

استفاده بهینه از نسل جدید میراگرهای مایع در کاهش پاسخ سازه‌ها *

فریبرز ناطقی‌الهی^(۱)کاوه درخشانی^(۲)

چکیده بر اساس نیازهای موجود در عرصه ساختمان سازی، در دهه‌های اخیر مبحث جدیدی تحت عنوان کنترل لرزه‌ای سازه‌ها مطرح شده است. یکی از روش‌های مورد بحث، استفاده از سیستم‌های میراگر مایع می‌باشد که در دو نوع آمیختگی و ستونی در منابع علمی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این تحقیق با استفاده از یک روش ابتکاری به مدلسازی رایانه‌ای میراگرهای مایع ستونی در سازه پرداخته شده است. در این خصوص پس از بیان روند طراحی سیستم‌های سازه‌ای به همراه میراگرهای مایع ستونی، حالات مختلفی از سیستم‌های سازه‌ای فولادی از جنبه‌های مختلف در یک سازه ۲۰ طبقه مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که این سیستم‌ها در مقابل زلزله‌های مختلف رفتار مناسبی از نظر کاهش همزمان پاسخ تغییر مکان و شتاب سازه از خود بروز می‌دهند.

واژه‌های کلیدی سیستم‌های سازه‌ای، پاسخ سازه، میراگر مایع ستونی تنظیم شده، جرم، نسبت‌های فرکانس و میرایی.

Use of Liquid Dampers in Optimization of Structural Response

F. Nateghi-Alahi

K. Derakhshany-Zenouz

Abstract Owing to new developments in structural engineering in reduction of structural response during earthquakes, several proposals have been introduced. One of the latest proposals is the use of liquid dampers inside the structure. For this, engineers and scientists have suggested two distinct liquid dampers namely Sloshing and Column dampers. In this paper tuning liquid column dampers is investigated and applied on a 20-story building to check the structural behavior. The study shows a great improvement in both acceleration and displacement of the equipped building; therefore, suggested is the use of these dampers in controlling the structural response in earthquakes.

Key Words Structural Systems, Structural Response, Tuning Column Liquid Dampers, Mass, Frequency and Damping Ratio.

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۲/۵/۸ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۲/۱۱/۱۱ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استاد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

(۲) کارشناس ارشد زلزله، شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان غربی

مقدمه

در سال‌های اخیر ساختمانها به سمت افزایش ارتفاع، استفاده از مصالح کم وزن و پرمقاومت، تکنیک‌های ساخت پیشرفته، شکل‌پذیری و میرایی بالا سوق داده می‌شوند. بر این اساس، سازه‌های یاد شده به عوامل طبیعی از جمله باد و زمین لرزه‌ها خیلی حساس شده‌اند و این عوامل لرزش‌های ناخواسته‌ای را در ساختمانها ایجاد می‌نمایند. این لرزش‌ها برای ساکنین ساختمان ناراحتی و احساس ناامنی بوجود می‌آورند و ممکن است خسارت‌هایی را نیز به تجهیزات و اقلام غیر سازه‌ای وارد نمایند. برای مقابله با این ارتعاشات روش‌های عملی و سیستم‌های موثری جهت کنترل پاسخ سازه‌ها توسط پژوهشگران و مهندسان فن ارائه گردیده است.

در بیشتر موارد، برای غلبه بر این لرزشها از سیستم‌های غیرفعال که به میراگرهای جرمی تنظیم شده معروف می‌باشند، بسنده شده است. اساس کار این وسیله‌ها ایجاد اینرسی ثانویه در سازه می‌باشد. میراگر مایع تنظیم شده (آمیختگی) نوع خاصی از میراگرهای جرمی تنظیم شده می‌باشد که در آن مایع (معمولا آب) به جای جرم میراگر جایگزین شده است. میراگر مایع ستونی تنظیم شده نوع خاصی از میراگر مایع تنظیم شده می‌باشد که بر اساس حرکت مایع در درون یک مخزن لوله‌ای یو شکل و ایجاد میرایی به واسطه وجود یک دریچه یا سوپاپ در مسیر جریان مایع، با نیروهای وارده بر سازه مقابله می‌نماید. تاکید این تحقیق بر مطالعه و توسعه نسل جدیدی از میراگرهای مایع برای کاهش پاسخ سازه می‌باشد.

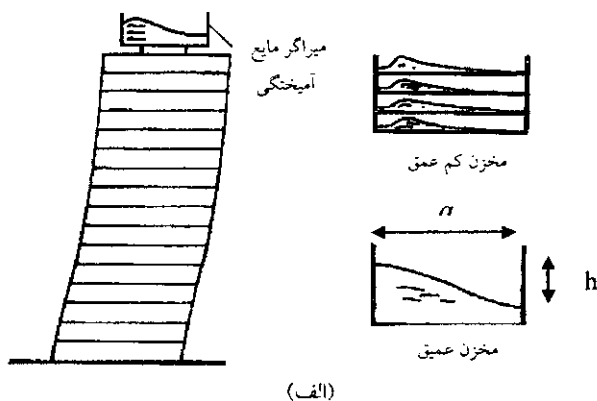
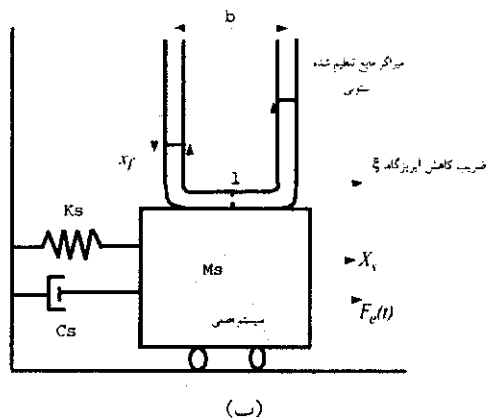
استفاده می‌نمایند. این میراگرها در دو نوع آمیختگی تنظیم‌شده (Tuning Liquid Dampers) و ستونی تنظیم‌شده (Tuning Column Liquid Dampers) می‌باشند.

میراگرهای آمیختگی مشتمل بر یک تانکر مملو از مایع، عموماً آب، می‌باشند و بر اساس آمیختگی و کوفتگی و سایر مکانیسم‌ها، پاسخ سازه را کاهش می‌دهند. اتلاف انرژی در میراگرهای مایع آمیختگی توسط مکانیسم‌های گوناگونی از جمله: عملکرد لزج مایع، شکست موج، استفاده از مهره‌های شناور در سطح آب، هندسه و زبری مخزن روی می‌دهد. این میراگرها نیز در دو نوع کم عمق و عمیق مورد استفاده می‌باشند. در حالات کم عمق و عمیق به ترتیب، نسبت عمق آب به طول تانکر در جهت حرکت (h/a) ، کوچکتر یا مساوی $0/15$ و بزرگتر از $0/15$ می‌باشد [1]. از میراگرهای مایع بطور گسترده در ژاپن استفاده نموده‌اند. به عنوان مثال می‌توان از میراگرهای استفاده شده در برج طلایی (Gold Tower) در چیبا ژاپن، هتل سلطان شین یوکوهاما (Shin Yokohama Prince) و برج فرودگاه‌های ناکازاکی و بین‌المللی توکیو نام برد [2]. میراگرهای ستونی نوع خاصی از میراگرها با مخازن لوله‌ای یو شکل می‌باشند و بر اساس حرکت آب در داخل لوله و افزایش میرایی به واسطه یک دهانه سوپاپ دار در مسیر عبور آب، پاسخ سازه را کاهش می‌دهند [1]. از این نوع میراگرها در هتل کوسی‌مای (Cosima) شهر توکیو، هتل حیات (Hyatt) و ساختمان ایکیدا (Ichida) در اوزاکا استفاده نموده‌اند [3]. شماتیکی از میراگرهای مایع در شکل (۱) نشان داده شده است.

معرفی میراگرهای مایع

مدل تحلیلی میراگرهای مایع ستونی شکل (۱-ب) تصویر یک میراگر مایع تنظیم شده ستونی متصل شده به سازه یک درجه آزادی را نشان می‌دهد.

میراگرهای مایع نوع خاصی از میراگرهای جرمی می‌باشند که در آنها به جای جرم یکپارچه از آب



شکل ۱ الف - میراگرهای مایع آمیختگی کم عمق و عمیق ب - تصویر سیستم سازه به همراه میراگر مایع تنظیم شده ستونی

ستون، g ثابت گرانشی و K_h ضریب کاهش باز شدگی سوراخ (Coefficient of headloss of the orifice) می‌باشد. روابط (۱) و (۲) را می‌توان در یک ماتریس معادل به صورت زیر ترکیب نمود:

$$\begin{bmatrix} M_s + m_f & \alpha m_f \\ \alpha m_f & m_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & 0 \\ 0 & c_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & k_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ X_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_e(t) \\ 0 \end{bmatrix}, |X_f| \leq \frac{(1-b)}{2} \quad (3)$$

که در اینجا α نسبت طول (Length ratio) و برابر با b/l ، m_f جرم مایع در لوله و برابر با $\rho A l$ ، c_f میرایی معادل میراگر مایع و برابر با $2m_f \omega_f k_f$ می‌باشد. k_f نسبت میرایی میراگر مایع تنظیم شده، ω_f فرکانس طبیعی میراگر مایع، k_f غلظت ستون مایع و برابر با $2\rho A g$ می‌باشد. $F_e(t)$ نیروی تحریک کننده بیرونی می‌باشد. بدیهی است رابطه (۳) تا زمانی معتبر می‌باشد که مایع حالت یو شکلی خود را حفظ نموده و به خارج از لوله ریخته نشود زیرا در غیر اینصورت کارایی میراگر کاهش می‌یابد. شرایط حالت بهینه برای کاهش پاسخ ساختمان بوسیله رابطه‌های زیر بدست می‌آید [5]. از حل در معادله بالا نسبت‌های میرایی (γ_{opt}) و تنظیم شدگی (γ_{opt}) بهینه بدست می‌آیند.

حرکت مایع در لوله به صورت رابطه زیر معادل سازی شده است [4].

$$\rho A l \ddot{X}_f(t) + \frac{1}{2} \rho A \xi |\dot{X}_f(t)| \dot{X}_f(t) + 2\rho A g X_f(t) = -\rho A b \ddot{X}_s(t) \quad (1)$$

که در اینجا فرکانس طبیعی نوسانها در لوله برابر است با $\omega_f = \sqrt{\frac{2g}{l}}$ مقدار میرایی ایجاد شده توسط میراگر مایع که بصورت غیرخطی می‌باشد از رابطه $c_{nonlinear} = \frac{1}{2} \rho A \xi |\dot{X}_f(t)|$ آن با خطای ۲٪ برابر است با $c = 2(\rho A l) \omega_f k_f$ معادل سازی حرکت برای سیستم اصلی (ساختمان) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$(M_s + \rho A l) \ddot{X}_s(t) + \rho A b \ddot{X}_f(t) + C_s \dot{X}_s(t) + K_s X_s(t) = F_e(t) \quad (2)$$

که در اینجا X_s پاسخ سیستم اصلی (ساختمان)، X_f پاسخ میراگر مایع، M_s برابر جرم سیستم اصلی، K_s سختی سیستم اصلی و C_s میرایی در سیستم اصلی می‌باشد که برابر است با $2M_s \omega_s k_s$ ω_s فرکانس طبیعی سیستم اصلی، ρ چگالی مایع، A مساحت یک قسمت برش داده شده از لوله، l مجموع طول ستون مایع، b طول افقی

شوند. معمولا برای سازه‌های مهم و بزرگ آنالیز توسط رایانه انجام می‌گیرد. در این مطالعه برای تحلیل و آنالیز سازه از برنامه رایانه‌ای تحلیل و طراحی سازه‌ها ETABS 2000 استفاده گردیده است. برای تحلیل سیستم ترکیبی سازه و میراگر باید بتوان میراگرها را مدل‌سازی نمود. این مدل‌سازی با توجه به پارامترهای میرایی و سختی موثر صورت می‌گیرد. در تعیین مشخصات سازه مراحل زیر طی می‌گردد:

- وزن کل سازه: وزن کل سازه شامل تمام بار مرده و وزن تاسیسات ثابت به اضافه درصدی از بار زنده که در بند ۲-۲-۲۸۰۰ آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران مشخص شده است، تعیین می‌شود و از آن جرم سازه مشخص می‌گردد.
- زمان تناوب اصلی نوسان سازه: زمان تناوب اصلی سازه از آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران تعیین می‌گردد. برای سازه‌های بنا شده پیشنهاد می‌شود برای تعیین زمان تناوب اصلی سازه از روشهای عملی استفاده گردد.
- برای تعیین مشخصات و طراحی میراگرها مراحل زیر طی می‌گردد:

- نسبت جرم (μ): نسبت جرم میراگر به سازه را پارامتر نسبت جرم می‌نامند. مقدار مناسب برای نسبت جرم ۱ درصد ($\mu = 0.01$) می‌باشد.

- نسبت طول (α): از نسبت طول افقی به مجموع طول ستون مایع، نسبت طول تعیین می‌گردد. در تعیین نسبت طول باید به موارد معماری نیز توجه گردد. با افزایش مقدار نسبت طول، راندمان میراگرها نیز افزایش می‌یابد. مقدار مناسب برای نسبت طول ($\alpha = 0.9$) می‌باشد.

- نسبت تنظیم‌شدگی (γ_{opt}): معمولا میراگرها را نسبت به فرکانس مود اول سازه تنظیم می‌نمایند. این مقدار برای سازه‌های بلند با نسبت جرم ۱ درصد برابر یک ($\gamma_{opt} = 1$) می‌باشد.

- تعداد میراگرها (N): تعداد میراگرها به عوامل متعددی از جمله فضای در دسترس، شکل و اندازه هر

$$\frac{\partial \sigma_{x_s}^2}{\partial \zeta_f} = 0 ; \quad \frac{\partial \sigma_{x_s}^2}{\partial \gamma} = 0 \quad (۴)$$

مقایسه هزینه‌ای

سیستم‌های میراگر در مقایسه با روشهای متعارف افزایش سختی ساختمان برای مقابله با بارهای افقی، سیستم‌های پربازده و کم هزینه‌ای می‌باشند. میراگر جرمی ساختمان سیتی‌کرب (Citicorp) در سال ۱۹۷۷ میلادی هزینه‌ای در حدود ۱/۵ میلیون دلار داشته است (این هزینه در سال ۲۰۰۱ میلادی در حدود ۵ میلیون دلار می‌باشد). با کاربرد این میراگر در حدود ۴ میلیون دلار در هزینه‌ها صرفه‌جویی شده است. این صرفه‌جویی شامل ۲۸۰۰۰ تن فولاد و بتن می‌باشد که برای افزایش سختی ساختمان برای مقابله با نیروهای افقی باید مصرف می‌گردید [6]. معمولا هزینه استفاده از یک میراگر جرمی متداول در حدود ۱٪ هزینه کلی ساختمان می‌باشد. با یک آنالیز مقدماتی از هزینه می‌توان مشخص نمود که هزینه استفاده و کاربرد یک میراگر مایع ستونی در حدود ۰/۱ هزینه استفاده از یک میراگر جرمی با همان کارایی می‌باشد [7].

تحلیل و طراحی سیستم‌های سازه‌ای به همراه

میراگرهای مایع تنظیم شده ستونی

در این بخش با در نظر گرفتن مباحث نظری به تشریح عملکرد چگونگی تحلیل و طراحی سیستم‌های سازه‌ای به همراه میراگرهای مایع ستونی پرداخته می‌شود. بطور کلی مراحل طراحی شامل موارد زیر می‌باشد [7]:

- ۱- تعیین مشخصات سازه،
 - ۲- تعیین مشخصات و طراحی میراگرها.
- پس از بارگذاری ساختمان و طراحی میراگرها آنالیز سازه اهمیت خود را نشان می‌دهد. برای آنالیز یک سازه ممکن است روش‌های مختلفی به کار گرفته

● پس از تعیین فرکانس هر یک از میراگرها، با روابط زیر طول ستون مایع و مساحت قسمت برش داده شده برای هر دستگاه میراگر تعیین می‌گردد [۷].

$$L_i = 2g / \omega_{fi}^2 + \frac{4g\Delta\omega_s}{(\gamma_{opt}\omega_s)^3} \quad (6)$$

$$A_i = \frac{\mu M_i}{N\rho l_i} \quad (7)$$

● مقادیر جرم و نسبت جرم برای هر یک از میراگرها با روابط زیر تعیین می‌گردد [۷].

$$m_i = \rho A_i L_i / g \quad (8)$$

$$\mu_i = \frac{M}{m_i} \quad (9)$$

● پس از طی مراحل بالا مقدار نسبت استهلاک بهینه برای هر یک از میراگرها طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۷].

$$\zeta_{opt} = \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{\mu_i(1+\mu_i - \alpha^2 \frac{\mu_i}{4})}{(1+\mu_i)(1+\mu_i - \frac{\alpha^2 \mu_i}{2})}} \quad (10)$$

مقدار بازشدگی بهینه (ζ_{opt}). ضریب کاهش بازشدگی بهینه برای هر یک از میراگرها از رابطه زیر تعیین می‌گردد [9].

$$\xi_{opt} = \mu \sqrt{\frac{(1+\mu - \alpha^2 \mu)}{S_0} \left(\frac{\mu + \alpha^2}{1+\mu}\right)^{\frac{3}{2}} g / \omega_d \sqrt{\mu}}$$

با توجه به مقادیر بدست آمده برای ضریب کاهش بازشدگی می‌توان بیان نمود که برای مقادیر بالای شدت بارگذاری، یک مقدار خیلی پایین از ضریب کاهش بازشدگی مورد نیاز می‌باشد. بنابراین در دامنه‌های تحریک شدگی بالا (زلزله) بهتر است که دریچه کاملاً

یک از میراگرها بستگی دارد. با افزایش تعداد میراگرهای چندتایی کارایی آنها لزوماً افزایش نمی‌یابد. برای دستیابی به یک کارایی مناسب معمولاً تعداد میراگرها نباید از ۵ واحد کمتر باشد. تعداد میراگرها همواره باید یک عدد فرد باشد [8]. بر این اساس می‌توان تعداد میراگرها برای سازه‌ها را به شرح جدول (۱) انتخاب نمود [۷].

جدول ۱ انتخاب تعداد میراگرها بر حسب تعداد طبقات [۷]

تعداد طبقات	تعداد میراگرها (N)
تا ۴۰ طبقه	۵ یا ۷
بیشتر از ۴۰ طبقه	۱۱ یا ۲۱

● دامنه تغییرات فرکانس میراگرها (Δf): مقدار مناسب برای دامنه تغییرات فرکانس باید به گونه‌ای تعیین شود که مشخصات هندسی میراگرها در حدود قابل قبولی باشد. این مقدار معمولاً برای سازه‌های بالای ۳۰ طبقه مقدار ۰/۲ هرتز می‌باشد.

● چگالی مایع (ρ): مقدار چگالی مایع برای آب ۱ تن بر مترمکعب می‌باشد.

● تعیین فرکانس هر یک از میراگرها با توجه به نسبت تنظیم شدگی برابر با ۱ می‌باشد. بنابراین فرکانس طبیعی میراگرها با در نظر گرفتن دامنه تغییرات فرکانس بصورت روابط زیر می‌باشد [۷].

$$\omega_{fn} = \omega_s - \frac{\Delta\omega}{N} n \quad ; \quad 1 \leq n \leq \frac{N+1}{2}$$

$$\omega_{fn} = \omega_s \quad ; \quad n = \frac{N+1}{2}$$

$$\omega_{fn} = \omega_s + \frac{\Delta\omega}{N} n \quad ; \quad N \geq n \geq \frac{N+1}{2}$$

(۵)

می توان از هر نرم افزار که توانایی مدلسازی یک میراگر با سختی و میرایی را دارا باشد، استفاده نمود.

در این مطالعه سعی شده که از یک نرم افزار کاربردی استفاده گردد. به همین دلیل از نرم افزار تحلیل و طراحی سازه ها ETABS 2000 استفاده شده است. در این برنامه با استفاده از المان Link و انتخاب گزینه Damper مقادیر جرم، سختی و میرایی موثر وارد می گردند. در این نرم افزار مقادیر نیروهای ایجاد شده در اثر سختی و میرایی موثر به تغییر مکان و سرعت حرکت سازه، در تراز میراگر مایع بستگی دارد. هر یک از میراگرها به دو میراگر تبدیل می شوند. در مجموع ده میراگر در تراز مورد نظر تعریف می گردند. برای تعریف این میراگرها از یک گره مجازی مفصلی در بیرون سازه استفاده شده است. در تراز بنام که محل قرارگیری میراگرها می باشد سیستم ها تعریف می گردند. شماتیکی از نحوه مدلسازی میراگرها در شکل (۲) نشان داده شده است. پس از اتمام مدلسازی همانند سایر سازه ها مراحل تحلیل و آنالیز طی می گردد. پس از تحلیل و آنالیز سازه مراحل طراحی مقاطع اعضا بر اساس یکی از آیین نامه های معتبر انجام می شود.

ارزیابی نمونه های حقیقی

پس از بیان روند طراحی سیستم های سازه ای به همراه میراگرها، حالات مختلفی از سیستم های سازه ای فولادی به همراه میراگرها از جنبه های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت [۷]. سازه مورد مطالعه در این بخش برج اداری ۲۰ طبقه واقع در منطقه با خطر نسبی بالا می باشد. ابعاد سازه (مرکز تا مرکز ستونها) ۲۵×۲۵ متر بوده و ستون گذاری مطابق شکل (۳) می باشد. سازه دارای دو محور تقارن می باشد که در هر جهت ۵ قیاب برابر اصلی دارد. سیستم های باربر مورد استفاده در این

باز بوده و آب بدون مانع در داخل لوله جریان داشته باشد و میرایی توسط لزجی مایع ایجاد گردد. در دامنه های تحریک شدگی پایین (باد)، باز شدگی درجه باید کاهش یابد (که بدین ترتیب مقدار ξ افزایش می یابد). رابطه بین نسبت باز شدگی درجه و ضریب کاهش باز شدگی، برای درجه های استاندارد را می توان در بروشورهای مربوطه پیدا نمود. پارامترهای سختی و میرایی موثر برای هر میراگر از روابط زیر تعیین می گردد [۷].

سختی موثر:

$$k_{ff} = 2\rho A_i g \quad (12)$$

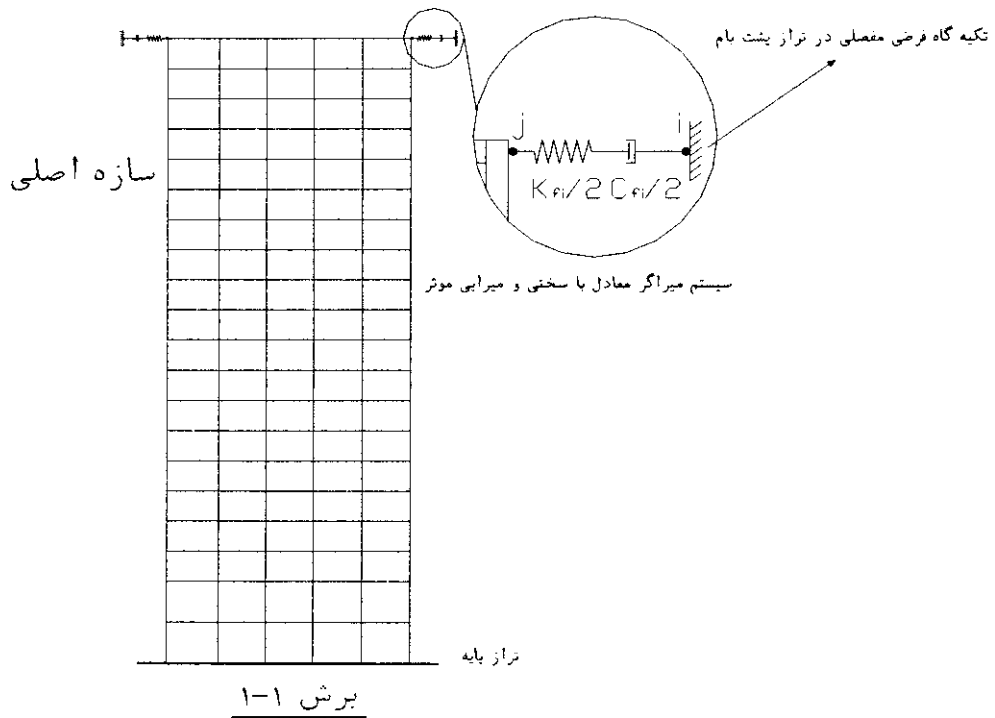
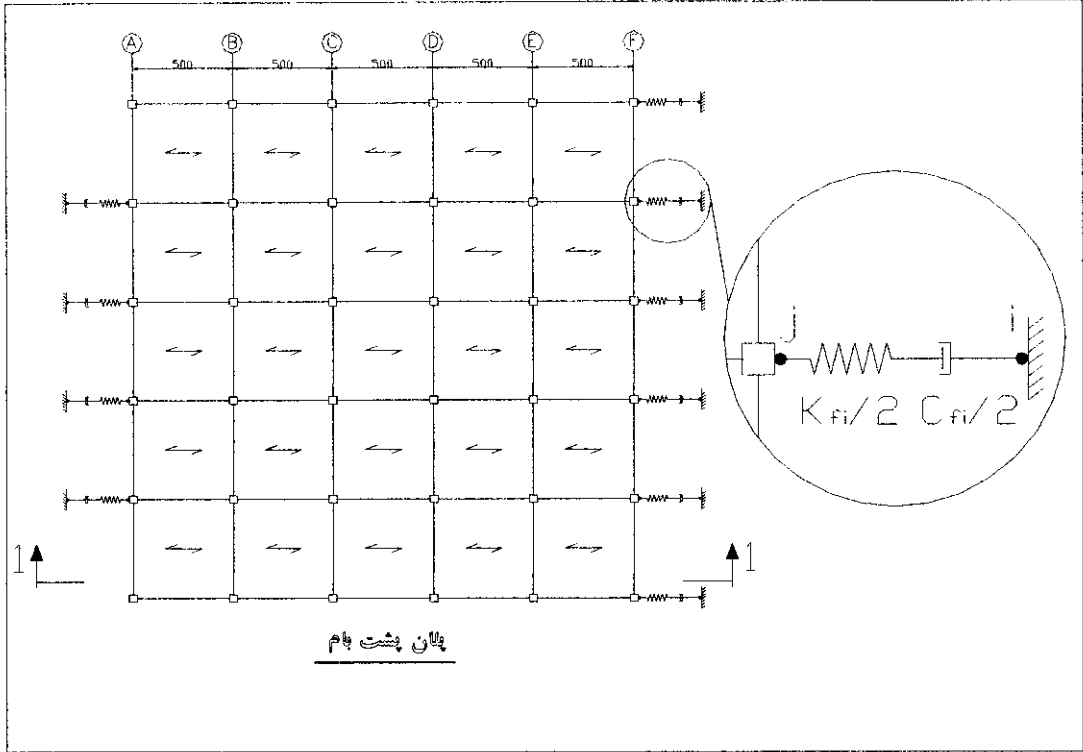
میرایی موثر:

$$C_{ff} = 2m_i U_{mi} \omega_i \zeta_i \quad (13)$$

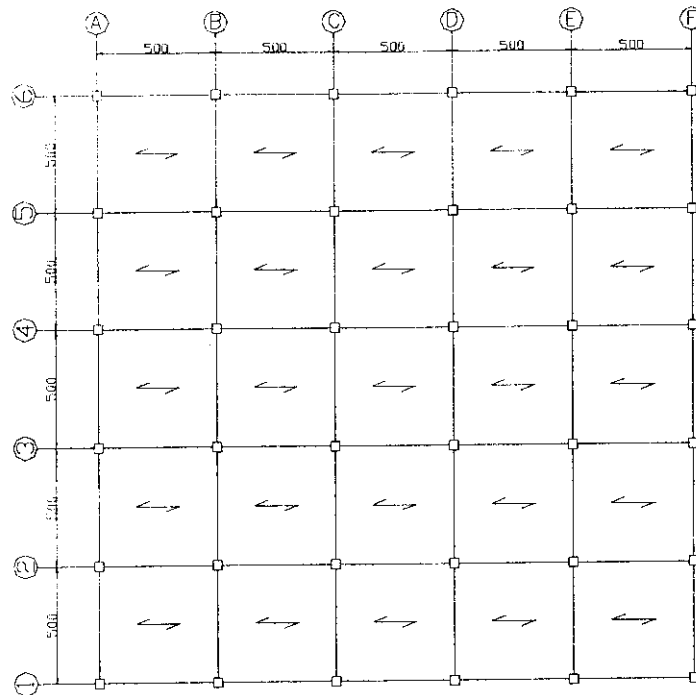
که در اینجا U_{mi} مقدار جرم موثر فعال برای مود اصلی نوسان می باشد.

مدلسازی رایانه ای میراگرهای مایع ستونی

مهمترین پارامترهای میراگرهای مایع ستونی، مقادیر سختی و میرایی موثر می باشند. بنابراین ایده ای که برای مدلسازی این میراگرها به نظر می رسد استفاده از این پارامترها می باشد. مقادیر این پارامترها با توجه به فرکانس سازه، برای میراگرها مشخص می گردد. معمولاً در اغلب طراحی ها از فرکانس مود غالب که معمولاً فرکانس مود اول ارتعاش می باشد، برای تعیین پارامترهای سختی و میرایی استفاده می نمایند. برای در نظر گرفتن تغییرات فرکانس سازه از یک ضریب کاهش استفاده گردیده است. با مطالعات و بررسی های صورت گرفته توسط نگارندگان، این پارامتر برابر با مقدار جرم موثر فعال برای مود اصلی نوسان در نظر گرفته شده و در رابطه میرایی موثر دخالت داده شده است. پس از تعیین این مقادیر برای هر یک از میراگرها، در مجموع



شکل ۲. نمایی از نحوه مدلسازی میراگرها در سازه مورد مطالعه [۷]



شکل ۳ ابعاد سازه و نحوه ستون گذاری سازه مورد مطالعه [۷]

روند ارزیابی به این صورت می باشد که پس از طی مراحل بارگذاری (بر اساس آیین نامه ۵۱۹ ایران) و تحلیل دو بعدی سیستم های سازه ای بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ ایران (استفاده از تحلیل دینامیکی طیفی بر اساس طیف طرح ایران) و طراحی مقاطع اعضا پاسخ این سازه ها با تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای شتاب نگاشتهای نرمال شده تعیین می گردد. بطور کلی الگوریتم این ارزیابی بصورت شکل (۴) می باشد.

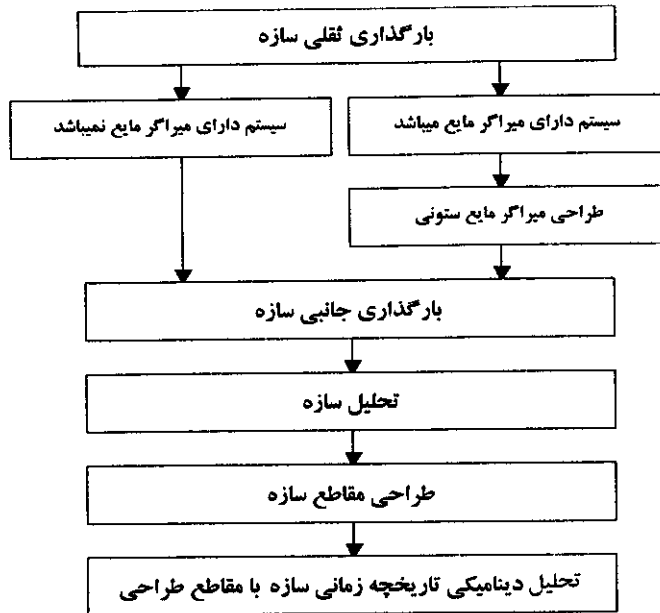
تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی سازه ها

به دلیل متفاوت بودن شدت، مدت و محتوای فرکانسی زلزله های مختلف، اثر آنها در پاسخ دینامیکی سازه ها متفاوت می شود.

سازه به شرح زیر می باشند:

- سیستم قاب خمشی فولادی (کنترل نشده)
- سیستم قاب خمشی فولادی + میراگر مایع ستونی (کنترل شده با میراگر)
- سیستم قاب خمشی فولادی + مهاربندی بیرون محور فولادی (مهاربندی شده)

بارگذاری قائم سازه بر اساس آیین نامه ۵۱۹ ایران انجام شده و بار زلزله نیز از آیین نامه ۲۸۰۰ ایران محاسبه گردیده است. در طراحی اعضای فولادی از آیین نامه سازه های فولادی (AISC - ASD89) ایالات متحده استفاده گردیده است. پوشش سقفها از نوع کامپوزیت می باشد. فولاد با مقاومت جاری شدن 2400 kg/cm^2 و بتن با مقاومت فشاری 210 kg/cm^2 استفاده گردیده است.



شکل ۴ الگوریتم ارزیابی سازه مورد مطالعه [۷]

زلزله ۱۹۷۸ طیس ایران، مولفه طولی (N16W) با حداکثر شتاب $g/۰.۹۳۳$.

نمودار این شتاب نگاشتها در شکل‌های (۵-الف، ب، ج) نشان داده شده است. برای بررسی‌های آماری پاسخها، این رکوردها نرمال می‌گردند. در این مطالعه شتاب‌نگاشتهای ال‌سترو، طیس و ناغان نسبت به $g/۰.۶$ نرمال شدند.

در این ارزیابی تاریخچه‌های زمانی پاسخ تغییرمکان جانبی بام و پارامترهای تغییر مکان نسبی طبقات، پاسخ برش به تغییرمکان حداکثر طبقات و طیف پاسخ طبقات مورد بررسی قرار می‌گیرند.

ارزیابی و آنالیز نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

در این ارزیابی تاریخچه‌های زمانی پاسخ تغییرمکان جانبی بام و پارامترهای تغییر مکان نسبی طبقات، پاسخ برش به تغییرمکان حداکثر طبقات و طیف پاسخ طبقات مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در این میان محتوای فرکانسی زلزله یکی از موارد مهم محسوب می‌شود به طوری که اگر فرکانس حاکم زلزله بر فرکانس طبیعی سازه منطبق گردد بیشترین اثر تخریبی را خواهد داشت. بنابراین زلزله‌ها بایستی طوری انتخاب شوند که دامنه وسیعی از فرکانسها را پوشش دهند. پس از طی مراحل بارگذاری (بر اساس آیین‌نامه ۵۱۹ ایران) و تحلیل سیستم‌های سازه‌ای بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران (استفاده از تحلیل دینامیکی طیفی بر اساس طیف طرح ایران) و طراحی مقاطع اعضا، این سازه‌ها تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قرار می‌گیرند. در تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی این پروژه از سه زلزله مختلف برای ارزیابی پاسخ سازه‌ها استفاده شده است. این زلزله‌ها عبارتند از:

- زلزله ۱۹۴۰ ال‌سترو آمریکا، مولفه شمال-جنوب با حداکثر شتاب $g/۰.۳۱۹$.

- زلزله ۱۹۷۷ ناغان ایران، مولفه طولی با حداکثر شتاب $g/۰.۷۲۳$.

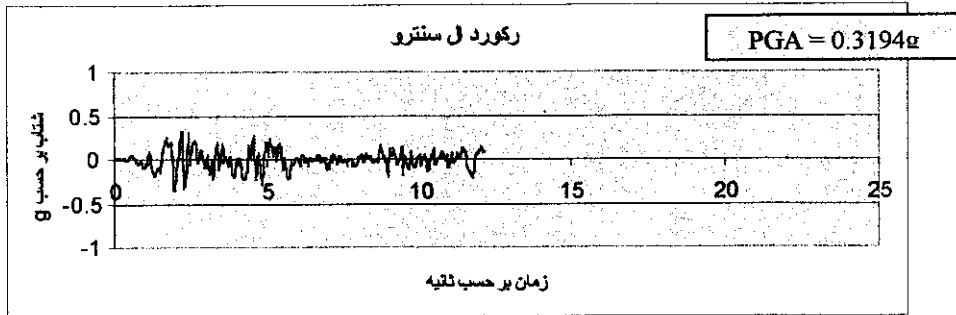
جدول ۲ مشخصات ساختمان و پارامترهای طراحی میراگر برای ساختمان ۲۰ طبقه فولادی

مشخصات داده‌های ورودی (ساختمان و میراگر)						
تعداد طبقات	۲۰	تعداد میراگرها (دستگاه)	۵			
ارتفاع ساختمان (متر)	۶۶	دامنه تغییرات فرکانس میراگر (هرتز)	۰/۱			
وزن ساختمان در بارگذاری زلزله (تن)	۱۰۴۹۵	چگالی مایع میراگر (تن بر متر مکعب)	۱			
نسبت جرم میراگر به ساختمان	۰/۰۱	جرم موثر مود طراحی (درصد)	٪۸۰			
نسبت طول میراگر	۰/۹	زمان تناوب نوسان اصلی ساختمان (ثانیه)	۱/۵۸			
مشخصات پارامترهای خروجی (طراحی)						
شماره میراگر	جرم میراگر (تن)	طول هر میراگر (متر)	قطر هر میراگر (متر)	نسبت استهلاک میراگر (٪)	ضریب میرایی C_{pi}	سختی میراگر k_f
۱	۲/۱۴	۸/۲۰	۱/۸	۰/۰۲	۰/۲۶۶	۵۰/۳۷
۲	۲/۱۴	۹/۰	۱/۷	۰/۰۲	۰/۲۵۷	۴۵/۸۴
۳	۲/۱۴	۷/۵۰	۱/۹	۰/۰۲	۰/۲۷۴	۵۵/۱۶
۴	۲/۱۴	۵/۳۰	۲/۲	۰/۰۲	۰/۳۰۹	۷۷/۱۹
۵	۲/۱۴	۶/۰	۲/۳	۰/۰۲	۰/۳۱۸	۸۳/۴۳

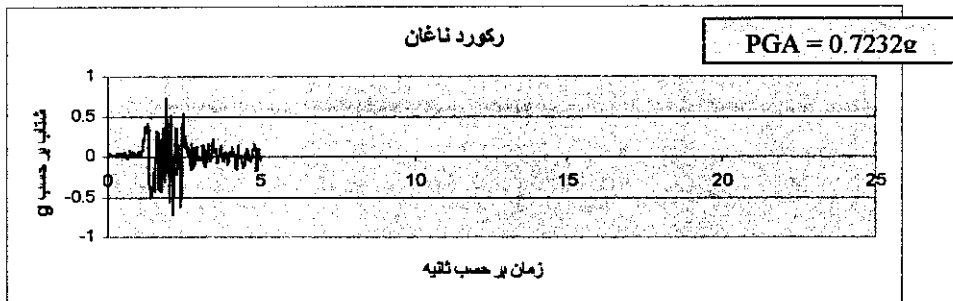
تاریخچه زمانی پاسخ تغییر مکان بام

همانگونه که از شکل‌های (۶-الف، ب، ج) ملاحظه می‌گردد در سیستم قاب خمشی با میراگر، یک کاهش پاسخ ۱۰ تا ۱۵ درصدی در پاسخ تغییر مکان نسبت به سیستم قاب خمشی وجود دارد. این کاهش که به مرور زمان افزایش می‌یابد صحت مدلسازی را نشان می‌دهد. ضمناً با توجه به مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته برای این میراگرها، مقدار کاهش پاسخ تغییر مکان با مقدار بدست آمده از این مطالعات همخوانی دارد [9].

با داشتن تاریخچه زمانی پاسخ تغییر مکان جانبی طبقات، پاسخ لحظه به لحظه سازه نسبت به زلزله‌های مختلف در دسترس می‌باشد. مهمترین مواردی که از نمودار تاریخچه زمانی فوق قابل استنباط می‌باشند کنترل نتایج حاصل از محاسبات رایانه‌ای و همچنین بدست آوردن مقادیر حداکثر تغییر مکان طبقات می‌باشد. در شکل‌های (۶-الف، ب، ج) تاریخچه زمانی پاسخ تغییر مکان جانبی سازه در تراز بام برای زلزله‌های مربوطه نشان داده شده است [۱۰].



الف

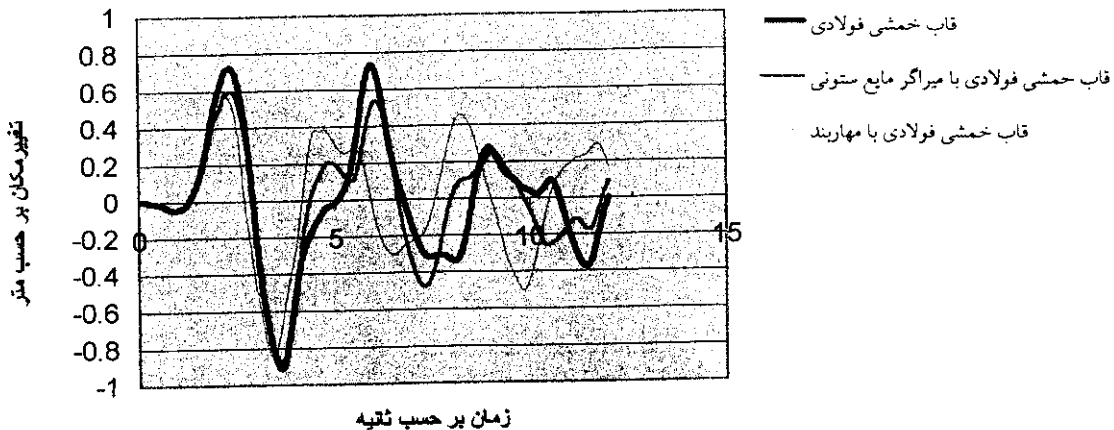


ب

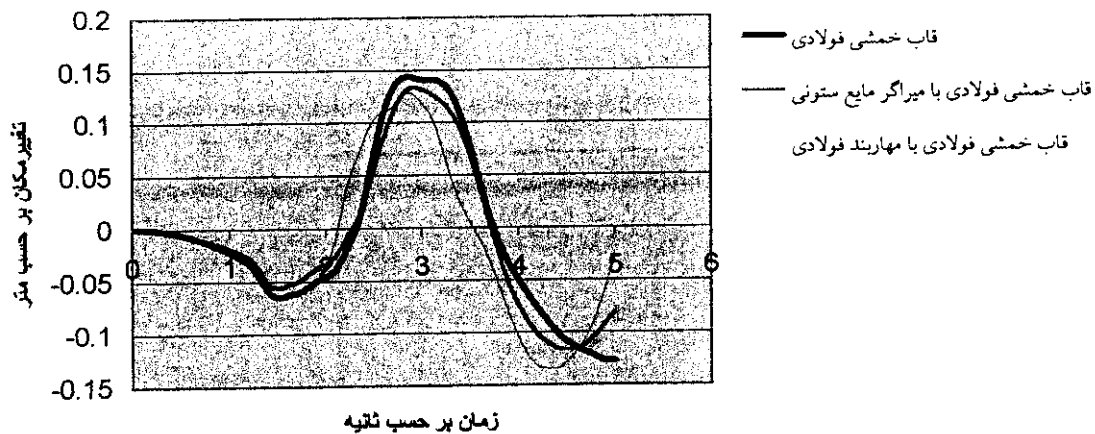


ج

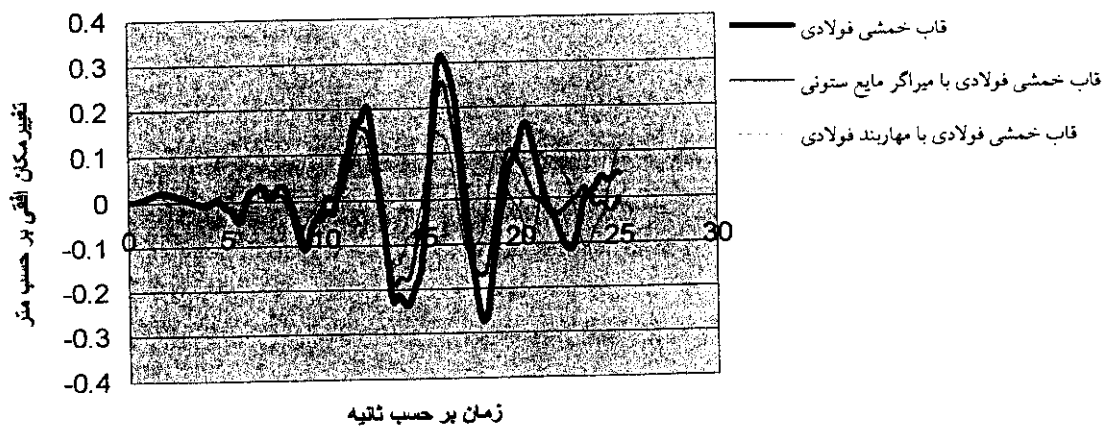
شکل ۵ تاریخچه زمانی زلزله‌های انتخاب شده برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی



شکل ۶- الف تاریخچه زمانی پاسخ تغییر مکان بام سازه بیست طبقه فولادی برای رکورد الاسترو



شکل ۶- ب تاریخچه زمانی پاسخ تغییر مکان بام سازه بیست طبقه فولادی برای رکورد ناغان

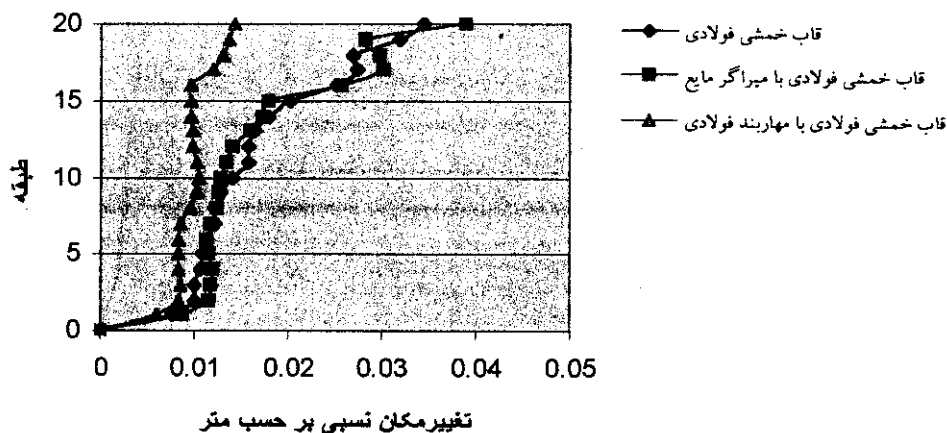


شکل ۶- ج تاریخچه زمانی پاسخ تغییر مکان بام سازه بیست طبقه فولادی برای رکورد طیس

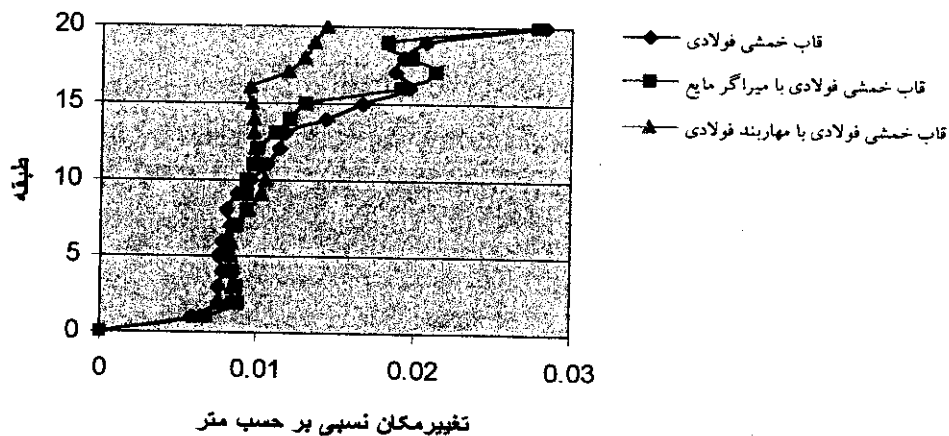
به عنوان مثال آیین نامه زلزله ۲۸۰۰ ایران (ویرایش دوم)، تغییر مکان نسبی هر طبقه و یا بام را در اثر زلزله به $\frac{0.03}{R}$ برابر ارتفاع آن طبقه، محدود می نماید. در شکل های (۷-الف، ب، ج) تغییر مکان نسبی حداکثر طبقات سازه ها برای زلزله های مربوطه نشان داده شده است. برای اغلب موارد این مقادیر تغییر مکان نسبی اندکی بیشتر از مقادیر تعیین شده در آیین نامه ها می باشد [۷].

تغییر مکان نسبی طبقات

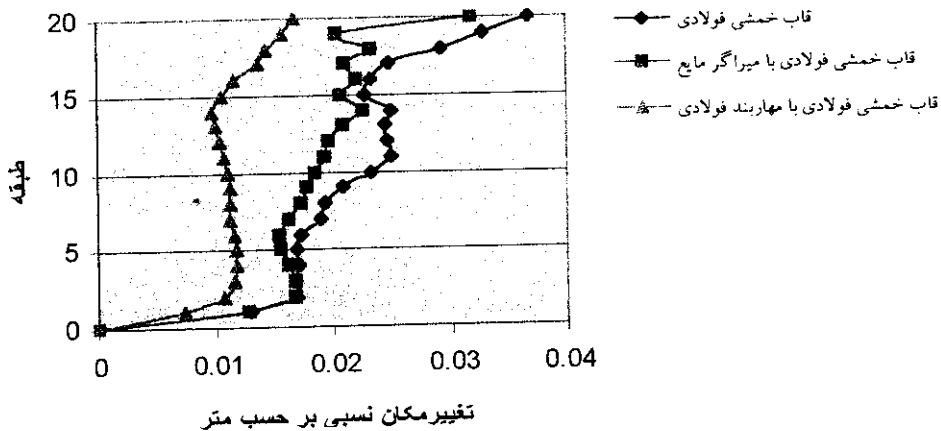
یکی از پارامترهای قابل اندازه گیری برای ارزیابی آسیب پذیری سازه ها حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات می باشد. سالهاست که آیین نامه های زلزله این پارامتر را به عنوان عامل کنترل کننده خسارت سازه ها در نظر می گیرند. به طور کلی محدودیت تغییر مکان نسبی طبقات به عواملی نظیر: خطر زلزله خیزی محل، تعداد طبقات سازه و درجه اهمیت سازه بستگی دارد.



شکل ۷-الف تغییر مکان نسبی حداکثر طبقات سازه بیست طبقه فولادی تحت رکورد ال استرو



شکل ۷-ب تغییر مکان نسبی حداکثر طبقات سازه بیست طبقه فولادی تحت رکورد ناغان



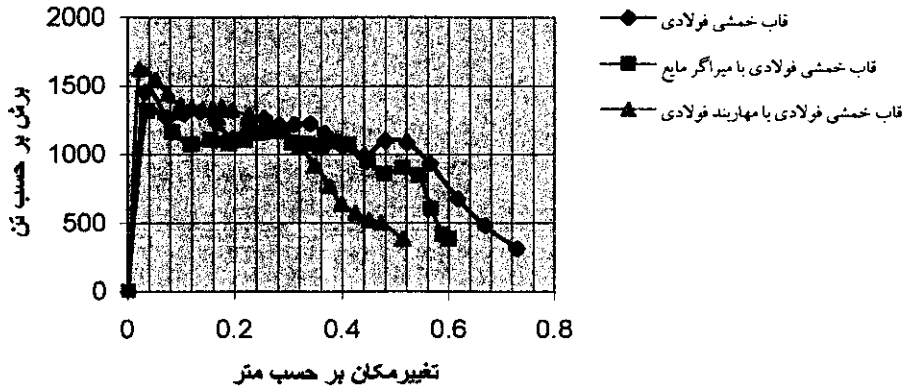
شکل ۴- ج تغییر مکان نسبی حداکثر طبقات سازه بیست طبقه فولادی تحت رکورد طیس

ظرفیت برش پایه

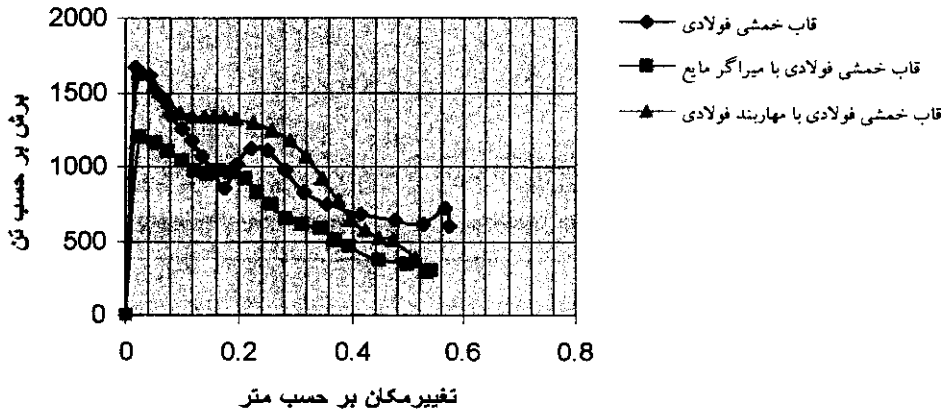
ظرفیت مقاومت برش پایه از جمله پارامترهای مهم دیگری است که می‌تواند مبنای آسیب‌پذیری باشد. نیروهای جانبی زلزله بصورت نیروهای برشی در طبقات مختلف سازه‌ها اثر می‌نماید بطوریکه بیشترین مقدار نیروی برشی در طبقه پایین وارد می‌شود. این نیروها بوسیله سیستم‌های لرزه باربر جانبی جذب می‌شوند.

هر چند ظرفیت مقاومت برشی سازه‌ها در حد جاری شدن بیشتر از نیروهای جانبی حد آیین‌نامه‌های زلزله می‌باشد، اما هنگام یک زلزله بزرگ نیروهای جانبی چندین برابر مقادیر آیین‌نامه بوده و از حد برش جاری شدن پایه تجاوز می‌نمایند. در سازه‌های تردشکن به محض اینکه نیروی زلزله از حد برش جاری شدن تجاوز نماید، انهدام سازه قطعی خواهد بود در صورتی که سازه‌های شکل پذیر یا با میرایی بالا رفتار

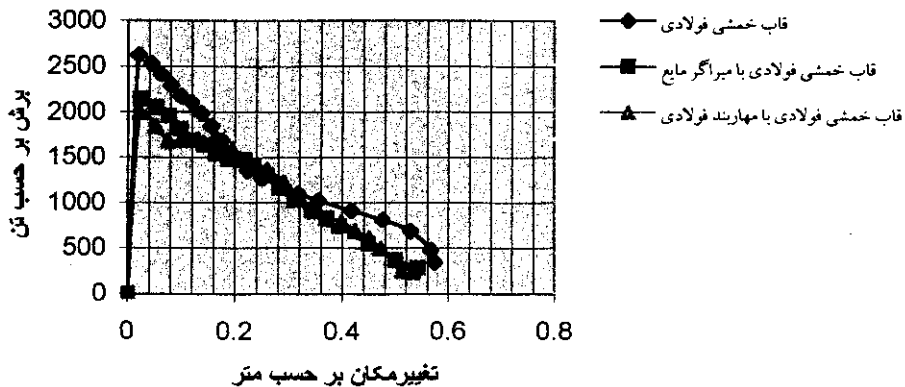
کاملاً متفاوتی خواهند داشت. برای ارزیابی میزان شکل‌پذیری و میرایی سازه مورد مطالعه پاسخ ارتجاعی تحت اثر زلزله‌های مربوطه تعیین می‌گردد. سیستم‌های مهاربندی با جذب انرژی حاصل از بارهای جانبی، پاسخ سازه را کاهش می‌دهند در حالی که سیستم‌های میراگر مایع با استهلاک انرژی این عمل را انجام می‌دهند. در سازه‌های مجهز به میراگر مقدار برش وارد بر طبقات نسبت به حالت کنترل نشده نه تنها افزایش نیافته بلکه کمتر نیز گردیده است. بدین ترتیب با کاهش برش وارد بر طبقات سطح مقطع مورد نیاز برای اعضا سازه‌ای نسبت به حالت مهاربندی کاهش می‌یابد و صرفه اقتصادی این سیستم‌ها نمایان می‌گردد. از این امر می‌توان در ارزیابی آسیب‌پذیری و مقاوم‌سازی سازه‌ها بهره گرفت. در شکل‌های (۸-الف، ب، ج) پاسخ برش به تغییر مکان حداکثر طبقات سازه‌ها برای زلزله‌های مربوطه نشان داده شده است [۷].



شکل ۸ - الف پاسخ برش به تغییر مکان حداکثر طبقات سازه بیست طبقه فولادی تحت رکورد الاسترو



شکل ۸ - ب پاسخ برش به تغییر مکان حداکثر طبقات سازه بیست طبقه فولادی تحت رکورد ناغان



شکل ۸ - ج پاسخ برش به تغییر مکان حداکثر طبقات سازه بیست طبقه فولادی تحت رکورد طیس

قرار می‌گیرد. در شکل‌ها (۹-ب، ج) پاسخ شکل‌های زیر نمودارهای طیف پاسخ شتاب برای طبقه آخر سازه‌ها با سیستم‌های مختلف سازه‌ای برای شتاب نگاشت‌های مختلف نشان داده شده است [۷].

در شکل‌های (۹-الف، ب، ج) به خوبی مقدار کاهش ۵۰ تا ۶۰ درصدی طیف پاسخ شتاب نسبت به حالت مهاربندی مشخص می‌باشد. بنابراین مهمترین مزیت این سیستم‌ها در خصوص کنترل شتاب سازه نمایان می‌گردد.

در شکل‌های (۹-الف، ب، ج) به خوبی مقدار کاهش ۵۰ تا ۶۰ درصدی طیف پاسخ شتاب نسبت به حالت مهاربندی مشخص می‌باشد. بنابراین مهمترین مزیت این سیستم‌ها در خصوص کنترل شتاب سازه نمایان می‌گردد.

نتیجه‌گیری

از مطالعات و بررسی‌های بعمل آمده در این تحقیق می‌توان نتایج زیر را برشمرد:

- کاهش پاسخ تغییرمکان سازه در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد و تایید صحت مدلسازی با توجه به همخوانی نتایج با موارد آزمایشگاهی ارائه شده .
- کاهش پاسخ شتاب سازه توأم با کاهش تغییرمکان بر خلاف سیستم‌های مهاربندی .
- عدم افزایش انرژی جذبی در سازه بر خلاف سیستم‌های مهاربندی و کاهش فولاد مصرفی .
- کنترل شتاب شبه طیفی وارد بر اجزا غیرسازه‌ای و کاهش ۵۰ تا ۶۰ درصدی آن .
- هزینه پایین استفاده از این سیستم‌ها نسبت به سیستم مهاربندی .
- سهولت استفاده و کاربرد پذیری این سیستم‌ها .
- عدم نیاز به تعویض در هنگام بروز لرزه بر خلاف برخی از سیستم‌های جاذب همانند پایه ایزوله .
- افزایش کارایی میراگرها با افزایش ارتفاع ساختمان .
- استفاده از این سیستم‌ها برای آبرسانی و آتش‌نشانی

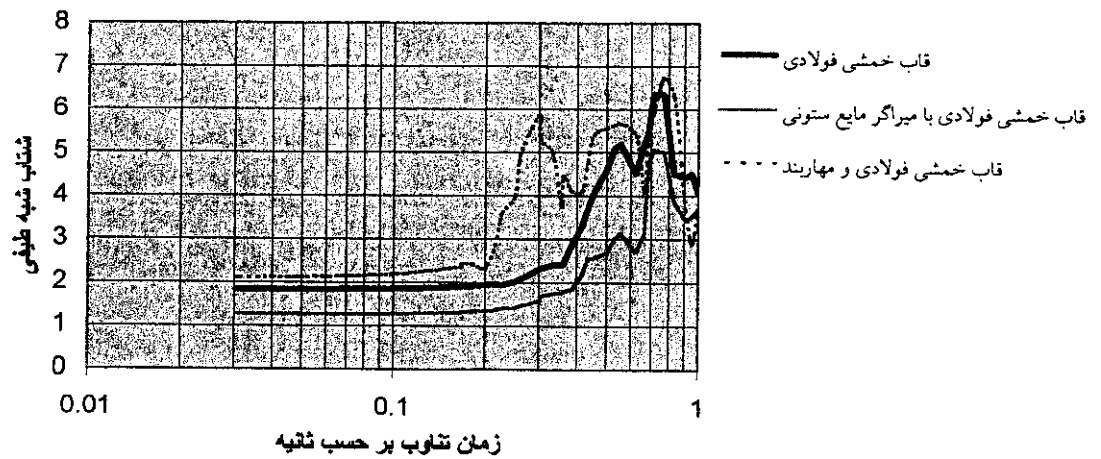
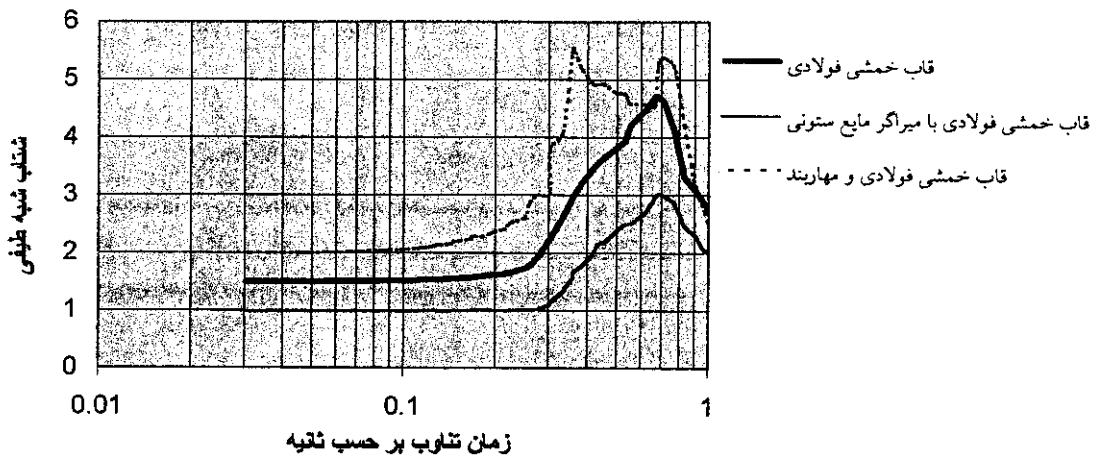
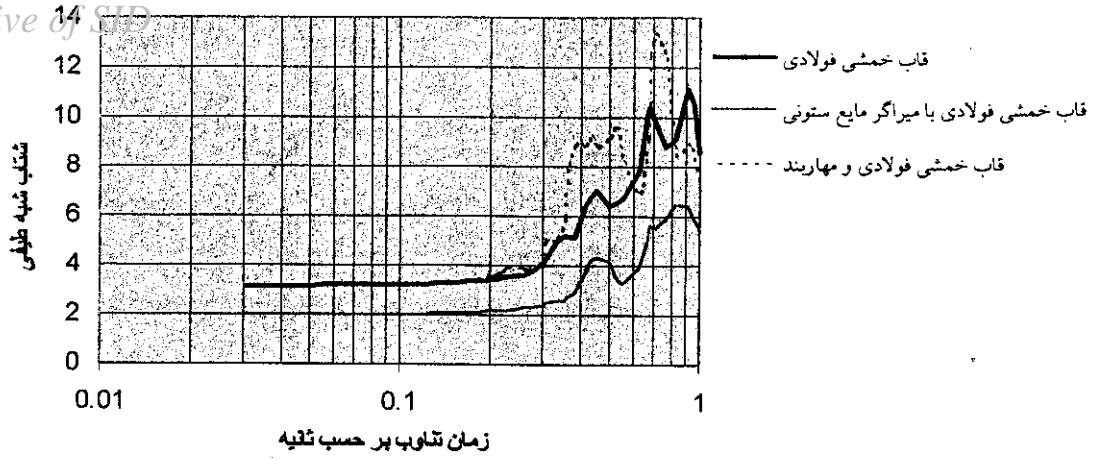
بررسی سیستم‌ها و اجزای غیرسازه‌ای

تا قبل از زمین‌لرزه سال ۱۹۶۴ میلادی آلاسکا، کمتر توجهی به اجزای غیر سازه‌ای و محتوای سازه‌ها مبذول می‌شد و تقریباً کلیه تلاشهای طراحی بر روی تخفیف خسارت به سیستم مقاوم جانبی معطوف بود، در حالی که حفظ سیستم‌های مکانیکی، برقی، تاسیسات و معماری در برابر زلزله به پیمانکاران تاسیساتی و سازندگان سپرده می‌شد...

سیستم‌های غیرسازه‌ای شامل عناصر معماری و تاسیسات مکانیکی و برقی می‌باشند. این عناصر همچنین شامل اجزایی مانند دیوارهای غیرباربر، پانلهای خارجی، سقفهای معلق، تجهیزات تهویه مطبوع، آسانسورها، مجموعه کلیدها و اجزای الحاقی برای روشنایی می‌باشند. در اکثر موارد، ارزش اقتصادی صدمات وارده بر عناصر غیرسازه‌ای بیش از خسارت وارده بر اجزای سازه‌ای می‌باشد.

برای ارزیابی نیروهای وارد بر این اجزا روشهای مختلفی موجود می‌باشد. یکی از این روشها استفاده از طیف پاسخ کف (Response Spectrum) می‌باشد. طیف پاسخ زمین معمولاً برای تخمین واکنش زلزله‌ای یک سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین ترتیب طیف پاسخ کف می‌تواند برای ارزیابی نیروهای زلزله اعمال شده بر روی تجهیزات حساس نصب شده در یک سازه استفاده شود. روشن است در حرکت زمین مورد نظر، حرکتی که بوسیله طبقات مختلف یک سازه تجربه می‌شود، طیف پاسخ مشابه‌ای نخواهد بود.

روشهای مرسوم ایجاد طیف پاسخ طبقه بستگی به تهیه تاریخچه زمانی پاسخ در یک تراز مورد نظر در یک سازه دارد. این امر نیاز به یک تحلیل تاریخچه زمانی بر اساس یک نگاشت حقیقی زمین‌لرزه (یا یک نگاشت مصنوعی) دارد که باید برای بدست آوردن نتایج مربوط به زمان پاسخ تراز کف اجرا گردد. تاریخچه زمانی برای ایجاد طیف پاسخ مورد استفاده



1. Kareem, A., and Yalla, S. K., "Liquid Dampers: Recent Developments and Applications", submitted to the monograph on Structural Control, (1997).
2. Tamura, Y., Fujii, K., Ohtsuki, T., Wakahara, T., and Kohsaka, R., "Effectiveness of Tuned Liquid Dampers under Wind Excitation," *Engineering Structures*, 17 (9), 609-621, (1995).
3. Shimizu, K., and Teramura, A., "Development of vibration control system using U-shaped tank", *Proceedings of the 1st International Workshop and Seminar on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas*, Timisoara, Romania, 7.25-7.34, (1994).
4. Sakai, F. et al., " Tuned Liquid Column Damper - New Type Device for Suppression of Building Vibrations", *Proc. Int. Conf. on High Rise Buildings*, China, March 25-27, (1989).
5. Yalla, S.K., and Kareem, A., "Optimum Absorber Parameters for Tuned Liquid Column Dampers", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 125(8), 906-915, (2000)
6. ENR magazine, "Tuned mass dampers steady sway of skyscrapers in Wind", (1977).
۷. درخشانی، ز، ک. پایان نامه کارشناسی ارشد "میراگرهای مایع برای کاهش پاسخ ساختمان"، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، (۱۳۸۱).
8. Kareem, A. and Kline, S., "Performance of Multiple Mass Dampers under Random loading", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 121(2), 348-361, (1995).
9. Yalla, S.K., and Kareem, A., "Semi-active Tuned Liquid Column Dampers for mitigation of wind induced vibrations: Experiments", *submitted to ASCE Journal of Structural Engineering, special issue on Semi-active Control.*, (2001e).