{\{\phi\}_2^T [C]\{1\}}{\{\phi\}_1^T [M]\{\phi\}_2} = [1 \quad -0.7929] \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{1}{7.1435} = 0.0050 \quad (\text{ق})$$

با جایگذاری این نتایج در رابطه (۱۷-۹-الف) روابط حرکت مجزا به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\ddot{x}_1' + 0.8992\dot{x}_1' + 8.845x_1' = -1.0039\ddot{x}_g \quad (\text{ر})$$

$$\ddot{x}_2' + 1.9021\dot{x}_1' + 2261.155x_2' = -0.005\ddot{x}_g \quad (\text{ش})$$

با جایگذاری $\{x\} = [\phi]\{x'\}$ و $x_2' = \{x\}(t)$ در رابطه (۱۴-۹)، هر یک از مولفه‌های $\{x\}$ به

صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\phi_{1,1}x_1'(t) = -0.3346 \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-0.4461(t-\tau)d\tau} \sin[2.974(t-\tau)] d\tau \quad (\text{خ})$$

$$\phi_{1,2}x_2'(t) = -0.0001 \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-0.951(t-\tau)d\tau} \sin[47.552(t-\tau)] d\tau \quad (\text{ذ})$$

$$\phi_{2,1}x_1'(t) = -0.3375 \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-0.4461(t-\tau)d\tau} \sin[2.974(t-\tau)] d\tau \quad (\text{س})$$

$$\phi_{2,2}x_2'(t) = 0.0001 \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-0.951(t-\tau)d\tau} \sin[47.552(t-\tau)] d\tau \quad (\text{ظ})$$

در مقایسه، $\phi_{1,1}x_1'(t)$ و $\phi_{2,2}x_2'(t)$ ، مشارکت $\phi_{1,2}x_2'(t)$ و $\phi_{2,1}x_1'(t)$ در جابجایی هر طبقه بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است. در این مثال به خوبی نشان داده شد که جابجایی جانبی اساساً توسط سیستم جداساز ایجاد می‌گردد و سازه روی جداساز به ندرت از خود جابجایی و یا تغییر مکان طبقه نشان می‌دهد، لذا جابجایی طبقه بلافاصله روی سیستم جداساز، تقریباً به

صورت زیر ارائه می‌شود:

$$x_1(t) = \phi_{1,1}x_1'(t) + \phi_{1,2}x_2'(t) \quad (\text{غ})$$

$$\approx -0.3346 \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-0.4461(t-\tau)d\tau} \sin[2.974(t-\tau)] d\tau$$

و جابجایی طبقه با م به صورت زیر می‌باشد:

$$x_2(t) = \phi_{2,1}x_1'(t) + \phi_{2,2}x_2'(t) \quad (\text{الف الف})$$

$$\approx -0.3375 \int_0^1 \ddot{x}_g(\tau) e^{-0.4461(t-\tau)d\tau} \sin[2.974(t-\tau)] d\tau$$

با دو بار مشتق گیری از $x_1(t)$ و $x_2(t)$ شتاب هر یک از این طبقات محاسبه می‌گردد:

$$\ddot{x}_1(t) = 2.8928 \int_0^1 \ddot{x}_g(\tau) e^{-0.4461(t-\tau)d\tau} \sin[2.974(t-\tau)] d\tau + \quad (\text{ب ب})$$

$$0.8879 \int_0^1 \ddot{x}_g(\tau) e^{-0.4461(t-\tau)d\tau} \cos[2.974(t-\tau)] d\tau$$

$$\ddot{x}_2(t) = 2.9178 \int_0^1 \ddot{x}_g(\tau) e^{-0.4461(t-\tau)d\tau} \sin[2.974(t-\tau)] d\tau + \quad (\text{ج ج})$$

$$0.8956 \int_0^1 \ddot{x}_g(\tau) e^{-0.4461(t-\tau)d\tau} \cos[2.974(t-\tau)] d\tau$$

۲-۹- خصوصیات مکانیکی جداساز و تکنیک‌های مدلسازی کامپیووتری^۱

۱-۹- مقدمه

روابط حرکت در بخش ۱-۹ برای سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای حاصل شدند بر مبنای فرضیات میرایی و سختی موثر سیستم جداساز و نیز سختی خطی سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای سازه^۲ پایه گذاری شده است. بنابراین، پاسخ‌هایی که سازه از خود نشان می‌دهد رابطه خطی با نیروی لرزه‌ای وارد بر هر دو سازه و سیستم جداساز خواهد داشت. اگر چه شکل‌های پیچیده ساختمان، تاثیر شرایط خاک بسیار نرم بر روی سازه بالای سیستم جداساز، نزدیکی ساختمان به گسل‌های بزرگ فعال، موجب می‌شود که آنالیز خطی قادر به تحلیل عملکرد سازه‌ای مانند تاثیر پالس واقعی^۳ بر سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای سازه و هم بر سیستم جداساز، به طور دقیق نباشد. محدودیت ظرفیت تحلیل خطی با مشارکت ویژگی‌های مکانیکی واقعی واحد جداساز و یا بالشتک در روند تحلیل از بین خواهد رفت که منجر به آنالیز غیرخطی می‌گردد.

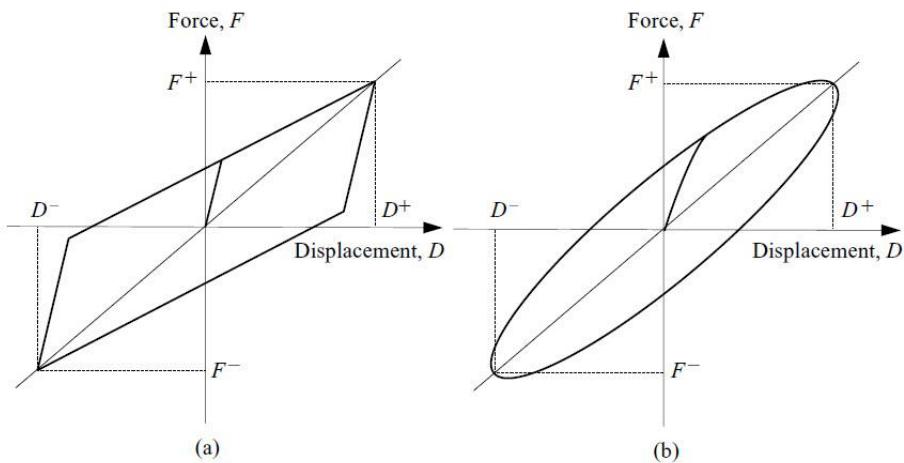
1 - Base Isolator Mechanical Characteristics and Computer Modeling Techniques

2 - Structure's Seismic Force-resisting System

3 - Actual Pulse

از نظر تئوری، رفتار غیرخطی سازه جداسازی شده لرزه‌ای از دو منبع ناشی می‌شود: تغییر شکل غیرخطی سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای ساختمان و سیستم جداساز. از آنجا که سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای بسیار سخت‌تر از سیستم جداساز است، لذا تغییر شکل غیراستیک اساساً در سیستم جداساز مرکز می‌شود و به طور منطقی فرض می‌شود که سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای ساختمان رفتارهای خطی از خود نشان می‌دهد. بنابراین اهداف طراحی، تنها لحاظ نمودن خواص غیرخطی بالشتک‌ها می‌تواند نمایشگر عملکرد واقعی سازه جداسازی لرزه‌ای باشد و دقت لازم را فراهم نماید.

خواص مکانیکی بالشتک‌های مختلف به طور گستره مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل‌های مختلف از خواص مکانیکی برای تشریح رفتار هیستزیس و ویسکوالاستیک^۱ بالشتک‌ها گسترش داده شد. رفتار هیستزیس متعکس کننده پارامترهایی از بالشتک است که مستقل از سرعت می‌باشند. این پارامترها حداکثر و حداقل جابجایی بالشتک تحت نیروی برشی حداکثر و حداقل را نشان می‌دهند. از سوی دیگر رفتار ویسکوالاستیک بالشتک دارای خصوصیات وابسته به سرعت است. این خصوصیات حداکثر و حداقل برشی را که معمولاً قبل از حداکثر و حداقل جابجایی رخ می‌دهد را نمایش می‌دهند. رفتار ایده‌آل شده هیستزیس و ویسکوالاستیک بالشتک‌ها در شکل (۵-۹) نشان داده شده است. از میان تمامی مدل‌های پیشنهاد شده مدل دو خطی برای اهداف تحقیق و طراحی پذیرفته شده‌تر می‌باشد. چرا که آنها به سادگی تنها خواص مکانیکی صحیح بالشتک‌ها را توصیف نمی‌کنند بلکه هم برای نوع بالشتک‌های الاستومتریک و هم برای نوع بالشتک‌های لغزنده مناسب می‌باشند.



شکل ۵-۹ روابط ایده‌آل شده نیرو- جابجایی برای سیستم جاسازی شده:

(الف) رفتار هیستریک^۱ (ب) و رفتار ویسکوالاستیک

گسترش و کاربرد یک مدل دو خطه برای انواع بالشتک‌های مختلف در بخش آینده به طور گستردۀ بحث خواهد شد. تعریف یک مدل دو خطی با تعیین سه پارامتر پایه آغاز می‌گردد. سپس بر پایه خواص منحصر به فرد هر بالشتک، روابط خاص برای محقق نمودن سه پارامتر پایه ارائه می‌شود. سایر ویژگی‌های بالشتک‌ها نظیر میرایی موثر و سختی قائم همچنین برای گسترش مدل بالشتک معرفی می‌شود. در بخش آخر کاربرد مدل دو خطی در برنامه‌های کامپیوتربه همراه توضیحی از پارامترهای ورودی بالشتک‌ها در نرم‌افزارهای تجاری بحث خواهد شد.

۵-۲-۹ مدل دو خطی و پارامترهای مدل^۲

یک مدل دو خطی که برای نشان دادن رابطه بین نیروی برشی و جابجایی جانبی استفاده می‌شود می‌تواند با سه پارامتر تعریف شود: سختی الاستیک^۳ k_e ، سختی پس از تسlijم^۴ k_p و مقاومت مشخصه^۵ Q . برای تعیین پایداری رفتار هسیترزیس زمانی که

1 - hysterestic

2 - Bilinear Model and Model Parameters

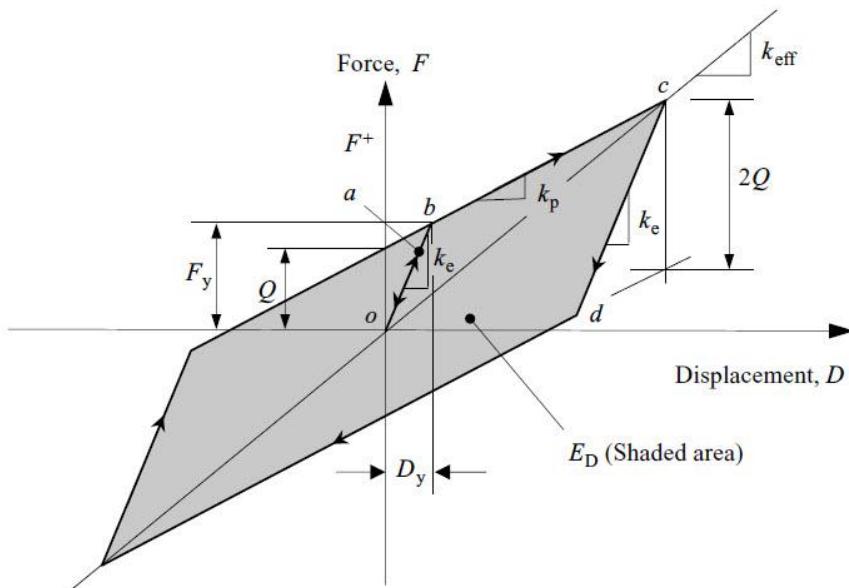
3 - Elastic Stiffness

4 - Charactertic Stiffness

5 Charactertic strength

بالشتک‌ها تعداد زیادی از چرخه‌های بارگذاری را تجربه می‌کنند، استفاده می‌شود. این سه پارامتر به خوبی خصوصیات مکانیکی بالشتک‌ها را منعکس می‌سازند و تخمین مناسبی از رفتار غیرخطی بالشتک فراهم می‌سازند.

در شکل ۶-۹ مدل دو خطی ایده‌آل شده بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. زمانی که اعمال برش بر بالشتک آغاز می‌گردد، رابطه خطی که با خط \overline{oa} نشان داده شده، بین برش و جابجایی جانبی وجود دارد. چنانچه برش وارد از نقطه a کاهش یابد، مسیر باربرداری در راستای خط \overline{ob} به صورت خطی می‌باشد. هنگامیکه برش وارد از نقطه b افزایش می‌یابد، تسلیم بالشتک رخ می‌دهد. پس از نقطه b ، با افزایش اندک برش، بالشتک جابجایی بزرگتری را تجربه می‌کند و سختی آن با سختی پس از تسلیم k_p تعریف می‌شود. چنانچه باربرداری در نقطه c آغاز شود، مسیر باربرداری در راستای مسیر قبلی نخواهد بود. مسیر جایگزین \overline{cd} است که دارای سختی برابر با سختی اولیه خط \overline{oa} است. مقدار برش $2F_y$ است که F_y نیروی تسلیم است. با ادامه برش فراتر از نقطه d ، مسیر باربرداری به موازات خط \overline{bc} با سختی k_e می‌باشد.



شکل ۶-۹ مدل دو خطی از واحد جداساز

سختی موثر^۱ بالشتک k_{eff} در ناحیه پس از کمانش می‌تواند با پارامترهای سختی پس از تسلیم k_p و مقاومت مشخصه Q به همراه جابجایی جانبی متضطرر Q نمایش داده شود:

$$k_{\text{eff}} = k_p + \frac{Q}{D}$$

جابجایی تسلیم D_y که در برخی از برنامه‌های کامپیووتری برای تعریف مدل دو خطی استفاده می‌شود، با استفاده از k_e , k_p و Q قابل محاسبه است:

$$D_y = \frac{Q}{k_e - k_p} \quad (21-9)$$

نیروی تسلیم F_y ، در جابجایی تسلیم D_y برابر است با:

$$F_y = Q + k_p D_y \quad (22-9)$$

میرایی موثر^۲ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{E_D}{2\pi k_{\text{eff}} D^2} \quad (23-9)$$

که در آن E_D انرژی مستهلک شده است (شکل ۶-۹). برای مدل دو خطه E_D ، مساحت محصور شده توسط حلقه هیسترزیس بین جابجایی جانبی D^- و D^+ در هر چرخه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین $E_D = 4Q(D - D_y)$ و میرایی موثر β_{eff} برابر است با:

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi k_{\text{eff}} D^2} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi k_{\text{eff}} D^2} \quad (23-9-\text{الف})$$

در طراحی، سختی موثر و میرایی موثر در جابجایی طراحی D_D و جابجایی حداکثر D_M تعیین می‌شود. تعریف جابجایی طراحی و جابجایی حداکثر در بخش ۲-۳-۹ ارائه می‌گردد.

۲-۳-۹- مدل دو خطی از سیستم با هسته سربی^۳

مقاومت مشخص Q بالشتک با هسته سربی غالباً با مقاومت برشی هسته سربی کترول می‌شود. اگر چه رفتار چرخهای بالشتک حتی اگر تحت بارگذاری چرخهای زیاد قرار بگیرد کاملاً پایدار است. رابطه (۲۴-۹)، رابطه میان مقاومت مشخصه Q و تنش تسلیم هسته سربی F_{y1} و مساحت آن A_1 را نشان می‌دهد:

1 - Effective stiffness

2 - Effective damping

3 - Bilinear Model of lead-plug bearing System

$$Q = A_l F_{y1} \quad (24-9)$$

سختی پس از تسلیم k_p از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$k_p = \frac{A_b G f_L}{t} \quad (25-9)$$

که در آن A_b مساحت محصور لاستیک، t ضخامت کلی لاستیک و f_L ضریبی است که معمولاً $1/5$ است. G مدول برشی مماسی لاستیک است که بر پایه آزمایش برش دینامیکی تعیین می‌شود.

سختی لاستیک k_e ، به راحتی قابل محاسبه نیست ولی از رابطه زیر به طور تقریبی می‌توان مقدار آنرا مشخص کرد:«

$$6.5 k_p \leq k_e \leq 10 k_p \quad (25-9\text{-الف})$$

با استفاده از رابطه (۲۱-۹) جابجایی تسلیم به صورت زیر قابل محاسبه است. فرض می‌شود که $k_e = k k_p$ که نسبت سختی لاستیک به سختی پس از تسلیم با k نشان داده می‌شود و مقدار آن بین $6/5$ تا 10 است [۶]:

$$D_y = \frac{Q}{k_e - k_p} \approx \frac{Q}{k k_e - k_p} = \frac{Q}{(K-1)k_p} \quad (26-9)$$

با جایگذاری جابجایی تسلیم و سختی موثر در رابطه (۲۳-۹-الف) میرایی موثر بر حسب k_p و K بدست خواهد امد:

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D - D_y)}{2\pi k_{eff} D^2} = \frac{2Q[(K-1)k_p D - D_y]}{\pi(K-1)k_p(k_p D + Q)D} \quad (27-9)$$

پس از محاسبه مقاومت مشخصه Q و سختی پس از تسلیم از آزمایش پروتوتایپ^۱ بالشتک مدل دوخطی به راحتی قابل استخراج است و می‌تواند جهت تحلیل عملکرد غیرخطی سازه مجهز به بالشتک با هسته سربی بکار رود.

۹-۴-۳- مدل دوخطی سیستم لاستیک با میرایی بالا^۱

به منظور تهیه مدل دوخطی برای بالشتک لاستیکی با میرایی بالا، سه پارامتر مورد استفاده قرار می‌گیرد که از مدول برشی مماسی G و میرایی موثر β_{eff} به دست می‌آید. مدول برشی مماسی با استفاده از آزمایش برش دینامیکی تعریف می‌شود. میرایی موثر با استفاده از آزمایش پروتوتایپ بالشتک بدست می‌اید که بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ میرایی بحرانی است [۱۳]. سپس سختی پس از تسلیم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$k_p = \frac{GA_b}{t} \quad (28-9)$$

که در آن A_b مساحت محصور شده از لاستیک و t ضخامت کلی لاستیک است. مقاومت مشخصه Q می‌تواند با استفاده از رابطه زیر مورد ارزیابی قرار گیرد:

$$Q = \frac{\pi \beta_{\text{eff}} k_p D_D^2}{(2 - \pi k_{\text{eff}}) D_D - 2D_y} \quad (29-9)$$

که D_D جابجایی طراحی است. در رابطه (۲۹-۹) تا زمانی که پارامترهای k_e ، k_p و Q محاسبه نشوند جابجایی تسلیم y نامعین است. یک تخمین تقریبی از D_y با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بر مبنای ضخامت کلی لاستیک t به صورت مقابل می‌باشد. $D_y = \lambda t$ ، که ضریب λ بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ متغیر است [۶].

پس از تعیین k_p و Q ، نیروی تسلیم y به راحتی از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$F_y = Q + k_p D_y \quad (30-9)$$

سپس سختی لاستیک بالشتک لاستیکی با میرایی بالا برابر می‌شود با:

$$k_e = \frac{F_y}{D_y} = k_p + \frac{Q}{D_y} = k_p \left\{ 1 + \frac{\pi \beta_{\text{eff}} k_p D_D^2}{\lambda t [(2 - \pi k_{\text{eff}}) D_D - 2\lambda t]} \right\} \quad (31-9)$$

با جایگذاری $D_y = \lambda t$ در رابطه (۲۳-۹ الف) سختی موثر در جابجایی طراحی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$k_{\text{eff}} = \frac{2Q(D - \lambda t)}{\pi \beta_{\text{eff}} D_D^2} \quad (32-9)$$

۱-۵-۲- مدل دو خطی از سیستم پاندول اصطکاکی^۱

مقاومت مشخصه بالشتک پاندول اصطکاکی، Q از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$Q = \mu_S P_C \quad (33-9)$$

که در آن P_C نیروی محوری وارد بر بالشتک است که ترکیب بار مرده و اثر شتاب قائم می‌باشد. چنانچه تأثیر شتاب قائم ناچیز باشد و قابل چشم پوشی باشد، آنگاه نیروی محوری P_C به صورت مقابله ساده می‌شود $\mu_S = P_C = P_g$. ضریب اصطکاکی لغزشی^۲ است که وابسته به سرعت لغزشی^۳ است و برابر است با:

$$\mu_S = f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min}) e^{-\xi \{ \dot{D} \}} \quad (34-9)$$

در رابطه (۳۴-۹) f_{\max} و f_{\min} ضرایب اصطکاک به ترتیب در سرعت‌های بالا و پایین می‌باشند؛ D سرعت جابجایی بالشتک را نشان می‌دهد؛ ξ معکوس مشخصه سرعت لغزشی^۴ نامیده می‌شود، که انتقال از f_{\min} به f_{\max} را کنترل می‌کند و با استفاده از آزمایش تعیین می‌گردد. یک مقدار تقریبی پیشنهاد شده برای ξ برابر است با $2.54S/in [5]$. سختی پس از تسلیم با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K_P = \frac{P_C}{R} \quad (35-9)$$

که در آن R شعاع انحنای سطح لغزش را نشان می‌دهد، نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که معمولاً سختی الاستیک بالشتک پاندول اصطکاکی^۵ K_P ، بیش از 100 برابر بزرگتر از سختی پس از تسلیم K_p است. لذا جابجایی تسلیم D_y بسیار کوچک است و تقریباً برابر با $0.1in$ است. با استفاده از رابطه (۳۰-۹) سختی موثر بالشتک پاندولی اصطکاکی در جابجایی طراحی D_D برابر می‌شود با:

$$k_{eff} = K_P + \frac{Q}{D} = P_C \frac{1}{R} + \frac{\mu_S}{D_n} \quad (37-9)$$

از آنجا که جابجایی تسلیم D_y بسیار کوچکتر از جابجایی طراحی است، مساحت حلقه هیسترزیس بالشتک پاندول اصطکاکی ساده‌تر می‌شود و تقریباً برابر می‌شود با:

1 - Bilinear Model of Friction Pendulum System

2 - Coefficient of Sliding Friction

3 - Sliding Velocity

4 - Characteristic Sliding Velocity

$$E_D = 4Q(D_D - D_y) \approx 4QD_D = 4\mu_S P_C D \quad (38-9)$$

با جایگذاری روابط (۳۸-۹) و (۳۷-۹) در رابطه (۲۳-۹-الف) میرایی موثر بالشتک پاندول اصطکاکی برابر می‌شود با:

$$\beta_{eff} = \frac{E_D}{2\pi k_{eff} D_D^2} = \frac{4\mu_S P_C D_D}{2\pi P_C (1/R + \mu_S / D_D) D_D^2} = \frac{2\mu_S}{\pi (D_D / R + \mu_S)} \quad (39-9)$$

۶-۲-۹- مدلسازی کامپیووتری از سیستم جداساز^۱

مدلسازی سیستم‌های جداساز توسط کامپیووتر در اصل از مدل یک درجه آزادی که به منظور ساده سازی سازه روی سیستم جداساز را صلب در نظر گرفته و تنها واحد جداساز را غیرخطی فرض می‌کند، استنتاج شده است. اگرچه با پیشرفت تکنولوژی محاسبات و کاهش زمان پردازش، سیستم‌های جداساز برای تحلیل سازه‌ای دو بعدی و سه بعدی در برنامه‌های کامپیووتری به کار گرفته شد. در ضمن، ابداع کامپیووترهای شخصی با سرعت بالا و کاهش هزینه سخت افزاری کامپیووترها منجر به گسترش برنامه‌های کامپیووتری قدرتمند برای تحلیل و طراحی سازه‌های ساختمانی پیچیده با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی واحدهای جداساز و سازه روی سیستم جداساز، شد.

از میان سایر برنامه‌های معروف، SAP2000 و ETABS [۴] به عنوان برنامه‌های قابل اعتماد جهت تحلیل و طراحی سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای شناخته شدند. هر دو برنامه قادر به انجام تحلیل معادل آنالیز طیف پاسخ، آنالیز تاریخچه زمانی خطی و آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی می‌باشند، اما هر یک از این دو برنامه ویژگی‌های منحصر به فرد خود را دارند. SAP2000 دارای توابع پیشرفتی برای طراحی و بررسی هر سازه جداسازی شده لرزه‌ای نظیر ساختمان و پل می‌باشد. در حالیکه ETABS اساساً برای تحلیل و طراحی سازه ساختمانی همراه با جداسازی لرزه‌ای می‌باشد. کاربری که با یکی از این دو نرم افزار آشنا باشد، جهت استفاده از نرم افزار دیگر مشکل نخواهد داشت. از آنجا که فرضیات ویژگی‌های جداسازها به طور پایه در هر دو برنامه یکسان است، این بخش به نحوه مدلسازی خصوصیات جداساز تنها در برنامه ETABS می‌پردازد.

دو نوع المان پیوند Link elements در نرم‌افزار ETABS وجود دارد: ۱- که برای مدلسازی بالشتک‌های الاستومتریک استفاده می‌شود و ۲- که برای بالشتک پاندول اصطکاکی در نظر گرفته می‌شود. برای Isolator^۱, سختی موثر k_{eff} و میرایی موثر β_{eff} بالشتک در دو راستای اصلی روسازه برای تحلیل طیف پاسخ و آنالیز تاریخچه زمانی خطی وارد می‌شوند. همانطور که در بخش ۹-۲-۲ بحث شد، k_{eff} و β_{eff} در جابجایی طراحی D_D و یا جابجایی حداکثر D_M محاسبه می‌شوند. اگرچه D_D و D_M حاصل از نتایج ETABS معمولاً مقادیر یکسان با مقادیر استفاده شده برای تعیین مقادیر k_{eff} و β_{eff} که در ابتدا به کار می‌روند، نمی‌باشند. روش سعی و خطا برای تطبیق D_D و D_M حاصل از نتایج ETABS با مقادیر فرض شده برای تعیین k_{eff} و β_{eff} باید انجام شود. بعلاوه، در خصوص وارد کردن میرایی موثر β_{eff} می‌بایست توجه لازم مبذول گردد. در طی آنالیز خطی نظیر آنالیز طیف پاسخ، ضریب میرایی کلی سیستم سازه‌ای شامل دو قسمت است: یک قسمت به روسازه بالای جداسازه اختصاص دارد و دیگری به طور خودکار توسط ETABS از میرایی موثر β_{eff} در نظر گرفته برای هر Isolator^۱ در مدل سازه پوشش داده می‌شود [۴].

اگر از Isolator^۱ برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شود، این مشخصات از بالشتک‌ها برای هر دو جهت اصلی روسازه لازم می‌باشد. سختی الاستیک k_e ، جابجایی تسلیم D_y ، نسبت سختی پس از تسلیم به سختی الاستیک $k_p = k_e / \eta$. بر پایه این پارامترها اطلاعات ورودی، ETABS به طور خودکار یک مدل دو محور هیسترزیس از بالشتک برای لحاظ نمودن رابطه برش - تغییر مکان در دو جهت اصلی در نظر گرفته شده، تولید می‌کند.

بالشتک‌های نوع الاستومتریک، سختی قائم بیشتری در فشار نسبت به کشش دارند. اگرچه مقدار سختی قائم Isolator^۱ در کشش و فشار یکسان در نظر گرفته می‌شود. چنانچه سختی قائم در کشش با مقدار برابر در فشار مدل شود نیروی واژگونی^۱ یا بلندشدگی^۲ به طور غیرطبیعی بزرگ می‌شد و بالشتک‌ها ظرفیت مقاومت در برابر این نیروهای کششی بزرگ را ندارند. نتیجتاً، نتایج تحلیلی به طور اشتباه عملکرد واقعی سازه جداسازی شده لرزه‌ای را منعکس می‌سازد. برای مدلسازی سختی قائم متفاوت در کشش و فشار می‌توان از یک المان

1 - Overturning

2 - uplift

فاصله^۱ برای Isolator۱ استفاده کرد. المان فاصله در سختی قائم در فشار است اما در مقابل نیروی کششی مقاومتی نخواهد داشت. بنابراین از سختی کششی k_{ten} برای Isolator۱ استفاده شود و برای المان فاصله از سختی k_{com} - k_{ten} در راستای قائم فرض شود. هنگامی که بالشتک تحت فشار است و تغییر شکل قائم برابر μ فرض شود، مجموع نیروی فشاری در Isolator۱ و المان فاصله برابرست با $k_{en}u + (k_{com} - k_{en})u = k_{com}u$ که نشان می‌دهد که سختی فشاری بالشتک به درستی توسط ترکیب دو المان در یک موقعیت، فرض شده است.

Isolator۲ که برای مدلسازی مشخصات بالشتک پاندول اصطکاکی استفاده می‌شود، به بالشتک اجازه حرکت به سمت بالا بدون هیچ سختی کششی را می‌دهد. در راستای قائم Isolator۲ به مانند یک المان فاصله رفتار می‌کند و کاربر می‌بایست سختی فشاری آنرا تعریف کند. سختی موثر k_{eff} و میرای موثر β_{eff} در دو راستای اصلی سازه روی جداساز می‌بایست برای Isolator۲ وارد گردند. سختی الاستیک k_e می‌بایست برای آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی تعريف گردد. برخلاف Isolator۱، بالشتک Isolator۲ نیاز به تعريف شعاع انحنای سطح لغزشی R دارد. همچنین معکوس مشخصه سرعت لغزش $\dot{\theta}$ که اساساً وابسته به فشار بالشتک و ضریب اصطکاک لغزشی در سرعت بالا f_{max} و ضریب اصطکاک لغزشی در سرعت پایین f_{min} است. برای محاسبه ضریب اصطکاکی S μ و جابجایی تسليم y در Isolator۲ لازم می‌باشد. سختی پس از تسليم به طور خودکار با استفاده از بار محوری اعمال شده P_C و شعاع انحنای سطح لغزش R تولید می‌گردد. یک مدل دو محوره هیسترزیس از بالشتک که رابطه برش - تغییر مکان ترکیبی^۲ در دو راستای اصلی فرض شده را نشان می‌دهد نیز به طور خودکار تولید می‌گردد.

در هر دو Isolator۱ و Isolator۲ نیاز به اختصاص دادن وزن خود بالشتک، جرم انتقالی^۳ و جرم دورانی ممان اینرسی^۴ است، چرا که لازم است تا بردار ریتز^۵ مناسب در روند تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی فعل گردد.

1 - gap element

2 - Coupled

3 - translational mass

4 - rotational mass moment of inertia

5 - Ritz vector

۳-۹ - ضوابط آیین‌نامه‌ای برای طراحی سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای^۱

۱-۳-۹ - مقدمه

نخستین دستورالعمل طراحی سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای در امریکا در بخش شمالی جامعه مهندسان سازه کالیفرنیا^۲ (SEAOC) در سال ۱۹۸۶ گسترش داده شد [۱۵]. کمیته لرزه‌ای SEAOC این مقررات را بازنگری کرد و در سال ۱۹۹۰ این اصلاحات را تحت عنوان پیوست ۱L در کتاب آبی SEAOC (۱۶) چاپ کرد. پس از آن، کنفرانس بین‌المللی ساختمان‌های رسمی^۳ (ICBO) تغییرات اندکی بر پیوست ۱L اعمال کرد و آن را در سال ۱۹۹۱ به عنوان پیوست غیراجباری در فصل ۲۳ از آیین نامه UBC قرار داد. ICBO و کمیته لرزه‌ای SEAOC به طور متناوب دستورالعمل را بازنگری و اصلاح می‌کردند تا UBC و کتاب آبی SEAOC در هر چند دوره از گسترش آیین نامه به روز رسانی شود [۱۱ و ۱۷]. در سال ۱۹۹۱،^۴ FEMA راهنمایی برای طراحی ساختمان‌های جدید و بهسازی ساختمان‌های موجود با استفاده از سیستم جداساز در ۲۷۳/۲۷۴ FEMA [۶]، ۳۵۶ FEMA [۷] و ۴۰۰ FEMA [۸] تهیه کرد.

جدیدترین نسخه دستورالعمل طراحی ساختمان‌های جداسازی شده لرزه‌ای، استاندارد ASCE ۷-۰۵^۵ می‌باشد. در فصل ۱۴، ASCE ۷-۰۵ ضوابط طراحی برای ساختمان‌های جداسازی شده لرزه‌ای ارائه شده است. بعلاوه این مقررات به طور کامل منطبق بر ضوابط لرزه‌ای (۲۰۰۶) IBC^۶ است. انتظار می‌رود که آیین نامه‌های محلی و دولتی بیشتری به فصل ۱۷، ASCE ۷-۰۵ برای طراحی ساختمان‌های جداسازی شده لرزه‌ای ارجاع داده شود. بنابراین هدف اصلی این بخش ارائه ضوابط طراحی ASCE ۷-۰۵ برای طراحی ساختمان‌های جداساز شده لرزه‌ای است. ابتدا مفهوم حرکات لرزه‌ای زمین معرفی می‌گردد. سپس روند تحلیلی برای طراحی سازه استاتیکی و یا دینامیکی بحث می‌شود. این بخش با جمع‌بندی ضوابط ویژه ASCE ۷-۰۵ بر هر روش طراحی خاتمه می‌یابد.

1 - Code Requirements for design of seismically Isolated Structures

2 - Northern Section of the Structural Engineers Association of California

3 - International Conference of Building Officials

4 - Federal Emergency Management Agency

5 - International Building Code

۹-۳-۲- حرکت لرزه‌ای زمین

دو سطح از نیروی زلزله برای طراحی سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای توسط ۷-۰۵ ASCE نیاز است. حداکثر زلزله مفروض (MCE) و زلزله طراحی: MCE به عنوان شدیدترین زلزله، معمولاً با احتمال وقوع ۲٪ در ۵۰ سال تعریف می‌شود که به عبارت دیگر دوره بازگشت MCE تقریباً ۲۵۰۰ سال است. سیستم جداساز تحت زلزله MCE باید در شرایط پایدار بماند. زلزله طراحی که اثر برابر با $\frac{2}{3}$ تاثیر زلزله MCE است برای تضمین ایمنی جانی در نظر گرفته می‌شود؛ خسارت سازه‌ای و غیرسازه‌ای باید حداقل شود یا از بین رود و عملکرد تجهیزات حفظ گردد.

طیف پاسخ شتاب معمولاً با انجام تحلیل خطر حرکت زمین تعیین می‌گردد. اگرچه ۷-۰۵ ASCE یک روش مناسب جهت استخراج طیف پاسخ MCE بر مبنای دو پارامتر شتاب ارائه نموده است.

پارامتر شتاب طیف پاسخ MCE در زمان تناوب کوتاه S_5 پارامتر شتاب طیف پاسخ در زمان تناوب S_1 ، که در ۷-۰۵ ASCE ارائه شده است از شکل ۱-۲۲ تا ۱-۲۵، ۱۴-۲۲ تا ۱-۲۲ نقشه حرکت زمین برای MCE ارائه شده است. توجه شود که کاربرد پارامترهای نقشه جهت تهیی طیف پاسخ MCE محدود به پروفیل خاک و لرزه خیری منطقه که در انتهای این بخش بحث می‌شود، است.

گسترش نقشه‌های حرکت زمین MCE بر پایه طراحی لرزه‌ای ایالات متحده، که توسط USGS به سه ناحیه زیر تقسیم شده است، می‌باشد:

۱- ناحیه با لرزه خیزی ناچیز ناپایداری سازه و یا خسارت؛ که موج حجمی ۵ کمتر از ۵/۵ باشد و شدت حرکات ثبت شده زمین، پنج درجه مرکالی اصلاح شده و یا کمتر باشد. از این رو، نقشه‌های حرکت زمین ۱٪ MCE شتاب در جرم را به عنوان حداقل نیروی جانبی طراحی سازه تعریف می‌کند.

۲- نواحی یا لرزه خیزی کم تا متوسط، برای ویژگی‌های نامعلوم زیاد منابع زلزله و MCE با دوره بازگشت طولانی، پارامترهای شتاب نشان داده شده در نقشه‌های حرکت زمین

ASCE ۷-۰۵ از نقشه‌های احتمال خطر لرزه‌ای USGS با احتمال وقوع ۲٪ در ۵۰ سال تعیین می‌شوند.

۳- نواحی با لرزه خیزی زیاد که نزدیک به گسل با دوره بازگشت نظیر نقشه‌های خطر قطعی Soastal California برای تعیین پارامترهای شتاب نقشه‌های حرکت زمین MCE ۷-۰۵ استنتاج نقشه‌های خطر USGS مطابق با ۵۰٪ افزایش در حدس میانه در تابع تضعیف حرکت زمین^۱ است.

توجه شود که نقشه‌های حرکت زمین ASCE ۷-۰۵ بر مبنای شتاب طیف پاسخ با میرایی ۵٪ برای خاک تیپ B تهیه شده‌اند. طبقه بندی تیپ بندی‌های مختلف خاک که از نوع A تا F می‌باشد اساساً بر مبنای میانگین سرعت موج برشی \bar{v}_S ، تعداد ضربه استاندارد \bar{N} ، مقاومت برشی زهکش شده \bar{S}_{D} صورت گرفته است. جزئیات طبقه بندی خاک در فصل ۲۰ از ASCE ۷-۰۵ وجود دارد [۲].

پس از انتخاب شتاب طیف پاسخ، S_S و S_1 از نقشه‌های حرکت زمین MCE، طیف شتاب پاسخ MCE در زمان کوتاه S_{MS} و شتاب طیف پاسخ در ۱s، S_{M1} می‌تواند با در نظر گرفتن نوع خاک محاسبه شود:

$$S_{MS} = F_a S_S \quad (40-9)$$

$$S_{M1} = F_V S_1 \quad (41-9)$$

که در آن F_a و F_V ، ضرایب سایت می‌باشند که در جدول ۱-۹ و ۲-۹ ارائه شده‌اند. پس از تعیین S_{MS} و S_{M1} پارامترهای شتاب طیف طراحی در زمان تناوب کوتاه S_{DS} و پارامتر شتاب طیف طراحی در ثانیه یکم، S_{DI} به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (42-9)$$

$$S_{DI} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (42-9-\text{الف})$$

جدول ۱-۹ ضرایب سایت، F_a

نوع خاک	پارامترهای شتاب طیف پاسخ نقشه MCE در زمان تناوب کوتاه				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸
B	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
C	۱/۲	۱/۲	۱/۱	۱/۰	۱/۰
D	۱/۶	۱/۴	۱/۲	۱/۱	۱/۰
E	۲/۵	۱/۷	۱/۳	۰/۹	۰/۹

جدول ۲-۹ ضرایب سایت، F_v

نوع خاک	پارامترهای شتاب طیف پاسخ نقشه MCE در زمان تناوب ۱ ثانیه				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸
B	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
C	۱/۷	۱/۶	۱/۵	۱/۴	۱/۳
D	۲/۴	۲/۰	۱/۸	۱/۶	۱/۵
E	۳/۵	۳/۲	۲/۸	۲/۴	۲/۴

چنانچه زمان تناوب سیستم سازه‌ای (T)، کمتر از $T_0 = 0.2S_{DI}/S_{DS}$ شود، شتاب طیف پاسخ طراحی S_a دارای رابطه خطی بر حسب T خواهد شد و به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$S_a = S_{DS} \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (43-9)$$

زمانی که زمان تناوب سیستم سازه‌ای در ناحیه $T_0 < T < T_S = S_{DI}/S_{DS}$ باشد، مقدار ثابت می‌ماند و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$S_a = S_{DS} \quad (44-9)$$

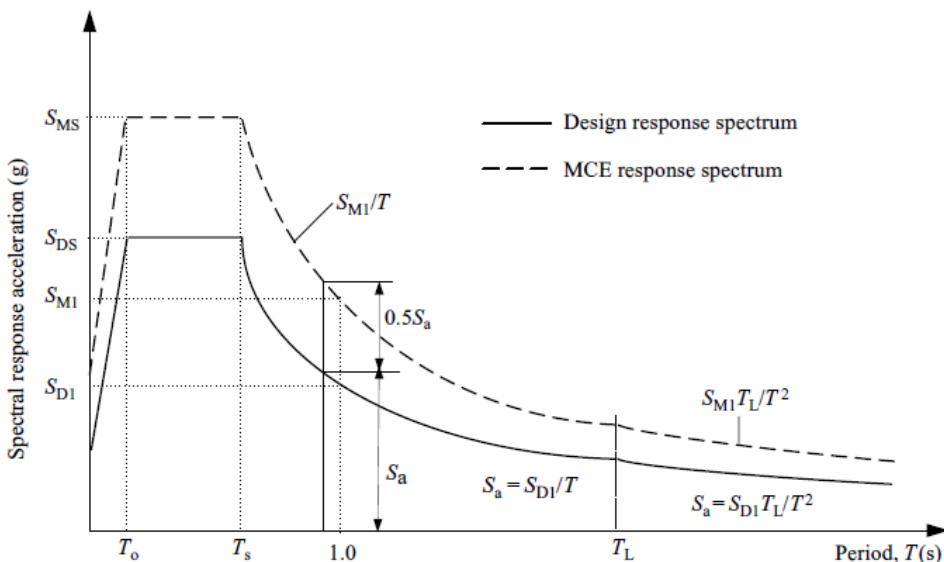
برای $T_L < T_s < T$ ، که زمان تناوب طولانی برای زمان انتقال است که در شکل‌های ۱۵-۲۲ تا ۲۰-۵ ASCE ارائه شد، S_a با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (45-9)$$

اگر $T < T_L$ باشد S_a دارای رابطه زیر با T خواهد بود:

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (46-9)$$

طیف پاسخ MCE با افزایش ساده طیف پاسخ طراحی با ضریب $1/5$ تعیین می‌شود. در شکل ۷-۹ طیف پاسخ طراحی و طیف پاسخ MCE ارائه شده است.



شکل ۷-۹ طیف پاسخ طرح و MCE

چنانچه سازه جدادسازی شده در سایت F و یا در سایتی با $S_1 > 0.6$ واقع شده باشد، پارامترهای شتاب طیف پاسخ بدست امده از نقشه‌های حرکت زمین MCE برای تعیین طیف پاسخ طراحی و طیف پاسخ MCE قابل کاربرد نمی‌باشند. بنابراین حرکات ویژه زمین در سایت، که در فصل ۲۱ از ASCE ۷-۰۵ اشاره شده، می‌بایست برای تهیه طیف پاسخ طراحی و طیف پاسخ MCE مورد بررسی قرار گیرد.

۹-۳-۳- انتخاب روش تحلیل^۱

سه روش طراحی برای سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای در ASCE ۷-۰۵ شامل تحلیل بار معادل جانبی، تحلیل طیف پاسخ و تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ ارائه شده است. تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ، اولین گزینه برای تحلیل سازه‌ای است؛ چرا که قادر به لحاظ نمودن رفتار غیرخطی هم سیستم مقاوم لرزه‌ای و هم سیستم جداساز می‌باشد و می‌تواند عملکرد واقعی سازه را بدون توجه به شکل پیچیده آن پیش‌بینی نماید.

همچنین با توجه به دسترسی به کامپیوترهای شخصی قدرتمند و گسترش نرم‌افزارهای تجاری، تاثیر شرایط نامطلوب خاک و گسل‌های فعال بسیار نزدیک می‌تواند به سادگی در روند طراحی مدلسازی شود.

اگر چه روش بار معادل جانبی مزایای خاص خود را دارد، برای مثال استفاده از تحلیل استاتیکی به طور قابل ملاحظه‌ای روند طراحی برخی از سازه‌های خاص را ساده می‌کند. بعلاوه روش بار معادل جانبی می‌تواند برای کمی سازی برخی از پارامترهای بسیار سخت طراحی نظیر، جابجایی و نیرو به عنوان حد پایین تحلیل طیف پاسخ و یا تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ مورد استفاده قرار گیرد. ASCE ۷-۰۵ در شرایط زیر استفاده از روش بار معادل جانبی را مجاز می‌داند:

۱) پارامتر شتاب طیف پاسخ MCE در زمان تناوب ۱ ثانیه (S_1)، باید کمتر از $0.7g$ در سایت محل ساخت سازه باشد.

۲) موقعیت سازه محدود به سایت‌های A، B، C و یا D باشد.

۳) ارتفاع سازه روی سطح جداساز کمتر از ۴ طبقه و یا ارتفاع حداکثر کمتر از 0.6ft (۱۹/۸ متر) باشد.

۴) زمان تناوب موثر سازه جداسازی شده در جابجایی حداکثر T_M ، کمتر از $\frac{1}{3}$ ثانیه باشد.

۵) رابطه زیر میان زمان تناوب موثر سازه جداسازی شده در جابجایی طراحی T_D و زمان تناوب سازه با تکیه‌گاه گیردار^۲ روی سطح جداسازی که ممکن است با استفاده از روش‌های تقریبی محاسبه گردد T_d می‌بایست رابطه صفحه بعد را اقنانع نماید:

$$T_D > 33C_t h_n^X \quad (47-9)$$

که در آن h_n ارتفاع سازه روی سیستم جداساز بر حسب فوت است. ضرایب C_t و X در جدول ۳-۹ بر مبنای سیستم‌های مقاوم نیروی لرزه‌ای سازه مختلف ارائه شده است.

رابطه ساده زیر برای محاسبه زمان تناوب سازه با تکیه‌گاه گیردار روی سطح جداساز هم برای قاب خمی بتنی و هم فولادی، به طور جایگزین قابل استفاده می‌باشد. در این رابطه n تعداد طبقات ساختمان کمتر یا مساوی ۱۲ طبقه با ارتفاع بیشتر از ۱۰ فوت (۳ متر) است.

$$T_a = 0.1 n \quad (48-9)$$

۶) سازه روی سیستم جداساز نباید دارای نامنظمی سازه‌ای در پلان و نیز ارتفاع باشد.

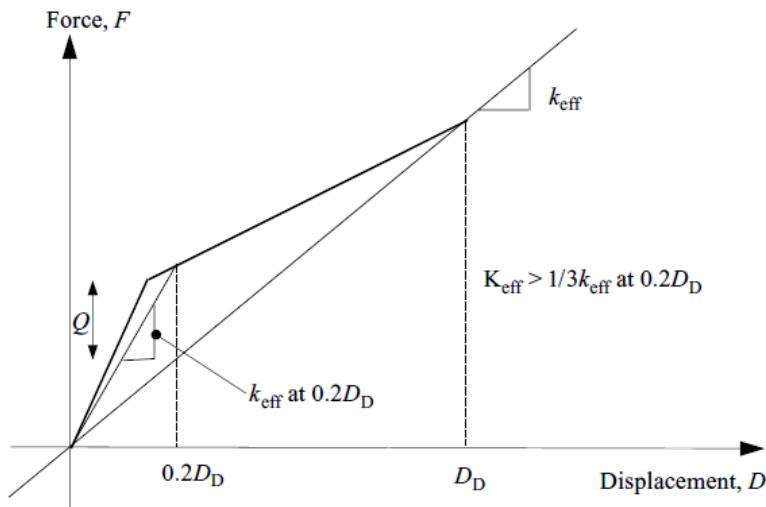
۷) سختی موثر سیستم جداساز در جابجایی طراحی می‌باشد بزرگتر از $\frac{1}{3}$ از سختی موثر در ۲۰٪ جابجایی طراحی باشد. این رابطه در شکل ۸-۹ نشان داده شده است.

۸) سیستم جداساز قادر به تولید نیروی بازگرداننده باشد. بر مبنای ASCE ۷-۰۵ نیروی جانبی در جابجایی طراحی کلی می‌باشد حداقل $0.025w$ بزرگتر از نیروی جانبی در ۵۰٪ از جابجایی کلی طراحی باشد.

۹) سیستم جداساز جابجایی MCE را به کمتر از جابجایی حداکثر کلی محدود نکند. چنانچه موارد ۲ و ۷ و ۸ و ۹ که در خصوص روش بار جانبی معادل بیان شده، برقرار باشد، استفاده از روش طیف پاسخ می‌تواند مجاز باشد.

جدول ۳-۹ پارامترهای C_t و X

X	C_t	نوع سازه
۰,۸	۰,۰۲۸	قابهای خمی فولادی
۰,۹	۰,۰۱۶	قابهای خمی بتن آرمه
۰,۷۵	۰,۰۳	قابهای فولادی با مهاربندهای هم محور
۰,۷۵	۰,۰۲	سایر سیستم‌های سازه‌ای

شکل ۸-۹ k_{eff} در روش بار معادل جانبی

۱-۴-۳-۹ - روش بار جانبی معادل^۱

۱-۴-۳-۹ - جابجایی طراحی و سختی موثر متناظر

روش بار معادل جانبی بر مبنای یک رابطه ساده میان جابجایی طیفی S_D و شبه شتاب S_A که در رابطه ۸-۹ ارائه شد، گسترش داده می‌شود. با فرض زلزله طراحی، S_D و S_A می‌توانند به ترتیب به عنوان جابجایی طراحی D_D بر حسب اینچ و شباه طیف پاسخ طرح S_a دوباره نشان داده شوند. بعلاوه معرفی یک ضریب عددی برای میرایی موثر B_D به منظور کاهش S_a به بازنویسی مجدد رابطه (۸-۹) به صورت زیر می‌انجامد:

$$D_D = \frac{S_a}{\omega_b^2 B_D} \quad (49-9)$$

که در آن $\omega_b = 2\pi / T_D$ فرکانس زاویه‌ای است، T_D زمان تناوب موثر سازه جداسازی شده لرزه‌ای بر حسب ثانیه در جابجایی طراحی است، برای اکثر سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای بین ۲ تا ۴ ثانیه است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{D\min g}}}$$

که در آن $K_{D\min}$ حداقل سختی موثر سیستم جdasاز در جابجایی طراحی در جهت افقی بر حسب kips/in است. W وزن موثر لرزه‌ای سازه روی سطح جdasاز است. واحد W , kips/in است.

از این دو، با جایگذاری شب طیف پاسخ طراحی در T_D که در رابطه (۴۵-۹) ارائه شده است در رابطه (۴۹-۹)، جابجایی طراحی D_D از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$D_D = \frac{S_a}{\omega_b^2 B_D} = \frac{1}{B_D} \left(\frac{T_D}{2\pi} \right)^2 \frac{S_{D1}}{T_D} g = \frac{g S_{D1} T_D}{4\pi^2 B_D} \quad (50-9)$$

که در آن g شتاب ثقل، بر حسب in/s^2 است.

ضریب عددی برای میرایی موثر B_D ، وابسته به میرایی موثر سیستم جdasاز در جابجایی طراحی β_D است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta_D = \frac{\sum E_D}{2\pi K_{D\min} D_D^2} \quad (51-9)$$

که در آن $K_{D\min}$ حداکثر سختی موثر (بر حسب kips/in) سیستم جdasاز در جابجایی طراحی در راستای افقی است؛ $\sum E_D$ کل انرژی مستهلك شده در هر سیکل از پاسخ جابجایی طرح را نشان می‌دهد، که برابر با مجموع انرژی مستهلك شده در یک چرخه کامل در تمامی واحدهای جdasاز در جابجایی طرح D_D است. پس از تعیین β_D ، ضریب عددی برای نسبت میرایی B_D ، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۴] که دارای محدودیت ۵۰٪ میرایی بحرانی است:

$$B_D = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln \beta_D} \quad (52-9)$$

رابطه (۵۲-۹) بر مبنای میرایی بحرانی ۵٪ استخراج شده است. از این رو، β_D برابر با ۵٪ میرایی بحرانی منجر به ضریب عددی B_D واحد می‌شود ASCE ۷-۰۵ با تغییر اندک رابطه (۵۲-۹)، جدول (۴-۹) را ارائه نمود.

در جدول (۴-۹)، B_M و β_M به ترتیب نشان دهنده میرایی موثر و ضریب عددی در MCE است که در بخش بعدی بحث خواهد شد. درون یابی خطی از β_D به β_M برای محاسبه B_D به مجاز است.

جدول ۴-۹ ضریب میرایی، B_M یا B_D

$\geq ۵۰\%$	۴۰%	۳۰%	۲۰%	۱۰%	۵%	$\leq ۲\%$	β_M یا β_D
۲,۰	۱,۹	۱,۷	۱,۵	۱,۲	۱,۰	۰,۸	B_M یا B_D

۴-۳-۹- حداکثر جابجایی سختی موثر متناظر

چنانچه سازه جداسازی شده لرزه‌ای به مانند طرح سیستم جداساز، نیاز به لحاظ نمودن MCE داشته باشد، زمان تناوب موثر در جابجایی حداکثر T_M ، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{M\min} g}} \quad (53-9)$$

که در آن $K_{M\min}$ سختی موثر حداقل (برحسب kips/in) سیستم جداساز در جابجایی حداکثر در راستای افقی است.

با استفاده از روش مشابه که در بخش ۱-۴-۳-۹ ارائه شد، حداکثر جابجایی D_M (in) می‌تواند به صورت زیر نشان داده شود:

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M} \quad (54-9)$$

که در آن S_{M1} از رابطه (۴۱-۹) محاسبه می‌شود و ضریب عددی میرایی موثر B_M ، از جدول (۴-۹) تعیین می‌شود. میرایی موثر سیستم جداساز در جابجایی حداکثر β_M ، که برای محاسبه B_M استفاده شده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta_M = \frac{\sum E_M}{2\pi K_{M\min} D_M^2} \quad (55-9)$$

که در آن $\sum E_M$ کل انرژی مستهلك شده در هر چرخه از پاسخ جابجایی حداکثر، که برابر با مجموع انرژی مستهلك شده در یک چرخه کامل برای تمامی واحدهای جداساز در جابجایی حداکثر D_M است.

۳-۴-۳- جابجایی طرح کلی و جابجایی حداکثر کلی^۱

جابجایی طرح بدست آمده از رابطه (۵۰-۹) حداکثر جابجایی سیستم جdasاز را نشان نمی‌دهد، چرا که تنها جابجایی در مرکز صلبیت سیستم جdasاز را محاسبه می‌کند. در واقع به علت خروج از مرکزیت e (برحسب in) یک جابجایی مضاعف وجود دارد که در شکل (۹-۹) نشان داده شده است. از این رو حداکثر جابجایی سیستم جdasاز که معمولاً جابجایی طرح کلی^۲ نامیده می‌شود از این دو بخش جابجایی تشکیل شده است. خروج از مرکزیت e که منجر به جابجایی مضاعف می‌گردد، شامل خروج از مرکزیت واقعی است که فاصله بین مرکز جرم سازه روی سطح جdasاز از مرکز سختی سیستم جdasاز می‌باشد، خروج از مرکزیت تصادفی برابر با ۵٪ بزرگترین بعد سازه در پلان، عمود بر راستای نیرو در نظر گرفته شده می‌باشد. جابجایی مضاعف با فرض پلان مستطیلی سیستم جdasاز با ضلع بزرگتر d و ضلع کوچکتر b تعیین می‌شود. بیشتر فرض می‌شود که سیستم جdasاز در پلان مستطیلی خود به صورت یکنواخت توزیع شده است. بنابراین، سختی پیچشی سیستم جdasاز، $K_{torsion}$ می‌تواند برحسب سختی حداکثر موثر K_{Dmax} به صورت زیر ارائه شود:

$$K_{torsion} = \frac{b^2 + d^2}{12} K_{Dmax} \quad (56-9)$$

در جابجایی طرح، نیروی لرزه‌ای در مرکز سختی سیستم جdasاز برابر است با $K_{eff} D_D$. چرخش سیستم جdasاز^۳ به صورت زیر می‌باشد:

$$\gamma = \frac{K_{Dmax} D_D e}{(b^2 + d^2 / 12) K_{Dmax} D_D} = \frac{12 D_D e}{b^2 + d^2} \quad (57-9)$$

جابجایی مضاعف D_a ، در فاصله y که فاصله بین مرکز صلبیت سیستم جdasازی شده و المان سازه‌ای تعیین شده در راستای عمود بر جهت نیرو است، به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$D_a = \frac{12 D_D e}{b^2 + d^2} y \quad (57-9-\text{الف})$$

1 - Total design Displacement and Total Maximum Displacement

2 - Total Design Displacement

3 - Torsional Stiffness of the Isolation System

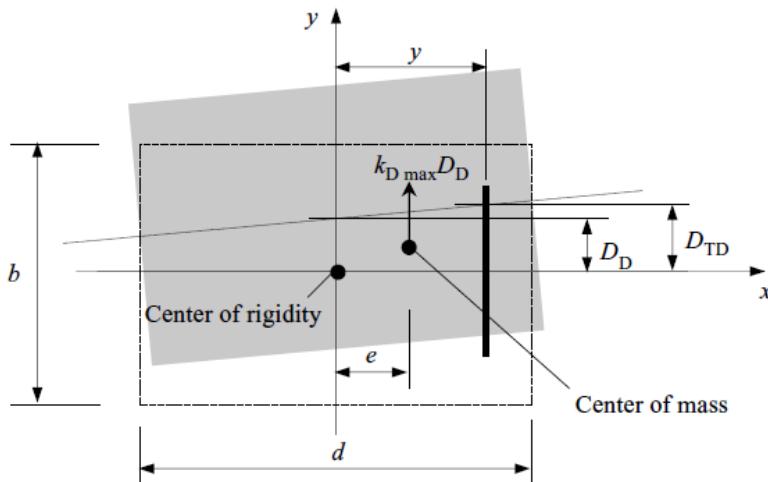
4 - Rotation of the Isolation System

با اضافه نمودن D_D به رابطه (۵۷-۹-الف)، جابجایی طرح کلی D_{TD} (برحسب in) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D_{TD} = D_D + D_a = D_D \left(1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \quad (58-9)$$

به طریق مشابه، جابجایی جداکثر کلی D_{TM} از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D_{TM} = D_M \left(1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \quad (58-9\text{-الف})$$



شکل ۹-۹ تعیین جابجایی طرح کلی، D_{TD}

۹-۳-۴-۴- حداقل نیروی جانبی^۱

حداقل نیروی جانبی V_b برحسب kips برای طراحی سیستم جاساز، سازه زیر سیستم جاساز و فونداسیون تعیین نموده، برابر است با:

$$V_b = K_{D_{max}} D_D \quad (59-9)$$

حداقل نیروی برشی V_S ، برای طراحی المان‌های سازه‌ای روی سطح جاساز می‌بایست بر مبنای رابطه زیر مورد ارزیابی قرار گیرد:

$$V_S = \frac{K_{D_{max}} D_D}{R_1} \quad (60-9)$$

که در آن R_1 ضریب عددی است که به نوع سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای سازه روی سیستم جداساز مربوط می‌شود. بر مبنای ASCE ۷-۰۵ $1.0 \leq R_1 = 3R / 8 \leq 2.0$ می‌باشد که R ضریب اصلاح پاسخ است که در جدول (۲۱-۱۲) ASCE ۷-۰۵ ارائه شده است. برخی از مقادیر R و R_1 بر سیستم‌های مقاوم نیروی لرزه‌ای متعارف در جدول (۵-۹) ارائه شده است.

جدول ۵-۹ مقادیر پیشنهادی C_d , R_1 و R

C_d	R_1	R	Ω_0	سیستم مقاوم لرزه‌ای
۱/۸۷۵	۵	۲/۵	دیوارهای بذرشی بتن آرمه ویژه	
۱/۸۷۵	۵	۲/۵	دیوارهای برشی بنایی تقویت شده ویژه	سیستم‌های دیوار باربر
۲	۶	۲	قاب‌های مهار بندی شده هم محور ویژه	سیستم‌های قاب
۲	۶	۲/۵	دیوارهای برشی بتن آرمه ویژه	ساختمانی
۲	۸	۳	قاب‌های خمسمی فولادی ویژه	
۲	۸	۳	قاب‌های خمسمی بتن آرمه ویژه	سیستم‌های قاب خمسمی

بر مبنای ASCE ۷-۰۵ حداقل نیروی برشی V_S محاسبه شده از رابطه (۶۰-۹) نباید از نیروی زلزله تعیین شده توسط سه شرط زیر کوچکتر باشد. در غیر این صورت بزرگترین مقدار نیروی زلزله، طراحی المان‌های سازه‌ای روی سیستم جداساز را کنترل می‌کند.

یک سازه با تکیه‌گاه گیردار با زمان تناوب موثر یکسان T_D ، برای ارزیابی حداقل نیروی جانبی بر مبنای بخش ۸-۱۲ ASCE ۷-۰۵ معرفی شده است [۲]. حداقل نیروی جانبی که با V نشان داده می‌شود به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$V = C_S W \quad (61-9)$$

که در آن C_S ضریب پاسخ لرزه‌ای است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C_S = \frac{S_{DS}}{(R / I)} \quad (62-9)$$

که در آن I، ضریب اهمیت سازه است که در جدول (۶-۹) ارائه شده است.

مقدار حداقل C_S به روابط زیر محدود است:

$$C_S \leq \frac{S_{DI}}{T_D(R/I)} \quad \text{for } T_D \leq T_L \quad (63-9)$$

$$C_S \leq \frac{S_{DI}}{T_D^2(R/I)} \quad \text{for } T_D \geq T_L \quad (63-9\text{-الف})$$

از سوی دیگر C_S تعیین شده از رابطه (۶۲-۹) نباید از مقدار زیر کمتر باشد:

$$C_S \geq 0.01 \quad (64-9)$$

چنانچه سازه جداسازی شده لرزه‌ای در منطقه‌ای از نقشه MCE با شتاب پاسخ طیف در زمان تناوب ۱ ثانیه، I₁ بزرگتر مساوی ۰.۶g ساخته شود، رابطه زیر برای محاسبه حد پایین C_S به کار خواهد رفت:

$$C_S \geq \frac{0.5S_1}{(R/I)} \quad (65-9)$$

تأثیر نیروی باد می‌باشد برای حداقل نیروی جانبی در نظر گرفته شود. در حالت کلی بار باد نیروی جانبی کمتری از V_S ایجاد می‌کند و روند طراحی سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای را کنترل نخواهد کرد. علاوه بر علت اهمیت موضوع تعیین نیروی باد در بخش ASCE ۷-۰۵ ارائه شده، به علت محدودیت فضا، محاسبات اثر باد در این بخش ارائه نشده است و جزئیات بیشتر در این خصوص در فصل ۶ ASCE ۷-۰۵ وجود دارد [۲].

نیروی جانبی که سیستم جداساز و یا سیستم مقاوم باد را به طور کامل فعال می‌سازد می‌باشد به منظور ارزیابی حداقل نیروی جانبی V_S تعیین گردد. برای بالشتک‌های نوع لغزندۀ، نظیر سیستم پاندول اصطکاکی، حداقل نیروی جانبی (V_i) برای فعال نمودن سیستم جداساز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_i = 1.5 \mu_b W \quad (66-9)$$

که در آن μ_b ضریب نفوذ اصطکاکی^۱ سیستم پاندول اصطکاکی است.

برای بالشتک‌های نوع الاستومریک، حداقل نیروی جانبی V_i که به علت تسلیم سیستم جداساز ایجاد می‌گردد، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_i = 1.5 k_e D_y \quad (67-9)$$

که در آن k_e سختی الاستیک سیستم جداساز و D_y جابجایی تسلیم سیستم جداساز است.

۳-۴-۵- توزیع قائم بار جانبی و محدودیت تغییر مکان نسبی طبقه^۱

توزیع نیروی قائم نیروی حداقل جانبی V_S در ارتفاع سازه روی سطح جداساز در $ASCE\ 7-05$ به صورت زیر نشان داده شده است:

$$F_i = \frac{V_i W_i h_i}{\sum_{j=1}^n W_j h_j} \quad (68-9)$$

که در آن W_i و W_j بخشی از وزن موثر لرزه‌ای W در طبقه i و j و h_i و h_j در طبقه i یا j ارتفاع از تراز پایه سازه جداسازی شده لرزه‌ای را نشان می‌دهد.

جابجایی نسبی طبقه i در هر طبقه i که از تحلیل سازه بدست می‌آید باید رابطه زیر را اقنان نماید:

$$\frac{C_d \delta_i}{I} \leq 0.015 h_{Si} \quad (69-9)$$

که در آن I ضریب اهمیت، C_d ضریب تشدید تغییر شکل است که در جدول (۵-۹) ارائه شده است. ارتفاع هر طبقه در تراز i با h_{Si} نشان داده شده است.

۳-۹-۵- روش تحلیل دینامیکی^۱

۳-۹-۵-۱- ضوابط کلی تحلیل دینامیکی^۲

در ASCE ۷-۰۵ دو روش تحلیل دینامیکی برای طراحی سازه جداسازی شده لرزه‌ای ارائه شده است: تحلیل طیف پاسخ و تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ. برای دستیابی به اطلاعات طراحی لازم و کافی، در هر دو روش نیاز به یک مدل سازه‌ای، شامل سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای در بالای سطح جداساز و سیستم جداساز می‌باشد.

یک مدل سازه خوب قادر به انعکاس عملکرد واقعی سیستم می‌باشد و می‌تواند نتایج لازم برای طراحی را مهیا سازد. بنابراین، معیارهای زیر برای ارتقاء مدلسازی سازه‌ای می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد:

(۱) سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای می‌بایست مدل شود. برای سازه‌های بتُنی و مصالح بنایی، سطح مقطع موثر ترک خورده اعضا برای محاسبه سختی سیستم مقاوم لرزه‌ای می‌بایست مورد استفاده قرار گیرد. برای سیستم قاب خمشی فولادی، تغییر مکان طبقه می‌بایست با لحاظ نمودن تغییر شکل پانل منطقه^۳ محاسبه گردد. چنانچه فرض دیاگرام صلب معتبر نباشد، مشارکت دیاگرام در پاسخ دینامیکی می‌بایست در مدلسازی سازه‌ای لحاظ گردد. بعلاوه اثرات P-Δ نیز می‌بایست منظور شود. مدلسازی P-Δ، پانل منطقه‌ها و دیافراگم‌های صلب در صفحات ۲۵۲ و ۴۶۳ و ۶۱۵ از مرجع^۳ یافت می‌شود.

(۲) برای مدلسازی سیستم جداساز، واحدهای جداساز بر مبنای موقعیت‌های واقعی آنها در پلان می‌بایست به مدل اختصاص داده شوند. سیستم جداساز مدل شده قادر به گزارش نیروی بلند شدن و جابجایی قائم هر جداساز همانند اطلاعات ارائه شده در خصوص جابجایی انتقالی و حرکت چرخشی سازه روی سطح جداساز و خود سیستم جداساز می‌باشد، برای تحلیل دینامیکی غیرخطی، رفتار غیرخطی سیستم جداساز می‌بایست در مدلسازی سازه‌ای لحاظ شود. ASCE ۷-۰۵ استفاده از مدل الاستیک خطی برای تحلیل دینامیکی را مجاز می‌داند، اگر حداقل سختی موثر سیستم جداساز که برای جایگزینی خصوصیات غیرخطی سیستم جداساز

1- Dynamic Analysis Procedure

2 - General requirements for dynamic analysis

3 - Panel Zone Deformation

و سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای روی سیستم جداساز، استفاده شده تحت زلزله طرح، رفتار الاستیک خود را حفظ کند.

۱-۳-۵-۲- حد پایین تغییر مکان‌های جانبی و نیروی جانبی^۱

جابجایی طرح کلی D_{TD} و حداکثر جابجایی کلی D_{TM} برای محدود نمودن جابجایی‌های متناظر بدست امده ا تحلیل دینامیکی در ASCE ۷-۰۵ ارائه شده است.

$$D_{TD} = \frac{D_D}{\sqrt{1 + (T/T_D)^2}} \left[1 + y \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] \quad (70-9)$$

$$D_{TM} = \frac{D_M}{\sqrt{1 + (T/T_M)^2}} \left[1 + y \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] \quad (71-9)$$

که در آن T زمان تناوب سازه با تکیه گاه گیردار روی سیستم جداساز است. سایر پارامترها در روابط (۵۸-۲) و (۵۸-الف) معروفی شده‌اند. حداکثر جابجایی از تحلیل دینامیکی باید کمتر از ۹۰٪ D_{TD} باشد که از رابطه (۷۰-۹) تعیین می‌شود و حداکثر جابجایی کلی از تحلیل دینامیکی باید کمتر از ۸۰٪ D_{TM} محاسبه شده از رابطه (۷۱-۹) باشد.

برای طراحی سیستم جداساز، المان‌های سازه‌ای زیر سیستم جداساز و فونداسیون، نیروهای تعیین شده از تحلیل دینامیکی باید کاهش داده شود و نیز باید کمتر از ۹۰٪ V_b محاسبه شده از رابطه (۵۹-۹) باشد.

برای طراحی المان‌های سازه‌ای روی سیستم جداساز، نیروهای محاسبه شده از تحلیل دینامیکی می‌تواند با استفاده از ضریب R_1 کاهش داده شود. چنانچه روسازه منظم باشد، نیروی کاهش یافته باید کمتر از ۸۰٪ V_S برای تحلیل طیف پاسخ و ۶۰٪ V_S برای تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ باشد که در آن V_S حداقل نیروی برشی است که از روش بار جانبی معادل محاسبه می‌شود و محدودیت‌های آن در بخش ۴-۳-۹ ارائه شده است. برای سازه نامعین، نیروی کاهش یافته می‌بایست برابر با V_S در تحلیل طیف پاسخ باشد. این مقدار باید کمتر از

V_s در تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ باشد. چنانچه نیروهای محاسبه شده از تحلیل دینامیکی کمتر از حد پایین تعیین شده در بالا باشند می‌باشد افزایش یابند و یا مقیاس شوند. تغییر مکان طبقه با استفاده از رابطه (۶۹-۹) کنترل می‌شود. محدودیت تغییر مکان طبقه h_{sx} برای تحلیل طیف پاسخ و h_{sx} برای تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ است. چنانچه نسبت تغییر مکان طبقه از $R_1/0.01$ بیشتر باشد، اثرات $P-\Delta$ از سازه روی سیستم جداساز تحت MCE می‌باشد لحاظ گردد.

۱-۹-۳-۵-۳- تحلیل طیف پاسخ^۱

تحلیل طیف پاسخ اساساً یک روش تحلیلی خطی است. همانطور که در بخش ۱-۲-۹ بحث شد، حداقل تغییر شکل غیرخطی سازه روی سطح جداساز با انتخاب صحیح سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای حاصل می‌شود و طرح آن تعدیل می‌گردد. به عنوان یک نتیجه، تغییر شکل غیرخطی غالباً در سیستم جداساز اتفاق می‌افتد و می‌توان فرض کرد که با تغییر شکل سازه روی سطح جداساز در ناحیه الاستیک رخ می‌دهد. همچنین با معرفی سختی موثر با سختی سکانتی K_{eff} در جابجایی طرح و یا حداکثر، رفتار غیرخطی سیستم جداساز به رابطه خطی میان برش و تغییر مکان جانبی آن تبدیل می‌شود. در شکل ۶-۲ یک مثال برای تعیین سختی موثر K_{eff} از مدل دو خطی یک واحد جداساز نشان داده شده است. بر پایه فرضیات بالا، با استفاده از ویژگی‌های خطی هم برای سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای و هم برای سیستم جداساز استفاده از روش تحلیل طیف پاسخ برای تحلیل لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده ممکن می‌گردد.

با فرض یک سازه همراه با سیستم جداساز تحت زلزله طرح، بخشی از میرایی روسازه و سیستم جداساز، $\{\ddot{x}'\}_{[2\beta\omega]}$ ، که در رابطه (۱۷-۹) ارائه شده، با بکارگیری ۵٪ میرایی شبه شتاب S_{am} ، که به طور قطع ضریب عددی برای میرایی موثر B_{mD} در مود ارتعاشی m کاهش می‌یابد، می‌تواند از بین برود. از این رو، رابطه حرکت متناظر با فرکانس زاویه‌ای m ، به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\ddot{x}'_m + \omega_m^2 = \Gamma_m S_{am}, \quad m=1,2,\dots,n \quad (72-9)$$

1 - Response Spectrum Analysis

2 - secant stiffness

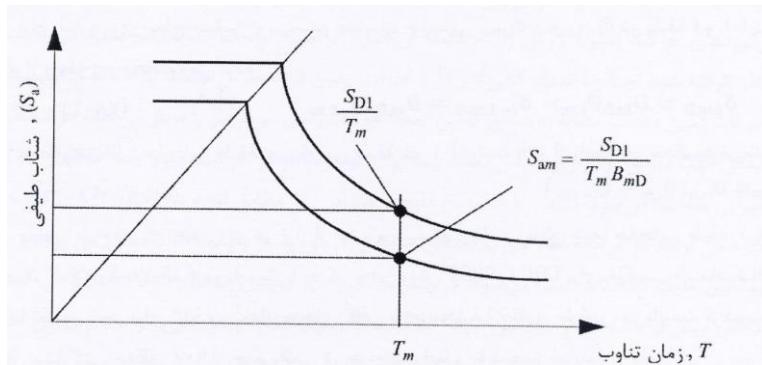
x'_m در رابطه (۷۲-۹) نمایانگر مولفه m بردار پاسخ تعمیم یافته^۱ است و برای تعیین جابجایی سازه‌ای سازه‌ای $x'_m = \{\phi\}_m$ استفاده می‌شود، که در آن $\{\phi\}_m$ شکل مد m سیستم است و $\phi_{n,m}$ مولفه آن در سطح جداساز است که به عنوان واحد طراحی می‌شود، فرکانس زاویه‌ای ω_m در رابطه (۷۲-۹) با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\omega_m^2 = \frac{\{\phi\}_m^T [K] \{\phi\}_m}{\{\phi\}_m^T [M] \{\phi\}_m} \quad (73-9)$$

که در آن $[M]$ و $[K]$ ماتریس‌های جرم و سختی سازه می‌باشد که با سیستم جداساز ترکیب شده‌اند. ضریب مشارکت مد m در رابطه (۷۲-۹) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma_m = \frac{\{\phi\}_m^T [K] \{1\}}{\{\phi\}_m^T [M] \{\phi\}_m} = \frac{\sum_{i=1}^m m_i \phi_{i,m}}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,m}^2} \quad (74-9)$$

استفاده از رابطه (۷۲-۹) در تحلیل سازه جداسازی شده لرزه‌ای اساساً وابسته به آن است که آیا شبه شتاب ورودی S_{am} که توسط ضریب عددی B_{mD} کاهش یافته است، قادر به تسخیر عملکرد سازه است و آیا می‌تواند دقت قابل قبولی از پاسخ‌های سازه‌ای ارائه نماید. به عنوان یک ضابطه از ASCE ۷-۰۵ میرایی سیستم جداساز که معمولاً به مد پایه سازه جداسازی شده لرزه‌ای وابسته می‌باشد، می‌بایست کوچکترین مقدار، میرایی موثر سیستم جداساز و یا ۳۰٪ میرایی بحرانی باشد. میرایی روسازه که معمولاً وابسته به بالاترین مد ارتعاشی سازه است، می‌بایست بر پایه مصالح سیستم مقاوم نیرو لرزه‌ای انتخاب گردد. تعیین شبه شتاب کاهش یافته با ضرایب عددی B_{mD} به طور شماتیک در شکل (۱۰-۹) ارائه شده است.

شکل ۱۰-۹ طیف پاسخ کاهش یافته با استفاده از ضرایب عددی، B_{MD}

برای تعیین جابجایی طرح، جابجایی سیستم در مدارتعاشی $\ddot{x}_m = \{\phi\}_m x'_m$ که در رابطه (۷۲-۹) ارائه شده می‌باشد با استفاده از جذب مجموع مربعات^۱ (SRSS) و یا جمع مربعات کامل^۲ (CQC) و یا روش‌های منطقی دیگر [۳] با یکدیگر ترکیب شوند. توجه شود که سختی موثر یک واحد جاساز K_{eff} از جابجایی طرح فرض شده D_D محاسبه می‌گردد. اگر چه، ممکن است جابجایی طرح گزارش شده از تحلیل طیف پاسخ با مقدار فرض شده برابر نباشد. بنابراین روش سعی و خطا می‌باشد به کار رود و تحلیل طیف پاسخ با تغییر سختی موثر یک واحد جاساز با فرض جابجایی طرح جدید چندین بار تکرار گردد تا جابجایی طیف فرض شده و محاسبه شده با دقت لازم به یکدیگر نزدیک شوند. زمانی که جابجایی در مام $x'_m = \{\phi\}_m$ ، از رابطه (۷۲-۹) حاصل شد، نیروی جانبی طرح که به صورت قائم در هر تراز از سازه در هر مدارتعاشی توزیع می‌گردد می‌تواند با استفاده از رابطه نیوتن محاسبه گردد.

$$\{F\}_m = [M]\{\ddot{x}\}_m = [M]\{\phi\}_m \ddot{x}'_m = [M]\{\phi\}_m \Gamma_m S_{am} \quad (75-9)$$

که در آن $\{F\}_m$ بردار $n \times 1$ است که می‌تواند به صورت $\{F_{1,m}, F_{2,m}, \dots, F_{n,m}\}_m$ نوشته شود. برش پایه طرح در مام برابر است با مجموع نیروهای جانبی در هر تراز که به صورت صفحه بعد ارائه می‌شود:

$$V_m = \sum_{i=1}^n F_{i,m} = \left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,m} \right) \Gamma_m S_{am} = \frac{S_{am}}{g} \bar{W}_m \quad (76-9)$$

که در آن \bar{W}_m وزن موثر لرزه‌ای در مد m است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{W}_m = \left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,m} \right) \Gamma_m g = \frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,m} \right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,m}^2} g \quad (77-9)$$

برای سازه روی سطح جداساز و سیستم جداساز، جابجایی $\delta_{i,mD}$ و $\delta_{i-1,mD}$ در طبقه i و $i-1$ در مد m از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\delta_{i,mD} = D_{mD} \phi_{i,m}; \quad \delta_{i-1,mD} = D_{mD} \phi_{i-1,m} \quad (78-9)$$

به طور متناظر، جابجایی طبقه $\Delta_{i,mD}$ بین طبقه i و $i-1$ در مد m از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

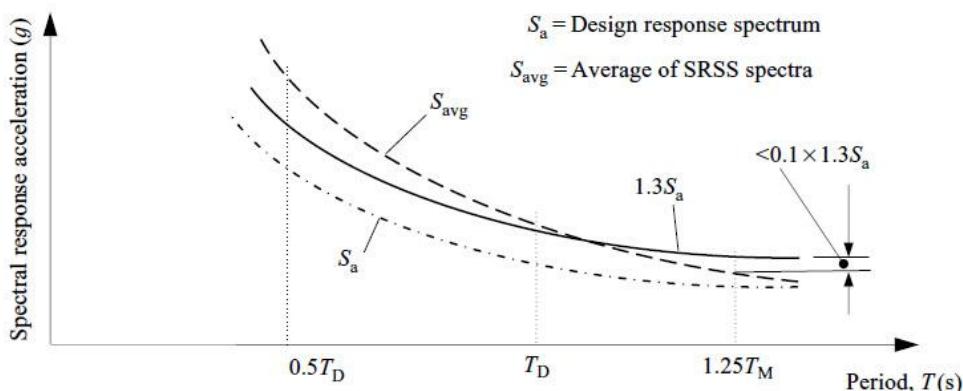
$$\Delta_{i,mD} = D_{mD} (\phi_{i,m} - \phi_{i-1,m}) \quad (78-9\text{-الف})$$

مقادیر طرح نیروی جانبی در هر تراز از سازه و سیستم جداساز، برش پایه، جابجایی طبقه، (روابط ۷۵-۹، ۷۶-۹، ۷۸-۹-الف) می‌باشد با به کار بردن روش SRSS یا CQC برای ترکیب تعداد کافی از مدها تعیین شود. برای انتخاب تعداد مدهای کافی برای محاسبه مقادیر طراحی می‌باشد ترکیب جرم مودال مشارکتی حداقل ۹۰٪ از جرم واقعی در هر جهت اصلی را تسخیر نماید.

روش طیف پاسخ که در بالا تشریح شد برای تحلیل سازه تحت MCE نیز قابل استفاده می‌باشد. در ۷-۰۵ ASCE عنوان شده که برای تعیین جابجایی طرح کلی D_{TD} ، جابجایی حداقل کلی می‌باشد ترکیب ۱۰۰٪ حرکت زمین در راستای بحرانی و ۳۰٪ حرکت زمین عمود بر راستای بحرانی لحاظ گردد. به طور متناظر مقادیر حداقل D_{TD} و D_{TM} می‌باشد با استفاده از جمع بردار جابجایی در هر دو راستای محورهای اصلی سازه محاسبه گردد. بعلاوه برش طرح در هر طبقه محاسبه شده از تحلیل طیف پاسخ نباید کمتر از برش طبقه تعیین شده از روش بار معادل جانبی که در رابطه (۶۸-۹) ارائه شده باشد.

۹-۳-۵-۴- ضوابط ویژه برای تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ

تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ حداقل با لحاظ نمودن سه حرکت مناسب افقی زمین می‌بایست انجام گیرد. هر حرکت افقی زمین دارای دو مولفه می‌باشد که بر یکدیگر عمود هستند. برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ، هر دو مولفه می‌بایست به طور همزمان به مدل سازه‌ای اعمال گردد. در هر افزایش بازه زمانی، جمع برداری جابجایی در هر دو راستای اصلی D_{TM} استفاده برای محاسبه بیشترین مقدار جابجایی کلی D_{TD} و جابجایی حداکثر کلی D_{TM} میانگین از نتایج تحلیل برای طراحی از سوی ASCE ۷-۰۵ مجاز می‌باشد. چنانچه برای تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ، کمتر از هفت رکورد حرکت زمین استفاده شود، مقادیر حداکثر نتایج تحلیل می‌بایست برای طراحی مورد استفاده قرار گیرد. در مرجع [۳]، از صفحات ۳۹۷ تا ۴۱۰ در خصوص ورود چندین زلزله، مثال‌هایی ارائه شده است. به هنگام انتخاب رکوردهای حرکت زمین، بزرگی زلزله، فاصله از گسل، اثر منبع نزدیک و مکانیسم منبع می‌بایست در نظر گرفته شود. چنانچه تعداد کافی از رکورد حرکت زمین در دسترس نباشد، ASCE ۷-۰۵ استفاده از حرکات زمین مناسب مشابه به منظور تامین تعداد حرکات زمین مورد نیاز را مجاز می‌داند. حرکات زمین ممکن است مطابق روش زیر مقیاس شوند. ابتدا برای دو مولفه از هر حرکت زمین، یک SRSS ۱٪ ۵٪ طیف میرایی ساخته می‌شود. سپس طیف پاسخ طرح با میرایی ۵٪ مطابق آنچه در بخش ۹-۳-۲ ارائه شد، تهیه می‌گردد. در مرحله بعد، ضریب مقیاس منحصر بفردی به هر طیف SRSS اعمال می‌گردد و مقدار میانگین طیف SRSS محاسبه می‌شود. در پایان، فاکتورهای مقیاس انتخاب شده باید موجب سقوط یا کاهش بیش از ۱۰٪ مقدار میانگین طیف SRSS به ۱/۳ برابر طیف پاسخ طرح در محدوده زمان تناوب $T_D/5$ تا $1/25 T_M$ شود. در شکل (۹-۱۱) این روش تشریح شده است.



شکل ۱۱-۹ تعیین ضرایب مقیاس برای حرکات زمین

توجه شود که حرکت زمین وارد بر مدل سازه‌ای برای اثر پیچش تصادفی لحاظ نمی‌شود. برای شبیه سازی نمودن پیچش تصادفی در مدل سازه‌ای، جرم سازه روی سیستم جداساز معمولاً به اندازه ۵٪ بعد ساختمان در هر راستای محور اصلی جابجا می‌گردد. جابجایی جرم‌ها در هر راستا از محور اصلی می‌تواند اتفاق بیفتد (مثبت یا منفی) که منجر به تلاش‌های محاسباتی زیاد برای رسیدن به نتیجه می‌گردد که بزرگترین عیب در طراحی سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای است. متاسفانه هیچ روش ساده برای کاهش تلاش‌های محاسباتی وجود ندارد. از نقطه نظر طراحی کاهش زمان تحلیل تاریخچه زمانی می‌تواند مตکی بر قضاوت مهندسی برای تعیین نامنظمی فرم سازه‌ای، بیشترین خروج از مرکزیت جرم و رکوردهای حرکات بحرانی زمین باشد. چرا که این ضرایب مهم مقادیر حداکثر پارامترهای مطلوب نظری جابجایی طبقات، جابجایی جانبی در سیستم جداساز و نیروی بلند شدگی در واحد جداساز را کنترل می‌کنند.

۴-۹ - مثال‌های طراحی

مثال ۴-۹-۱

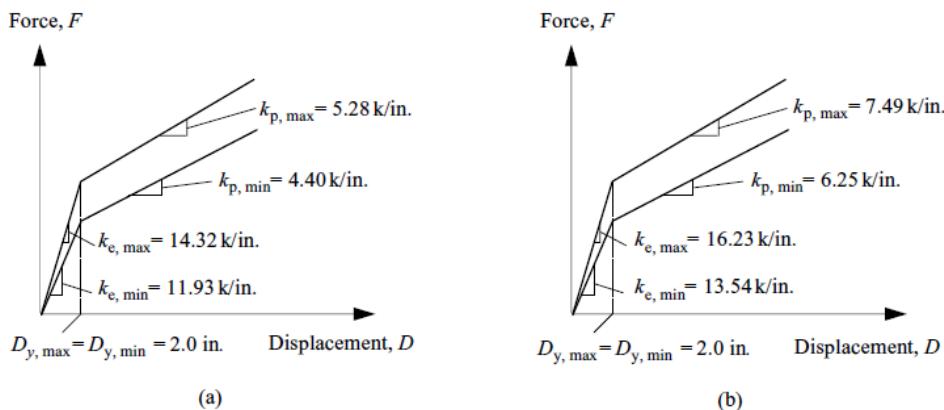
یک ساختمان چهار طبقه بر پایه فضای اشغال IV به ارتفاع کل ۶۴ ft (۱۸/۵۲ m) با ارتفاع یکسان هر طبقه ۱۶ ft (۴/۸۸ m) طراحی شده است. حد بزرگترین و کوچکترین بعد ساختمان در پلان به ترتیب ۲۴۰ ft (۷۳/۲ m) و ۱۵۰ ft (۴۵/۷۵ m) است. وزن موثر لرزه‌ای سازه روی

سیستم جداساز تقریباً برابر با 24000 lips ($60/75 \text{ KN}$) است. سازه روی سیستم جداساز در پلان و ارتفاع منظم می‌باشد. قاب فولادی ویژه با مهاربندهای هم محور به عنوان سیستم مقاوم نیروی زلزله انتخاب شده است. خروج از مرکزیت بین مرکز جرم روی سیستم جداساز و مرکز صلبیت سیستم جداساز در هر دو راستای اصلی 20 ft است. سیستم جداساز شامل دوازده بالشتک 32 in و سی و چهار بالشتک 38 in است. مشخصات بالشتک در جدول ۷-۹ ارائه شده است.

جدول ۷-۹ مشخصات بالشتک‌ها

$38(965)$	$32(813)$	قطر بر حسب in(mm)
$7/44(1/303)$	$5/63(0/986)$	$(\text{kN}/\text{mm})k/\text{in}$ بر حسب $K_{D\min}$
$2/00(51)$	$2/00(51)$	$\text{in}(\text{mm})$ وابسته به $K_{D\min}$ بر حسب $D_{y\min}$
$13/54(2/371)$	$11/93(2/089)$	$(\text{kN}/\text{mm})k/\text{in}$ بر حسب $K_{e\min}$
$6/25(1/094)$	$4/40(0/771)$	$(\text{kN}/\text{mm})k/\text{in}$ بر حسب $K_{P\min}$
$8/19(1/434)$	$6/75(1/182)$	$(\text{kN}/\text{mm})k/\text{in}$ بر حسب $K_{D\max}$
$2/00(51)$	$2/00(51)$	$\text{in}(\text{mm})$ وابسته به $K_{D\max}$ بر حسب $D_{y\max}$
$16/23(2/842)$	$14/32(2/508)$	$(\text{kN}/\text{mm})k/\text{in}$ بر حسب $K_{e\max}$
$7/49(1/312)$	$5/28(0/920)$	$(\text{kN}/\text{mm})k/\text{in}$ بر حسب $K_{P\max}$
$6/94(1/215)$	$5/25(0/919)$	$(\text{kN}/\text{mm})k/\text{in}$ بر حسب $K_{M\min}$
$8/48(1/845)$	$6/42(1/124)$	$(\text{kN}/\text{mm})k/\text{in}$ بر حسب $K_{M\max}$

خصوصیات مکانیکی بالشتک‌ها با استفاده از یک رابطه دو خطی میان نیرو و جابجایی جانبی به خوبی منعکس شده است (شکل ۱۲-۹). در فاز اولیه طراحی، 10% از میرایی موثر سیستم جداساز به طور آزمایشی استفاده شده است. فرض شود که سیستم جداساز، جابجایی MCE را به مقدار کمتر از جابجایی جداکثیر کلی محدود نمی‌کند. سازه در مکانی با S_1 برابر با $0/57$ و S_S برابر با $1/25$ ساخته خواهد شد. نوع خاک منطقه، D می‌باشد بر پایه اطلاعات ارائه شد. موارد صفحه بعد را با استفاده از واحدهای متعارف طراحی و کنترل کنید:



شکل ۱۲-۹ مدل دو خطی: (الف) بالشتک ۳۲ اینچی، (ب) بالشتک ۳۸ اینچی

- ۱- جابجایی طرح D_{TD} و جابجایی حداکثر کلی D_{TM} را با استفاده از روش بار معادل جانبی محاسبه کنید؛
- ۲- حداقل نیروی جانبی در سیستم جداساز، رو و زیر سیستم جداساز را محاسبه نمایید.
- ۳- کنترل شود که نیروی باد تعیین کننده نمی‌باشد؛
- روش حل: برای تعیین جابجایی طرح کلی D_{TD} و جابجایی حداکثر کلی D_{TM} ، حداقل و حداکثر سختی سیستم جداساز و زمان تناوب موثر مرتبط با جابجایی طرح و حداکثر می‌بایست محاسبه شود.

$$K_{D \min} = 20(5.63) + 34(7.44) = 365.56 \text{ k/in} \quad (\text{الف})$$

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{D \min} g}} = 2\pi \sqrt{\frac{24000}{(365.56)(386.1)}} = 2.59 \text{ S} \quad (\text{ب})$$

از جدول ۲-۹ ضریب منطقه $F_V = 1.5$ می‌باشد.

بطور متناظر $S_{D1} = \left(\frac{2}{3}\right)S_{M1} = \left(\frac{2}{3}\right)(0.87) = 0.58$ و $S_{M1} = F_V S_1 = 1.5(0.58) = 0.87$

جدول (۴-۹)، $B_D = B_M = 1.2$ برای میرایی موثر٪ ۱۰ است. بنابراین جابجایی طرح برابر است با:

$$D_D = \frac{g S_{D1} T_D}{4\pi^2 B_D} = \frac{(386.1)(0.58)(2.59)}{4\pi^2 (1.2)} = 12.24 \text{ in} \quad (\text{ج})$$

چند قاب مهار بندی معمولاً در محیط سازه ساختمان به منظور مقاومت موثر در برابر نیروی زلزله واقع شده است. در این مثال $y = 240/2 = 120\text{ ft}$ منجر به حداکثر خروج از مرکزیت می‌شود. خروج از مرکزیت تصادفی برابر است با $e_a = 0.05(240) = 12\text{ ft}$. خروج از مرکزیت کلی برابرست با $e = 2 + 12 = 14\text{ ft}$ که موجب می‌شود که جابجایی طرح کلی برابر شود با:

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] = (12.24) \left[1 + \left(\frac{240}{2} \right) \left(\frac{(12)(14)}{150^2 + 240^2} \right) \right] = 15.32 \text{ in} \quad (\text{d})$$

حداکثر جابجایی کلی با استفاده از گام‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{M\ min} = 20(5.25) + 34(6.94) = 340.96 \text{ k/in} \quad (\text{e})$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{M\ min} g}} = 2\pi \sqrt{\frac{24000}{(340.96)(386.1)}} = 2.59 \text{ S} \quad (\text{b})$$

از جدول (۱-۹) ضریب منطقه برابر است با $F_a = 1.0$ بنابراین $S_{DS} = 2S_{MS}/3 = 2(1.25)/3 = 0.83$ و $S_{MS} = F_a S_S = 1.0(1.25) = 1.25$ برابرست با:

$$D_D = \frac{g S_{MI} T_M}{4\pi^2 B_M} = \frac{(386.1)(0.87)(2.68)}{4\pi^2 (1.2)} = 19.00 \text{ in} \quad (\text{j})$$

حداکثر جابجایی کلی برابرست با:

$$D_{MD} = D_M \left[1 + y \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] = (19) \left[1 + \left(\frac{240}{2} \right) \left(\frac{(12)(14)}{150^2 + 240^2} \right) \right] = 23.78 \text{ in} \quad (\text{h})$$

۲- حداکثر سختی موثر سیستم جداساز در جابجایی طراحی برابرست با:

$$K_{D\ max} = 20(6.75) + 34(8.91) = 437.97 \text{ k/in} \quad (\text{t})$$

بنابراین حداقل نیروی جانبی در سیستم جداساز و برای طراحی المان‌های سازه‌ای زیر

سیستم جداساز برابرست با:

$$V_b = K_{D\ max} D_D = 437.94(12.24) = 5360.4 \text{ k} \quad (\text{i})$$

ضریب عددی R_I از جدول (۵-۹) برابرست با ۰.۲. بنابراین حداقل نیروی جانبی برای

طراحی المان‌های سازه‌ای روی سیستم جداساز برابرست با:

$$V_S = \frac{K_{D\ max} D_D}{R_I} = \frac{437.94(12.24)}{2} = 2680.2 \text{ k} \quad (\text{k})$$

اگر چه حداقل نیروی جانبی V_S می‌بایست با استفاده از این دو مورد کنترل شود: سازه با تکیه‌گاه گیردار با زمان تناوب موثر T_D و با تسلیم سیستم جداساز ضرب در ضرب ۱/۵. توجه شود که در شرایط ارائه شده نیروی باد تعیین کننده نیست و نیازی به کنترل این شرایط نیست. از جدول های (۵-۹) و (۶-۹) $R = 1.5$ است. به طور متناظر، ضریب پاسخ لرزه‌ای استفاده از روابط (۶۲-۹) و (۶۴-۹) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_S = \frac{S_{DS}}{(R/I)} = \frac{0.83}{(6/1.5)} = 0.208 \quad (ج)$$

$$C_S = \frac{S_{DI}}{T_D(R/I)} = \frac{0.58}{2.59(6/1.5)} = 0.056 > 0.01 \quad (م)$$

از V_{S1} برای تعریف برش پایه سازه با تکیه‌گاه گیردار با زمان تناوب موثر T_D استفاده شود. این برش پایه V_{S1} ، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{S1} = C_S W = 0.056(24000) = 1344 \text{ k} < V_S = 2680.2 \text{ k} \quad (ن)$$

در سطح تسلیم سیستم جداساز، نیروی جانبی که با V_{S3} نمایش داده می‌شود برابرست با:

$$V_{S3} = 1.5 K_{e,max} D_{Dy,max} = 1.5 [(20)(28.64) + (34)(32.46)] \\ = 2514.7 \text{ K} < V_S = 2680.2 \text{ k} \quad (س)$$

از انجا که V_{S1} و V_{S3} کمتر از V_S باشند، حداقل نیروی جانبی برای طراحی اعضای سازه‌ای روی سیستم جداساز برابرست با $2k = 2680.2 \text{ k}$ ، توجه شود که به علت آنکه S_1 کمتر از $6g/0$ است از رابطه (۶۵-۹) استفاده شده است.

۳- اطلاعات طراحی که در این مثال ارائه شده است برخی از ضوابط نیروی معادل جانبی را رعایت نموده است. $S_1 = 0.58$ و نوع منطقه D موارد ۱ و ۲ از ضوابط بخش ۳-۲-۹ را رعایت نموده است. ساختمان ۴ طبقه است و ارتفاع آن کمتر از 65 فوت است، بنابراین مورد ۳ نیز رعایت شده است. زمان تناوب موثر در جابجایی حداکثر $T_M = 2/78$ ثانیه است که بند ۴ را اقناع می‌نماید. بند ۶ نیز رعایت شده است، چرا که در شرایط مسئله بیان شده که ساختمان منظم است. همانطور که در شرایط مسئله عنوان شده، جابجایی MCE توسط سیستم جداساز به جابجایی حداکثر کلی محدود نمی‌شود. بنابراین بند ۹ به طور خودکار اقناع می‌گردد.

بندهای ۵ و ۷ و ۸ نیاز به ارزیابی بیشتر دارد که در ادامه بررسی خواهند شد:

برای بند ۵، زمان تناوب سازه با تکیه‌گاه گیردار، $S = 0.45$ است. بنابراین بند ۵ نیز رعایت شده است. برای بند ۷، ۲۰٪ جابجایی طراحی برابر است با $2.45 \text{ in} = 0.2(12.24)$. به طور متناظر سختی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$32\text{-in.bearing}: \frac{1}{3} K_{32''} \frac{2(14.32) + 5.28(2.45 - 2)}{3(2.45)} = 4.22 \text{ K/in.} < K_{D_{\max}} \quad (\text{ع})$$

$$38\text{-in.bearing}: \frac{1}{3} K_{28''} \frac{2(16.23) + 7.49(2.45 - 2)}{3(2.45)} = 4.87 \text{ K/in.} < K_{D_{\max}} \quad (\text{ف})$$

بنابراین، سختی موثر بر هر دو نوع بالشتک در جابجایی طرح بزرگتر از $\frac{1}{3}$ سختی موثر در ۲۰٪ جابجایی است، توجه شود که توضیحات بالا بر اساس سختی حداقل در جابجایی طرح بدست آمده است. نتایج برای سختی حداقل در جابجایی طرح با به کار بردن روش مشابه بدست خواهد آمد. بند ۸ توانایی سیستم جداساز در ایجاد نیروی بازگرداننده را کنترل می‌کند.

۵۵۰ جابجایی طرح کل برابر است با:

$$50\% D_{TD} = 0.5(15.32) = 7.66 \text{ in} \quad (\text{ص})$$

برای بالشتک 32in، نیروی جانبی در $50\% D_{TD}$ برابر است با:

$$V_{32''} = 2(14.32) + 5.28(7.66 - 2) = 58.52 \text{ k} \quad (\text{ق})$$

برای بالشتک 38in، نیروی جانبی در $50\% D_{TD}$ برابر است با:

$$V_{38''} = 2(16.23) + 7.49(7.66 - 2) = 74.85 \text{ k} \quad (\text{ر})$$

بنابراین نیروی جانبی در $50\% D_{TD}$ برای سیستم جداساز برابرست با:

$$V_{50\% TD} = \frac{20(58.52) + 34(74.85)}{24000} = 0.155 \text{ W} \quad (\text{ش})$$

نیروی جانبی در جابجایی طرح کلی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

(ت)

$$V_{TD} = \frac{20[2(14.32) + 5.28(15.32 - 2)] + 34[2(16.23) + 7.49(15.32 - 2)]}{24000} = 0.270 \text{ W}$$

$$V_{TD} - V_{50\% TD} = 0.270 \text{ W} - 0.155 \text{ W} = 0.115 \text{ W} > 0.025 \text{ W} \quad (\text{خ})$$

بنابراین بند ۸ نیز اقناع شد. بر اساس بررسی های انجام شده تمامی موارد اقناع شده است و استفاده از روش جانبی معادل مجاز می‌باشد.

مثال ۹-۴-۲

حد پایین تحلیل طیف پاسخ برای سازه جداسازی لرزه‌ای شده که در مثال ۹-۴-۱ تشریح شده است را تعیین نمایید. تمامی شرایط ارائه شده به جز نامنظمی سازه روی سیستم جداساز برقرار می‌باشد.

روش حل:

با استفاده از روش طیف پاسخ حددهای پایین زیر همانگونه که در بخش ۹-۳-۵-۲ مشخص شده قابل استخراج است.

بر اساس روش حل مثال ۹-۴-۱، جابجایی طرح $D_D = 12.24\text{in}$ است. زمان تناوب تقریبی سازه با تکیه‌گاه گیردار در اینجا استفاده می‌شود. بنابراین $T_a = 0.45S$ و زمان تناوب موثر در جابجایی طرح برابر است با $T_D = 2.59S$. از این‌رو، جابجایی طرح برای تعیین جابجایی طرح کلی برای تحلیل طیف پاسخ برابر است با:

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + (T_a / T_D)^2}} = \frac{12.24}{\sqrt{1 + (0.045 / 2.59)^2}} = 12.06 \text{ in} \quad (\text{الف})$$

جابجایی طرح کلی برابر است با:

$$D'_{TD} = D'_D \left[1 + y \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] = (12.06) \left[1 + \left(\frac{240}{2} \right) \left(\frac{(12)(14)}{150^2 + 240^2} \right) \right] = 23.46 \text{ in} \quad (\text{ب})$$

حد پایین جابجایی طرح کلی برابر است با $0.9D'_{TD} = 0.9(15.1) = 13.59\text{in}$. حداکثر جابجایی از مثال ۹-۴-۱ برابر است با $D_M = 19.0\text{in}$ و زمان تناوب موثر متناظر برابر است با $T_M = 2.68S$. حداکثر جابجایی برای تعیین جابجایی حداکثر کلی برای تحلیل طیف پاسخ برابر است با:

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + (T_a / T_M)^2}} = \frac{19.0}{\sqrt{1 + (0.045 / 2.68)^2}} = 18.74 \text{ in} \quad (\text{ج})$$

حداکثر جابجایی کلی برابر است با:

$$D'_{MD} = D'_M \left[1 + y \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] = (18.74) \left[1 + \left(\frac{240}{2} \right) \left(\frac{(12)(14)}{150^2 + 240^2} \right) \right] = 23.46 \text{ in} \quad (\text{د})$$

حد پایین برای جابجایی حداکثر کلی $0.8D_{TM} = 0.8(23.46) = 18.74\text{in}$ است.

حد پایین نیروی جانبی طراحی رو و زیر سیستم جداساز برابرست با:

$$0.9V_b = 0.9(536.4) = 4824.4\text{K}$$

حد پایین نیروی جانبی طرح برای طراحی المان‌های سازه‌ای روی سیستم جداساز برابر است با $0.1V_s = 2680.2\text{K}$ که از $V_{SI} = 1752\text{K}$ و $V_{S3} = 2514.7\text{K}$ بزرگتر است. نتایج تحلیلی طیف پاسخ نباید کمتر از حدود پایین تعیین شده در بالا باشند.

مثال ۳-۹

یک سازه جداسازی شده لرزه‌ای در منطقه نوع D ساخته خواهد شد. زمان تناوب موثر در جابجایی طرح برابرست با $T_D = 2.5S$ و زمان تناوب موثر در جابجایی حداکثر برابر است با $T_M = 2.6S$. تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ می‌باشد درخصوص سازه نامنظم مذکور انجام پذیرد. سه رکورد حرکت زمین برای تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ انتخاب شده است و حداکثر پارامترهای پاسخ برای طراحی سازه اختیار می‌گردد. این سه حرکت زمین در طی زلزله ۱۹۸۹ Hollister City Hall Gilroy Array در Joshua tree ۱۹۹۲ لاندرس^۱ در جدول (۸-۹) نشان داده شده است. طیف پاسخ سه رکورد حرکت زمین در میرایی٪ ۵ در جدول (۸-۹) نشان داده شده است، طیف‌های پاسخ با شماره های ۱ و ۲ و ۳ نشان داده‌اند. پارامترهای شتاب طیف MCE برابر با $S_S = 2.0$ در زمان تناوب کوتاه و $S_I = 1.0$ در زمان تناوب یک ثانیه است که برای تعیین طیف پاسخ طرح استفاده خواهند شد.

۱- بر پایه اطلاعات ارائه شده طیف پاسخ طرح را محاسبه نمایید. زمان تناوب انتقال طولانی T_L برای این منطقه برابر با ۶ است.

۲- ضرایب مقیاس برای هر یک از رکوردهای حرکت زمین را تعیین نمایید.

روش حل:

با استفاده از جدول (۱-۹) و (۲-۹) ضرایب سایت F_a و F_V به ترتیب برای منطقه نوع D برابر با $1/۰$ و $1/۵$ است. از این رو $S_{MS} = F_a S_S = 1.0(2.0) = 2$ و $S_{MI} = F_V S_I = 1.5(1.0) = 1.5$ است. پارامترهای شتاب طیف طرح به روش صفحه بعد محاسبه می‌شوند:

1 - Loma Prieta

2 - Landers

$$S_{DI} = \frac{2}{3} S_{MI} = \frac{2}{3}(1.5) = 1.0 \quad \text{و} \quad S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} = \frac{2}{3}(2) = \frac{4}{3} \quad (\text{الف})$$

$$T_0 = 0.2 \left(\frac{S_{DI}}{S_{DS}} \right) = 0.2 \left[\frac{1.0}{(4/3)} \right] = 0.15 \quad (\text{ب})$$

$$T_S = \frac{S_{DI}}{S_{DS}} = \frac{3}{4} = 0.75 \quad (\text{ج})$$

شتاب پاسخ طیف طرح برای زمان تناوب کمتر از T_0 به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$S_a = S_{DS} \left[0.4 + 0.6 \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] = \frac{4}{3} \left(0.4 + \frac{0.6T}{0.15} \right) = 0.533 + 5.333T \quad (\text{د})$$

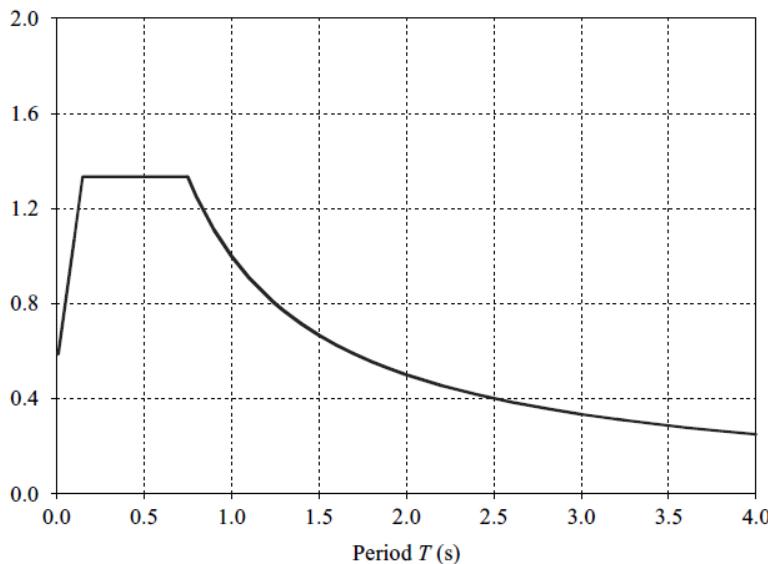
شتاب پاسخ طیف طرح بین T_0 و T_S برابر با $1/23$ در واحد g و شتاب بین T_S و T_L از رابطه زیر ارائه می‌شود:

$$S_a = \frac{S_{DI}}{T} = \frac{1}{T} \quad (\text{ه})$$

بر پایه روابط بین T و S_a که در بالا بدست آمد، طیف پاسخ طرح تهیه و در شکل (۱۳-۹) نشان داده شده است. از آنجا که $1/25 T_M$ از زمان تناوب T_L کوتاه‌تر است، آن بخش با زمان تناوب بزرگتر از T_L در شکل (۱۳-۹) نشان داده نشده است.

جدول ۸-۹ طیف پاسخ سه زلزله

(۳) ۱۹۸۹		(۲) ۱۹۸۹		(۱) ۱۹۹۲		<i>T (s)</i>
Loma Prieta	Hollister City Hall	Loma Prieta	Gilroy Array	Landers	Joshua Tree	
مولفه	مولفه	مولفه	مولفه	مولفه	مولفه	
۲	۱	۲	۱	۲	۱	
۰,۳۹۲	۰,۸۱۵	۰,۷۸۳	۱,۲۲۶	۰,۷۴۲	۰,۷۱۳	۰,۰۱
۰,۵۲۷	۰,۸۴۲	۱,۹۳۲	۲,۹۰۸	۱,۰۲۱	۰,۷۶۴	۰,۱
۰,۸۵۵	۰,۹۵۴	۲,۱۲۹	۳,۵۴	۱,۱۰۴	۰,۸۶۸	۰,۱۵
۰,۷۰۹	۱,۳۳۵	۳,۱۳۲	۴,۳۸۴	۱,۳۴۷	۰,۹۸۹	۰,۲
۰,۹۶۳	۱,۸۸۱	۲,۶۴۶	۲,۲۴	۱,۹۳۲	۱,۸۳۶	۰,۳
۰,۹۱۴	۱,۳۸۶	۱,۰۳۱	۲,۳۸۲	۱,۲۱۷	۱,۹۴۵	۰,۴
۱,۰۳۵	۲,۵۸۵	۱,۰۴	۲,۲۶	۱,۰۹۷	۱,۷۳۹	۰,۵
۰,۱۹۶	۲,۱۷۵	۱,۰۶۲	۱,۵۳۸	۱,۰۷۵	۱,۴۵	۰,۶
۰,۸۸۹	۲,۱۴۷	۰,۹۰۲	۱,۱۲۴	۲,۶۱۶	۱,۷۳۷	۰,۷
۰,۸۲۴	۲,۲۱۴	۱,۰۵۳	۱,۰۶۹	۲,۲۵	۱,۷۶۳	۰,۷۵
۰,۷۳۶	۲,۲۵۱	۰,۹۳۶	۱,۰۸۲	۱,۷۶۲	۱,۷۲۲	۰,۸
۰,۶۴	۲,۰۶۲	۰,۸۵۱	۰,۸۱۷	۱,۴۷۳	۱,۶۵۷	۰,۹
۰,۷۹۹	۲,۱۹۹	۰,۸۲۹	۰,۵۸۶	۱,۳۷۲	۱,۰۴۲	۱
۰,۹۵۱	۱,۹۲	۰,۸۴۳	۰,۴۰۸	۱,۶۶۴	۱,۲۰۴	۱,۱
۰,۸۸۹	۱,۰۰۹	۰,۸۴۳	۰,۳۴۸	۱,۴۹۵	۱,۳۷۸	۱,۲
۰,۷۹۱	۱,۳۳۵	۰,۸۴۵	۰,۳۱۹	۱,۳۶۷	۱,۲۵۸	۱,۲۵
۰,۶۴۷	۱,۲۴۲	۰,۸۴۲	۰,۲۹	۱,۲۵۱	۱,۱۵۳	۱,۳
۰,۴۵۱	۱,۱۰۶	۰,۸۲۱	۰,۳۳	۱,۰۷۴	۰,۶۷۶	۱,۴
۰,۳۸۶	۱,۰۹	۰,۷۷۶	۰,۳۷۸	۰,۹۶۴	۰,۵۶۲	۱,۰
۰,۴۰۶	۱,۰۲۶	۰,۷۶۸	۰,۳۲۷	۰,۹۴۱	۰,۴۹۵	۱,۶



شکل ۱۳-۹ شتاب طیفی طرح

- ضریب مقیاس برای هر طیف از حرکت زمین بین $T_D/5$ و $T_M/25$ تعیین می‌شود. $0.5T_D = 0.5(2.5) = 1.25S$ و $1.25T_M = 1.25(2.6) = 3.25S$ پاسخ طرح در ضریب $1/3$ ضرب می‌شود. پس از استفاده از روش آزمون و خطاب برای یافتن یک دسته از ضرایب مقیاس که قادر به اقناع ضوابط ASCE ۷-۰۵ باشند، ضرایب مقیاس $1/0.7$ و $1/0.82$ و $1/0.88$ به ترتیب برای مقیاس نمودن حرکات زمین ۱ و ۲ و ۳ مورد استفاده قرار گرفتند. بنابراین، میانگین طیف SRSS از سه رکورد زمین کمتر از 10% طیف پاسخ طرح افزایش یافته با ضریب $1/3$ نیست. شکل (۱۴-۹) نشان می‌دهد که در زمان تناوب بین $S = 1/25$ و $3/25$ میانگین طیف SRSS بیشتر از $1/3$ برابر طیف پاسخ طرحی است که به میزان 10% کاهش یافته است. ضرایب مقیاس با استفاده از نرم افزار اکسل انتخاب شده‌اند و در جدول (۹-۹) نشان داده شده‌اند. تفسیر نتایج در فواصل زمانی تیپ به صورت گام به گام در زیر ارائه شده است:

در زمان $S = 3.25$ شتاب طیف از طیف پاسخ طرح برابر است با:

$$1.3S_a = 1.3(0.308) = 0.4g \quad (z)$$

$$S_a = (1/3.25)g = 0.308g$$

برای طیف (۱) در زمان $3/25S$ ، دو مولفه از طیف شتاب با استفاده از SRSS ترکیب می‌شود. از این رو $S_{a(1)} = \sqrt{0.099^2 + 0.3^2} = 0.316g$ به روش مشابه برای طیف‌های ۲ و ۳ خواهیم داشت:

$$S_{a(2)} = \sqrt{0.143^2 + 0.214^2} = 0.257g \quad (\text{ح})$$

$$S_{a(3)} = \sqrt{0.337^2 + 0.209^2} = 0.396g$$

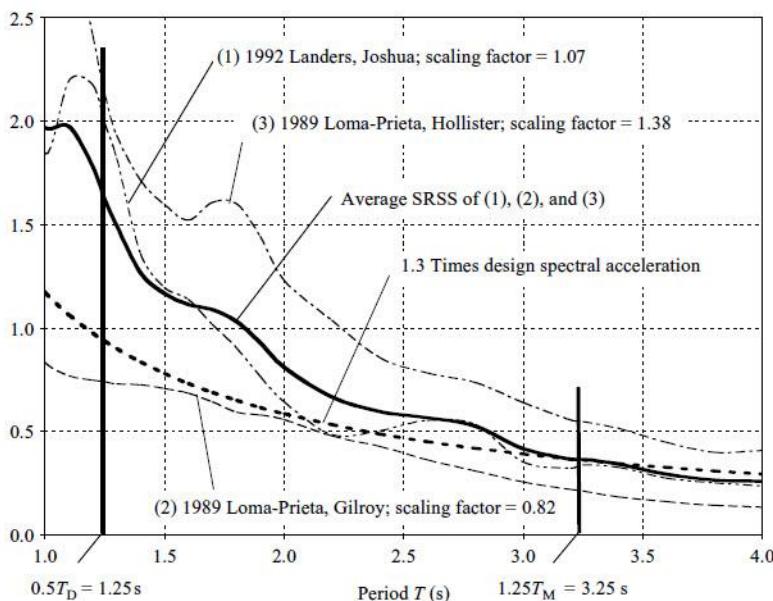
با بکار بردن ضرایب مقیاس انتخاب شده، میانگین طیف SRSS برابر است با:

$$\bar{S}_a = \frac{1.07S_{a(1)} + 0.82S_{a(3)} + 1.38S_{a(3)}}{3} \\ = \frac{1.07(0.316) + 0.82(0.257) + 1.38(0.396)}{3} = 0.365g \quad (\text{ط})$$

با مقایسه طیف پاسخ طرح ارائه شده در شکل (۱۳-۹)، شرایط زیر برقرار خواهد شد:

$$0.9(1.3S_a) = 0.9(0.4) = 0.36 < \bar{S}_a = 0.365 g \quad (\text{ی})$$

از این رو ضرایب مقیاس انتخاب شده، ضوابط ASCE ۷-۰۵ را اقنان می‌کنند. به عنوان یک تمرین از کاربرد روش فوق، نمایش میانگین طیف SRSS کمتر از 10% ، $1/3$ برابر طیف پاسخ طرح که به راحتی برای هر فاصله زمانی بین $1/25$ تا $3/25$ به دست می‌آید، نیست.



شکل ۱۴-۹ تعیین ضرایب مقیاس زمین لرزه‌ها

جدول ٩-٩ تعیین خواص مقیاس زمین لرزه ها

S_a	مانگن SRSS و ۱.۲	۱۹۸۹ (۳) Loma Prieta Hollister City Hall			۱۹۸۹ (۲) Loma Prieta Gilroy Array			(۱) ۱۹۹۲ Landers Joshua Tree			$T(s)$
		SRSS	۲ مولفه	۱ مولفه	SRSS	۲ مولفه	۱ مولفه	SRSS	۲ مولفه	۱ مولفه	
۰.۶۸۶	۱.۱۸۱	۱.۲۴۹	۰.۵۴۲	۱.۱۲۵	۱.۱۹۳	۰.۵۴۲	۱.۰۰۵	۱.۱۰۱	۰.۷۹۴	۰.۷۶۳	۰.۱
۱.۲۴۸	۱.۸۶۶	۱.۵۷	۰.۷۲۸	۱.۱۶۱	۲.۸۶۲	۱.۵۸۴	۲.۳۸۵	۱.۳۶۴	۱.۹۲	۰.۸۱۸	۰.۱
۱.۰۶	۲.۲۱۹	۱.۷۶۸	۱.۱۷۹	۱.۳۱۷	۲.۳۸۷	۱.۷۴۶	۲.۹۰۳	۱.۰۰۳	۱.۱۸۲	۰.۹۲۸	۰.۱۵
۱.۰۶	۲.۷۶۴	۲.۰۸۶	۰.۹۷۹	۱.۸۴۲	۴.۴۱۸	۲.۰۶۸	۳.۵۹۵	۱.۷۸۸	۱.۴۴۱	۱.۰۵۸	۰.۲
۱.۰۶	۲.۸۷	۲.۹۱۶	۱.۳۲۹	۲.۵۹۵	۲.۸۴۳	۲.۱۷	۱.۸۳۷	۲.۸۰۲	۲.۰۶۸	۱.۹۶۴	۰.۳
۱.۰۶	۲.۲۹۱	۲.۴۹۱	۱.۴۶۱	۱.۹۱۲	۲.۱۲۸	۰.۸۴۵	۱.۹۰۳	۲.۳۵۵	۱.۳۰۲	۲.۰۸۱	۰.۴
۱.۰۶	۲.۸۶۴	۴.۱۴۸	۲.۱۱۹	۲.۵۶۷	۲.۲۴۳	۱.۲۶۳	۱.۸۵۳	۲.۲	۱.۱۷۴	۱.۸۶۱	۰.۵
۱.۰۶	۲.۳۵۷	۳.۲۴۶	۱.۲۲۶	۲.۰۰۲	۱.۵۳۳	۰.۸۷۱	۱.۴۶۱	۲.۲۹۱	۱.۶۸۵	۱.۵۵۲	۰.۶
۱.۰۶	۲.۵۸۲	۳.۲۰۶	۱.۲۲۶	۲.۹۶۲	۱.۱۸۱	۰.۷۳۹	۰.۹۲۱	۳.۳۶	۲.۷۹۹	۱.۸۵۸	۰.۷
۱.۰۶	۲.۵۱۶	۳.۲۵۹	۱.۱۳۷	۲.۰۵۵	۱.۲۳	۰.۸۶۳	۰.۸۷۷	۳.۰۵۸	۲.۴۰۸	۱.۸۸۶	۰.۷۵
۱.۴۶۲	۲.۳۵۹	۳.۲۶۸	۱.۰۱۶	۲.۱۰۶	۱.۱۷۳	۰.۷۶۷	۰.۸۸۸	۲.۵۳۷	۱.۸۸۶	۱.۸۴۳	۰.۸
۱.۳	۲.۱۰۶	۲.۹۷۹	۰.۸۸۳	۲.۸۴۵	۰.۹۶۸	۰.۶۹۸	۰.۶۷	۲.۳۷۲	۱.۵۷۶	۱.۷۷۳	۰.۹
۱.۱۷	۱.۹۶۸	۳.۲۲۹	۱.۱۰۳	۲.۰۳۵	۰.۸۳۳	۰.۶۸	۰.۴۸	۱.۸۴۳	۱.۴۶۸	۱.۱۱۵	۱
۱.۰۶۴	۱.۹۷۴	۲.۹۵۶	۱.۳۱۳	۲.۶۴۹	۰.۷۶۸	۰.۶۹۲	۰.۳۳۵	۲.۱۹۷	۱.۷۸	۱.۲۸۸	۱.۱
۰.۹۷۵	۱.۷۸	۲.۴۱۷	۱.۲۲۶	۲.۰۸۳	۰.۷۴۸	۰.۶۹۱	۰.۲۸۵	۲.۱۷۵	۱.۵۹۹	۱.۴۷۵	۱.۲
۰.۹۳۶	۱.۶۱۹	۲.۱۳	۱.۰۹۱	۱.۸۲۹	۰.۷۴	۰.۶۹۳	۰.۲۶۱	۱.۹۸۸	۱.۴۶۳	۱.۳۴۶	۱.۲۵
۰.۹	۱.۴۹۴	۱.۹۳۲	۰.۸۹۲	۱.۷۱۴	۰.۷۳	۰.۶۹	۰.۲۳۷	۱.۸۲	۱.۳۳۸	۱.۲۲۴	۱.۲
۰.۸۳۶	۱.۲۶۵	۱.۷۱۳	۰.۶۲۲	۱.۵۹۶	۰.۷۲۵	۰.۶۷۳	۰.۲۷۱	۱.۳۵۸	۱.۱۴۹	۰.۷۲۳	۱.۴
۰.۷۸	۱.۱۶۶	۱.۵۹۵	۰.۵۳۳	۱.۵۰۴	۰.۷۰۸	۰.۶۳۶	۰.۳۱	۱.۱۹۴	۱.۰۳۱	۰.۶۰۲	۱.۰
۰.۷۳۱	۱.۱۱۵	۱.۵۲۲	۰.۵۶	۱.۴۱۵	۰.۶۸۴	۰.۵۳	۰.۲۶۸	۱.۱۳۸	۱.۰۰۷	۰.۵۳	۱.۶
۰.۶۸۸	۱.۰۸۸	۱.۶۰۷	۰.۴۹۵	۱.۵۲۹	۰.۶۴۲	۰.۶۰۴	۰.۲۱۸	۱.۰۱۶	۰.۸۶۷	۰.۵۲۹	۱.۷
۰.۶۵	۱.۰۳۱	۱.۵۹۹	۰.۵۱۷	۱.۵۱۳	۰.۵۹۲	۰.۵۷	۰.۱۶۱	۰.۹۰۳	۰.۷۵۴	۰.۴۹۶	۱.۱
۰.۶۱۶	۰.۹۲۹	۱.۴۴۲	۰.۴۷۷	۱.۳۶۱	۰.۵۷۸	۰.۵۶۳	۰.۱۳۲	۰.۷۶۶	۰.۶۵	۰.۴۰۶	۱.۹
۰.۵۸۵	۰.۸۰۹	۱.۲۲۹	۰.۴۲۳	۱.۱۰۲	۰.۵۰۶	۰.۳۷۹	۰.۱۳۵	۰.۶۴۲	۰.۵۲۷	۰.۳۶۸	۲
۰.۵۳۲	۰.۶۶۷	۱.۰۳۸	۰.۴۷۲	۰.۹۲۵	۰.۴۷۸	۰.۴۶۲	۰.۱۲۳	۰.۴۸۴	۰.۳۸۵	۰.۲۹۳	۲.۲
۰.۴۸۸	۰.۵۹۵	۰.۸۰۶	۰.۳۸۸	۰.۷۶۳	۰.۴۲۶	۰.۴۱۵	۰.۰۹۷	۰.۵۰۳	۰.۴۲۶	۰.۲۶۷	۲.۴
۰.۴۵	۰.۵۶۶	۰.۷۸۲	۰.۴۰۳	۰.۶۷۱	۰.۳۶۳	۰.۳۴۸	۰.۱۰۱	۰.۵۵۳	۰.۵۰۳	۰.۲۲۸	۲.۶
۰.۴۱۸	۰.۵۲۵	۰.۷۲۶	۰.۴۷۴	۰.۶۰۲	۰.۳۰۷	۰.۲۸۶	۰.۱۱۱	۰.۴۳۲	۰.۴۹۱	۰.۲۰۳	۲.۸
۰.۳۹	۰.۴۱۶	۰.۶۴	۰.۳۴۶	۰.۵۳۸	۰.۲۵۵	۰.۲۳۱	۰.۱۰۸	۰.۳۵۲	۰.۳۲۷	۰.۱۲۹	۳
۰.۳۶۶	۰.۳۶۶	۰.۵۵۵	۰.۲۸	۰.۴۷۹	۰.۲۱۹	۰.۱۸۵	۰.۱۱۸	۰.۳۲۲	۰.۳۰۶	۰.۱۰۲	۳.۲
۰.۳۶	۰.۳۶۵	۰.۵۴۷	۰.۲۸۹	۰.۴۶۵	۰.۲۱۱	۰.۱۷۵	۰.۱۱۷	۰.۳۲۸	۰.۳۲۱	۰.۱۰۶	۳.۲۵
۰.۳۰۸	۰.۲۶۴	۰.۳۹۸	۰.۲۲۱	۰.۲۲۴	۰.۱۴۲	۰.۱۱۶	۰.۰۸۲	۰.۲۵۱	۰.۲۱۱	۰.۱۳۵	۳.۸
۰.۲۹۳	۰.۲۵۸	۰.۴۰۷	۰.۲۹۲	۰.۲۸۳	۰.۱۲۲	۰.۱۰۵	۰.۰۸۱	۰.۲۲۶	۰.۲۰۵	۰.۱۱۶	۴
۰.۲۴۴	۰.۳۴۱	۰.۵۱۵	۰.۲۹۴	۰.۴۲۳	۰.۱۸۳	۰.۱۴۸	۰.۱۰۷	۰.۳۲۵	۰.۳۰۴	۰.۱۱۶	۲.۴
۰.۳۲۵	۰.۲۹۳	۰.۴۴۶	۰.۲۷۸	۰.۳۷	۰.۱۶	۰.۱۳	۰.۰۹۳	۰.۲۷۲	۰.۲۴۶	۰.۱۱۶	۲.۴

۵-۹- پرسی آزمایشگاهی و تعیین خواص جداسازها^۱

۵-۹-۱ - ضوابط آزمایشگاهی ASCE ۷-۰۵^۲

خواص مکانیکی سیستم‌های جداساز که در روش بار جانبی معادل و روش تحلیل دینامیکی استفاده می‌شود، می‌بایست مطابق با پروتوتایپ آزمایش ارائه شده در بخش ۱۷-۸، ASCE ۷-۰۵ [۲]، ارزیابی گردد. از هر نوع و اندازه بالشتک، دو عدد در مقیاس بزرگ می‌بایست مورد آزمایش قرار گیرد. آزمایش پروتوتایپ می‌بایست شامل موارد زیر باشد:

- ۱) بار ثقلی به مقدار P که برابر با $D+0.5L$ است می‌بایست در ابتدا بر بالشتک وارد شود که در آن D و L به ترتیب بارهای مرده و زنده می‌باشند. در این توالی، ۲۰ چرخه معکوس تحت بار جانبی برابر بار باد طراحی، انجام می‌شود.

- ۲) اعمال بار ثقلی بر بالشتکی ادامه دارد که مجبور به حرکت در سه چرخه کامل معکوس در هر جابجایی که به میزان $0/25 D_D$ ، $0/5 D_D$ ، $0/10 D_D$ و $0/10 D_M$ افزایش می‌یابد، است. چنانچه بالشتک مورد آزمایش به منظور مقاومت در مقابل بار لرزه‌ای قائم که از سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای منتقل می‌شود، استفاده شده باشد، دو بار قائم مضاعف در توالی آزمایش به منظور انجام روش چرخه‌ای یکسان که در بالا اشاره شد می‌بایست، لحاظ شود.

$$(1.2 + 0.2S_{MS})D + L + Q_E \quad (۷۹-۹)$$

$$(09 - 0.2S_{MS})D + Q_E \quad (۸۰-۹)$$

که در آن Q_E نیروی زلزله تعیین شده از MCE است و S_{MS} بیانگر شتاب پاسخ طیف در زمان تناوب کوتاه است.

۳) تحت بار ثقلی P ، سه چرخه کامل به همراه جابجایی حداقل کلی D_{TM} انجام می‌شود.

۴) تحت بار ثقلی یکسان P ، بالشتک مجبور می‌شود که به اندازه (چرخه معکوس کامل با جابجایی طی کلی) $(30S_{DI} / S_{DS}B_D) \geq 10$ جابجا شود.

بر مبنای نتایج آزمایش‌های پروتوتایپ، حداقل و حداقل سختی موثر در جابجایی طرح با استفاده از رابطه صفحه بعد تعیین می‌شود:

1 - Testing Verification and Determination of Isolator Property

2 - Testing Requirement of ASCE 7-05

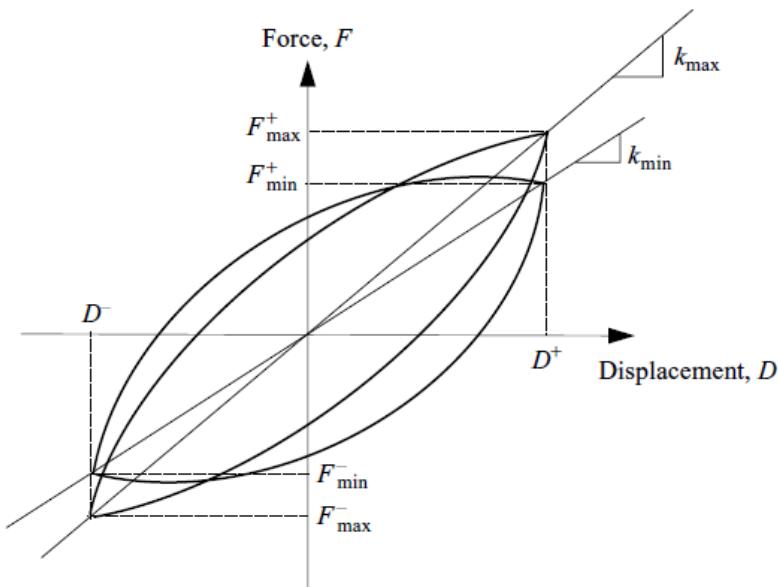
$$K_{D \min} = \frac{\sum |F_D^+|_{\min} + \sum |F_D^-|_{\min}}{2D_D} \quad (81-9)$$

$$K_{D \max} = \frac{\sum |F_D^+|_{\max} + \sum |F_D^-|_{\max}}{2D_D} \quad (82-9)$$

که در آن $\sum |F_D^-|_{\min}$ و $\sum |F_D^+|_{\min}$ مجموع حداقل نیروی جانبی مطلق در جابجایی طرح نشان دهنده مثبت و منفی D_D مثبت و منفی، $\sum |F_D^-|_{\max}$ و $\sum |F_D^+|_{\max}$ در جابجایی حداکثر D_D مثبت و منفی است. شکل (۱۵-۹) رابطه سختی موثر با جابجایی مطلق متناظر را نشان می‌دهد.

$$K_{M \min} = \frac{\sum |F_M^+|_{\min} + \sum |F_M^-|_{\min}}{2D_D} \quad (83-9)$$

$$K_{M \max} = \frac{\sum |F_M^+|_{\max} + \sum |F_M^-|_{\max}}{2D_D} \quad (84-9)$$



شکل ۱۵-۹ تعریف سختی موثر، K_{\min} و K_{\max}

پس از آنکه $K_{D\max}$ و $K_{M\max}$ تعیین شدند و محاسبه مجموع انرژی کلی مستهلك شده در سیستم جداساز در یک چرخه کامل از جابجایی طرح $\sum E_D$ و در چرخه کامل از جابجایی حداقل $\sum E_D$ از نتایج آزمایش پروتوتاپ، میرایی موثر مناظر β_D و β_M بر مبنای روابط (۹-۵۱) و (۹-۵۵) به دست می‌آید.

علاوه بر آزمایش‌های پروتوتاپ، آزمایش‌های تولید^۱ برای همه بالشتک‌ها به منظور اطمینان از قرار گرفتن نتایج آزمایش در محدوده قابل قبول از مقادیر طراحی مقیاس شده از قبل لازم می‌باشد. آزمایش تولید معمولاً شامل آزمایش فشار بالشتک برای تعیین سختی فشاری، آزمایش سختی جانبی در جابجایی طرح، تعیین میرایی موثر در جابجایی طرح است. معیارهای پذیرش نتایج آزمایش برای هر دو آزمایش پروتوتاپ و تولید، توسط هیات داوران طرح و نمایندگان اجرا بررسی و تایید می‌گردد. در این بخش تنها ضوابط کلی از آزمایش‌های پروتوتاپ و تولید ارائه شده است. انتظار می‌رود که ضوابط ویژه برای آزمایش هر نوع مختلف از بالشتک بکار رود.

جزئیات ضوابط و معیارهای آزمایش‌های پروتوتاپ و تولید برای هر نوع مختلف از بالشتک در مرجع [۲] ارائه شده است.

۲-۵-۹ - اصلاح ویژگی‌های جداساز^۲

ثابت شده است که خصوصیات مکانیکی تعیین شده از آزمایش به علت شرایط محیطی نظیر، تاثیر سن (گذشت زمان)، آلودگی، جنبش^۳، دما و خفه شدگی^۴ در طول سال‌ها تغییر می‌کند. خفه شدگی یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد بالشتک‌های نوع الاستومریک می‌باشد که مربوط به کاهش سختی برشی در چرخه‌های اولیه آزمایش با تغییر شکل برشی زیاد است. اگر چه، زمان بهبود بالشتکی که سختی برشی اولیه خود را از دست داده اساساً وابسته به خصوصیات لاستیک بالشتک است. تمامی اثرات ارائه شده در بالا می‌بایست در مرحله طراحی در نظر گرفته شود اگرچه ASCE 7-05 [۱] به وضوح نحوه به شمار آوردن آنها را مشخص

1 - Production Tests

2 - Modification of Isolator Properties

3 - Travel

4 - Scrabbing

نکرده است. در دستورالعمل طراحی اخیر سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای، اصلاح خصوصیات جداسازها معمولاً توسط روشی از ضرایب اصلاح ویژگی سیستم که توسط کونستانتیتو و همکاران^۱ [۵] بر پایه مطالعات تحقیقاتی انها ارائه شده، تعیین می‌شود که در سال ۱۹۹۹ توسط راهنمای آشتو برای طراحی جداسازهای لرزه‌ای مورد پذیرش قرار گرفت [۱].

در این روش حد بالا و پایین خصوصیات بالشتک با اعمال ضرایب اصلاح مختلف به خصوصیات اسمی حاصل از نتایج آزمایشگاهی تعیین می‌شود. با فرض آنکه خصوصیات اسمی بالشتک‌ها با P_n نشان داده شود و خصوصیات اصلاح شده حداقل و حداقل به ترتیب با

$$P_{\max} = f(\lambda_{\max,1}, \dots, \lambda_{\max,i}) P_n \quad (85-9)$$

$$P_{\min} = f(\lambda_{\min,1}, \dots, \lambda_{\min,i}) P_n \quad (86-9)$$

که در آن P_n نشان داده شود، رابطه میان P و P_{\max} و P_{\min} به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$f(\lambda_{\min,1}, \dots, \lambda_{\min,i}) P_n = f(\lambda_{\max,1}, \dots, \lambda_{\max,i}) P_{\max} \quad (87-9)$$

یا ضرایب λ می‌باشند که دارای اثرات متفاوت هستند و بر حسب $\prod \lambda_{\max,i}$ و $\prod \lambda_{\min,i}$ تعریف می‌شوند. برای بالشتک نوع لغرنده، ضرایب اصلاح شامل اثر سالخوردگی (گذشت زمان)، آلودگی، پوشش و دما است در حالی که اثر سالخوردگی، خفه شدگی، دما و حرارت برای بالشتک نوع الاستومریک لحاظ می‌شود. ضرایب λ با استفاده از جدول (۱-۵) تا (۸-۵) که توسط کونستانتیتو و همکاران [۵] ارائه شده، قابل تعیین است. باید توجه شود که احتمال اندکی برای وجود همه این اثرات در هنگام زلزله وجود دارد. بنابراین یک ضریب تنظیم خواص سیستم x برای اصلاح $\prod \lambda_{\max,i}$ و $\prod \lambda_{\min,i}$ پیشنهاد شده است. با معرفی λ_{\max} و λ_{\min} به ترتیب به $f(\lambda_{\min,1}, \dots, \lambda_{\min,i})$ و $f(\lambda_{\max,1}, \dots, \lambda_{\max,i})$ ، ضرایب اصلاح تنظیم شده به صورت زیر می‌باشد:

$$\lambda_{\max} = 1 + (\prod \lambda_{\max,i} - 1) \quad (87-9)$$

$$\lambda_{\min} = 1 + (\prod \lambda_{\min,i} - 1) \quad (88-9)$$

که در آن بر حسب اهمیت سازه x از ۰/۶۶ تا ۱ تغییر می‌کند. یک نمونه از کاربرد ضرایب اصلاح خواص سیستم در مثال صفحه بعد تشریح شده است:

برای یک بالشتک لاستیکی با میرایی بالا به قطر ۴۰ اینچ، حد بالای خواص برابر با سختی الاستیک $K_{e\max} = 275 \text{ K/in}$ ، سختی پس از تسلیم $K_{p\max} = 10.08 \text{ K/in}$ و جابجایی تسلیم $D_{y\max} = 20 \text{ in}$ لحاظ شده است. از این رو نیروی تسلیم $F_y = 27.6(2) = 55.2 \text{ kN}$ است. با استفاده از رابطه (۲۱-۹) مقاومت مشخصه تسلیم $Q = (K_{e\max} - K_{p\max})D_y = (27.6 - 10.08)(2) = 35.041 \text{ kN}$ می‌شود. اثر حرارت برای بالشتک لاستیکی با میرایی بالا ناچیز است و از جدول (۵-۵) و (۶-۵) ارائه شده در مرجع [۵]، ضریب $1/2$ برای هم اثر سالخوردگی و هم خفه شدگی برای اصلاح سختی پس از تسلیم $K_{p\max}$ و مقاومت مشخصه Q به دست می‌آید. با فرض آنکه سازه مذکوری یک سازه ضروری نیست، ضریب تنظیم خواص سیستم x ، برابر با 0.75 است، لذا از رابطه (۸۷-۹) برابر می‌شود با $\lambda_{\max} = 1 + 0.75[1.2(1.2) - 1] = 1.33$ پس از تسلیم تنظیم شده $K_{p\max} = 1.33(10.08) = 13.41 \text{ K/in}$ و مقاومت مشخصه تنظیم شده $Q = 1.33(35.04) = 46.6 \text{ kN}$ به طور متناظر

$$\begin{aligned} F_y &= 27.6 \times 3.28 = 90.53 \text{ K}, D_{y\max} = Q / (K_{e\max} - K_{p\max}) \\ &= 46.6 / (27.6 - 13.41) = 3.28 \text{ in} \end{aligned}$$

سختی پس از تسلیم اصلاح شده $K_{p\max}$ ، جابجایی تسلیم $D_{y\max}$ ، در راستای سختی الاستیک $K_{e\max}$ می‌باشد. جهت انجام تحلیل نیروی معادل جانبی و یا به عنوان داده‌های ورودی به مدل کامپیوتری برای انجام تحلیل دینامیکی سازه ساختمان مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع فصل ۹

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Guide Specifications for Seismic Isolation Design, Washington, DC, 1990
- [2] American Society of Civil Engineers (ASCE), Minimum Design Loads for Building and other Structures, ASCE/SEI 7-05, 2005.
- [3] Cheng, F.Y., Matrix Analysis of structural Dynamics: Applications and Earthquake Engineering Marcel Dekker, Inc., New York, 2001.
- [4] Computer and Structures, inc. (CSI), CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, and SAFE, Berkeley, California, 2005.
- [5] Constantinou, M.C., Tsopelas, P., Kasalanti, A., and Wolf, E., Property Modification Factors for Seismic Isolation Bearings, Report No. NCEER-99-0012, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, 1999.
- [6] Federal Emergency Management Agency (FEMA), NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings and NEHER Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Reports No. FEMA-273 and FEMA 274, Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 1997.
- [7] Federal Emergency Management Agency (FEMA), Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Report No. FEMA – 356, Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 2000.
- [8] Federal Emergency Management Agency (FEMA), NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures, Parts 1 and 2, Report No. FEMA-450, Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 2003.
- [9] International Code Council, International Building Code (IBC), Falls Creek, VI, 2006.
- [10] International Conference of Building Code (ICBO), Decision III-Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures, Appendix to Chapter 23, Uniform Building Code, 1991 Edition, Whittier, CA, 1991.
- [11] International Conference of Building Code (ICBO), Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures, Appendix to Chapter 16 ,Uniform Building Code, 1997 Edition, Whittier, CA, 1997.
- [12] Kelly, K.M., Earthquake-Resistant Design with Rubber, 2 nd ed – Springer-Verlag, London, 1996.
- [13] Naeim, F. and Kelly, I.M., Design of Seismic Isolated Structures: from Theory to practice, John Wiley & sons Inc., New york, 1999.
- [14] Newark, N.M., and Hall, W.J., Earthquake Spectra and Design, Warthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA, 1981.
- [15] Structural Engineers Association of California (SEAOC), Tentative Seismic Isolation Design, San Francisco, CA, 1986.

- [16] Structural Engineers Association of California (SEAOC), Recommended Lateral Force Requirements and Commentary, 5th ed., Sacramento, CA, 1990.
- [17] Structural Engineers Association of California (SEAOC), Recommended Lateral Force Requirements and Commentary, 7th ed., Sacramento, CA, 1999.

