

کنترل ارتعاشات لرزه‌ای قابهای فولادی متعارف به کمک میراگر جرمی

سید مهدی زهرائی و سید فرید هاشمی

چکیده: در دو دهه اخیر میراگر جرمی متوازن به عنوان یکی از روشهای کنترل غیر فعال بر روی ساختمانهای بلند در برابر زلزله بکار رفته است. در این مقاله اثر سیستم میراگر جرمی بر روی رفتار لرزه‌ای ساختمانهای با اسکلت قاب خمشی با در نظر گرفتن صلبیت کف و نیز بر روی ساختمانهای متکی بر اسکلت با اتصالات مفصلی به همراه بادبندهای ضربدری در وضعیتهای مختلف بررسی می‌گردد. در ادامه تاثیر میراگر در ارتفاعهای میانی سازه با قرار گرفتن آن روی بام مقایسه می‌شود و نیز یک قالب کلی برای محل قرار دادن میراگر در ارتفاع ارائه شده است. همچنین از سیستمهای با دو میراگر جرمی در دو جهت افقی عمود بر هم برای کاهش ارتعاشات در هنگام اعمال زلزله در دو جهت عمودی استفاده شده و مقایسه‌ای در مورد تفاوت رفتار میراگر تکی در یک راستا با دو میراگر در دو راستای عمود بر هم انجام می‌گردد. براساس نتایج بدست آمده، اصولاً میراگر جرمی بعد از وقوع اولین ماکزیمم بار ورودی (یا شتاب) فعال شده و توان فرونشاندن حداکثرهای بعدی را داراست. همچنین نسبت جابجایی حداکثر سیستم با میراگر به حالت بدون میراگر تا حد زیادی به شکل رکورد زلزله ورودی وابسته است.

واژه‌های کلیدی: میراگر جرمی متوازن، قابهای فولادی مهاربندی، قابهای فولادی خمشی، کنترل غیرفعال، ارتعاشات لرزه‌ای

۱. مقدمه

با توجه به پیشرفتهای اخیر در زمینه کنترل سازه‌ها در برابر زلزله و باد، نیاز به بررسی سیستمهای کنترل غیرفعال و یافتن نقاط قوت و ضعف این سیستمها از جمله سیستم میراگر جرمی متوازن در کشورهای زلزله خیز بیشتر احساس می‌شود [۱]. در سیستم میراگر جرمی متوازن بعنوان یک سیستم کنترل غیرفعال سازه‌ها مانند بقیه روشهای کنترلی هدف کاهش نیاز به استهلاک انرژی در اعضای باربر سازه در برابر بارهای جانبی اعمال شده می‌باشد. این کاهش مقدار نیاز توسط حرکت جرمی سنگین بر روی اعضای باربر سازه‌ای انجام می‌شود. اساس رفتار میراگر جرمی متوازن بر روی سازه‌ها ریشه در عملکرد جذب کننده‌های ارتعاشات دینامیکی داشته که از سال ۱۹۰۹ توسط Frahm مورد مطالعه قرار گرفته است. در سال ۱۹۵۶ Den Hartog [۲] تصحیحات و مباحثی تکمیلی بر کار Frahm انجام داد و بعداً سیستمهای جذب کننده‌های دینامیکی میرا و نامیرا

این مقاله در تاریخ ۸۳/۸/۶ دریافت و در تاریخ ۸۶/۱۱/۱۳ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر سید مهدی زهرائی، استادیار قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساختها، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، mzahrai@ut.ac.ir
سید فرید هاشمی، مهندس سازه شرکت کانل واگنر، استرالیا، hashemif@conwag.com

را با وجود میرایی سیستم اصلی مورد بررسی قرار داد. در سال ۱۹۶۰ Snowdon برای افزایش بازده، رفتار جذب کننده صلب را در کاهش پاسخ سیستم اصلی مورد بررسی قرار داد. نتیجه مطالعه اخیر نشان داد که جذب کننده دینامیکی با استفاده از مواد با سختی متناسب با فرکانس و ضریب میرایی ثابت می‌تواند بطور قابل ملاحظه ای ارتعاش تشدید شده سیستم اصلی را کاهش دهد. در سال ۱۹۷۷ آقایان Jennige و Frohrib بصورت عددی اثر یک سیستم جذب کننده انتقالی - چرخشی را در کاهش مقادیر مودال خمشی و پیچشی مربوط به یک ساختمان مورد بررسی قرار دادند [۳]. بیشتر مطالعات اولیه به استفاده از جذب کننده‌های دینامیکی در سیستمهای مکانیکی که فقط یک فرکانس موثر برابر با فرکانس اساسی ماشین را دارا هستند پرداخته شده‌اند. سازه‌های ساختمانی با توجه به این که متأثر از اعمال بارهای محیطی و طبیعی هستند لذا دارای مؤلفه‌های متفاوت فرکانسی می‌باشند. موارد زیادی مطالعات و بررسی روی رفتار میراگر جرمی متوازن و نحوه عملکرد آن بر روی ساختمانها به منظور کنترل ارتعاشات ناشی از بارهای جانبی در سی سال اخیر انجام شده که برخی از آنها در این مقاله مرور می‌شود و تحقیقات جدید همچنان در حال انجام می‌باشد [۴].

در ایران نیز خوشبختانه در پنج سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این میان Zahrai و Ghannadi-Asl کاربرد میراگر جرمی

۱-۲. سیستم سازه‌ای نامیرا

Den Hartog برای محاسبه میزان کارایی و بازده میراگر جرمی در حالت سیستم سازه‌ای نامیرا تحت تحریک سینوسی $g(t)=0$ و $f(t)=P_0 \sin \omega t$ با فرکانس ارتعاشی ω روش حلی ارائه کرده است که در آن اثر جابجایی دینامیکی یک میراگر جرمی نسبت به جابجایی استاتیکی تولید شده توسط نیروی حداکثر استاتیکی بر سازه برآورد می‌شود.

با توجه به اینکه برای یک تحریک سینوسی با فرکانس ارتعاشی ω جابجایی استاتیکی برابر $y_{st}=P_0/K$ می‌باشد، مقدار ضریب بزرگنمایی برای یک سیستم سازه‌ای نامیرا بشکل زیر می‌باشد [۲۱]:

$$R = \frac{y_{\max}}{y_{st}} = \frac{1}{\sqrt{[(\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \alpha^2 \beta^2 \mu]^2 + (2\xi_\alpha \alpha \beta)^2 (1 - \beta^2 - \beta^2 \mu)^2}} \quad (4)$$

که شرح پارامترهای بکار رفته به این قرار است: $\beta = \omega/\omega_s$ نسبت فرکانس بار خارجی به فرکانس طبیعی، $\alpha = \omega_d/\omega_s$ نسبت فرکانسهای طبیعی، $\omega_d^2 = k/m$ مجذور فرکانس طبیعی میراگر جرمی، $\omega_s^2 = K/M$ مجذور فرکانس طبیعی سیستم سازه‌ای، $\mu = m/M$ نسبت میرایی میراگر جرمی، $\xi_a = c/c_c = c/2m\omega_a$ نسبت جرمی.

ضریب بزرگنمایی تابعی از چهار پارامتر اصلی μ ، α ، β و ξ_a می‌باشد. در شکل ۲ [۱] با فرض $\mu = 0.05$ و $\alpha = 1$ برای ξ_a های مختلف $(\xi_a = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0)$ ضریب بزرگنمایی در برابر β ترسیم شده است. با افزایش میرایی در میراگر جرمی روی سازه بدون میرایی، دامنه پاسخ سازه در دو نقطه نامحدود بوده و رزونانس بوجود می‌آید. هنگامیکه میرایی میراگر جرمی بسمت بینهایت میل می‌کند دو جرم بصورت مجازی بر هم منطبق شده و حکم سیستم یک درجه آزادی با جرم $1.05M$ را پیدا می‌کند. بنابراین دامنه در فرکانس رزونانس بینهایت می‌شود. بنابراین در جایی بین این دو بینهایت باید مقداری برای ξ_a وجود داشته باشد که اوج نمودارهای مربوطه حداقل گردند و لذا نقطه بهینه شکل می‌گیرد.

در نمودارهای مختلف رسم شده همانطور که دیده می‌شود دو نقطه P و Q در نمودارها ثابت بوده و تمام نمودارها از این دو نقطه می‌گذرند. لذا جای این دو نقطه مستقل از نسبت میرایی ξ_a بوده و دامنه اوج حداقل را می‌توان با یک انتخاب درست α برای تصحیح این دو نقطه ثابت و رسیدن به ارتفاعهای برابر بدست آورد. فرکانس بهینه α به اینصورت بدست می‌آید:

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (5)$$

$$R = \sqrt{1 + \frac{2}{\mu}} \quad (6)$$

برای کاهش ارتعاشات لرزه‌ای ساختمانهای میان مرتبه را بررسی نموده و نشان دادند که مشخصات زلزله بر راندمان میراگر جرمی موثر است [۵]. Zahrai و همکاران نیز روی معیاری برای پایداری تاثیر عملکرد بهینه میراگرهای جرمی چندگانه کار کردند [۶]. بیشتر مطالعات برای کاهش اثرات باد بر انواع سازه‌ها انجام گرفته است [۷] تا [۹] و میزان کارایی این میراگرها در کاهش ارتعاشات لرزه‌ای کمتر بررسی شده است. این مقاله نیز ضمن بررسی مختصر تئوری و عملکرد این میراگرها روی رفتار ترکیبی این میراگرها در ساختمانهای ۵ تا ۲۰ طبقه با سیستمهای مختلف سازه‌ای متمرکز می‌شود.

۲. بررسی تئوری حاکم

بعنوان اصل پذیرفته شده برای میراگر جرمی، این وسیله متشکل از جرمی است که به یک سازه متصل است و این جرم در همان فرکانس سازه و با یک تاخیر فاز ارتعاش می‌کند. جرم مذکور اغلب از طریق یک فنر به سازه متصل می‌شود که از طریق حرکت نسبی بین جرم و سازه انرژی نیروی وارده به سیستم مستهلک می‌شود (شکل ۱). معادلات حاکم بر سیستم کلی به این قرار است:

$$M\ddot{y}_1(t) + C\dot{y}_1(t) + Ky_1(t) = cz(t) + kz(t) + f(t) \quad (1)$$

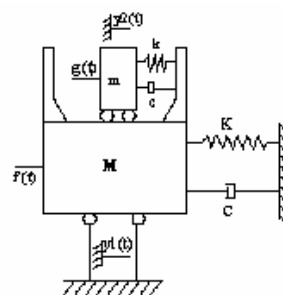
$$m\ddot{z}(t) + cz(t) + kz(t) = -m\ddot{y}_1(t) + g(t) \quad (2)$$

که در اینجا $y_1(t)$ جابجایی سیستم سازه‌ای نسبت به پایه ثابت و $z(t)$ جابجایی نسبی جرم اضافه شده نسبت به سازه، c و k ضریب میرایی و سختی مربوط به جرم اضافه شده و C و K مقادیر متناظر برای سیستم اصلی می‌باشد. $f(t)$ نیروی خارجی بر روی سازه بوده و $g(t)$ در هنگام تحریک توسط باد برابر صفر و در هنگام تحریک زلزله برابر $\mu f(t)$ که μ نسبت جرمی بوده و برابر m/M می‌باشد [۱].

با ترکیب معادلات ۱ و ۲ معادله زیر نتیجه می‌شود:

$$(M + m)\ddot{y}_1(t) + C\dot{y}_1(t) + Ky_1(t) = f(t) + g(t) - m\ddot{z}(t) \quad (3)$$

همانطور که در رابطه ۳ دیده می‌شود، اثر اضافه کردن جرم کوچک m بجز کاهش مختصر در فرکانس طبیعی سیستم ترکیبی و افزایش کم در نیروی خارجی که از $f(t)$ به $f(t) + g(t)$ می‌رسد، اضافه شدن جمله $-m\ddot{z}(t)$ است که باعث تامین نیروی برگرداننده و متعادل کننده میراگر جرمی و در نتیجه موجب ایجاد میرایی معادل است [۱] و [۸].



شکل ۱. سیستم ترکیبی سازه و سیستم میراگر جرمی [۱]

ادامه جدول شماره ۱

μ	ξ_s	R_{opt}	α_{opt}	ξ_{opt}
۰/۲	۰	۲/۸۶۵	۰/۷۹۰۶	۰/۲۰۹۷
	۰/۰۱	۲/۶۸	۰/۷۸۱۵	۰/۲۰۹۸
	۰/۰۲	۲/۵۱۶	۰/۷۷۲۱	۰/۲۰۹۹
	۰/۰۵	۲/۱۱۳	۰/۷۴۲۱	۰/۲۱۰۳
	۰/۱	۱/۶۴۹	۰/۶۸۶۲	۰/۲۱۱۲

۲-۲. سیستم سازه‌ای میرا

از معادله ۴ می‌توان R را نیز در حالت سیستم سازه ای با میرایی محاسبه کرد. اما در سیستم همراه با میرایی دیگر نقاط ثابت P و Q وجود ندارند و لذا می‌بایست از روشهای عددی برای یافتن پارامترهای میراگر بهینه استفاده کرد. بعنوان یک روش برای یافتن مقادیر بهینه برای میراگر می‌توان مقدار بزرگتر دو نقطه اوج در نمودار شکل ۲ را با استفاده از روشهای عددی حداقل کرد. در سال ۱۹۷۸ Ikedo و Loi مقادیر بهینه α و ξ_a را از روابط تجربی محاسبه کردند [۱ و ۴]. Warburton در سال ۱۹۸۲ برای سیستم سازه ای با میرایی کم ($\xi_s < 1\%$)، پارامترهای میراگر بهینه متصل به سازه یک درجه آزادی را به ازای مقادیر مختلف μ و ξ_a ارائه کرده است (جدول ۱) [۱]. باید توجه شود که بازای هر مقدار μ پاسخ بهینه با افزایش ξ_s کاهش می‌یابد.

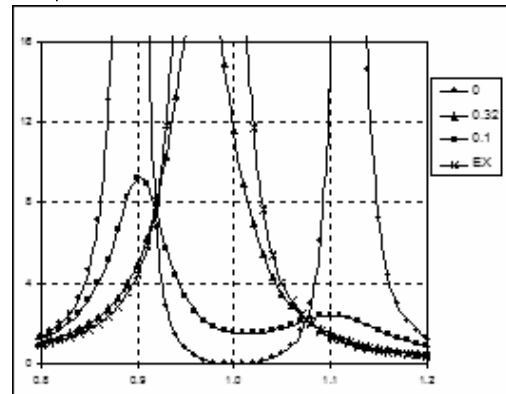
۲-۳. سیستم سازه‌ای چند درجه آزادی

هنگامیکه مد اول سازه چند درجه آزادی مود غالب سازه باشد، می‌توان براحته با استفاده از میراگر جرمی پاسخ سازه در برابر ارتعاشات ناشی از زلزله را کاهش داد. مطالعات Wirsching و Campbell در سال ۱۹۷۴ نشان داده است که میراگر بهینه طراحی شده برای پاسخ مد اول در ساختمان یک طبقه به خوبی برای ساختمان پنج طبقه و نیز ده طبقه عمل می‌کند. در بررسیهای انجام شده [۸] معلوم گردیده هنگامیکه مدهای غالب ارتعاشی ایجاد شده کنترل می‌شوند، مدهای بالاتر بی تاثیر می‌باشند. نتایج نشان داده است که نسبت مجذور میانگین مربعات جابجایی طبقه بالای ساختمان با میراگر و بدون میراگر، با افزایش طبقات ساختمان تغییر کمی می‌کند. همینطور سختی میراگر بهینه هنگامیکه تعداد طبقات زیاد می‌شود به میرایی سازه و نسبت جرمی وابستگی کمتری پیدا می‌کند و میرایی میراگر بهینه به میرایی سازه ای حتی برای ساختمان یک طبقه (سازه یک درجه آزادی) غیر وابسته است.

در مطالعات مذکور نسبت جرمی بصورت نسبت جرم میراگر و جرم طبقات مربوط به یک ساختمان یکنواخت تعریف شده است. چنانچه این نسبت جرمی بصورت نسبت جرمی مودال تعریف شود، نتایج بالا روشنتر خواهد شد. بدین منظور که تمام پارامترهای مورد بحث قبلی بصورت عملی وابسته به تعداد طبقات نیستند. این موضوع تاثیر

در سال ۱۹۴۶ Brock با گرفتن میانگین از مقادیر ξ که باعث حداکثر کردن نمودار R برحسب β در نقاط P و Q می‌شوند، رابطه تقریبی زیر را برای محاسبه مقدار بهینه ξ در سیستم سازه‌ای بدون میرایی ارائه داده است [۱]:

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (7)$$

شکل ۲. ضریب بزرگنمایی بصورت تابعی از β (۱) ($\alpha = 1$ و $\mu = 0.05$)

از معادله ۶ براحته می‌توان فهمید که افزایش در جرم میراگر همیشه ضریب بزرگنمایی حداکثر برای میراگر جرمی با طراحی حالت بهینه را کاهش می‌دهد. مقادیر این ضرایب بزرگنمایی حداکثر و پارامترهای میراگر بر حسب تحریکات در حالات مختلف و همچنین مقادیر پاسخ بر حسب نیاز در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. پارامترهای میراگر بهینه متصل به سیستم یک

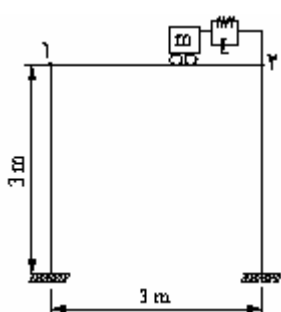
درجه آزادی

μ	ξ_s	R_{opt}	α_{opt}	ξ_{opt}
۰/۰۱	۰	۱۰/۱۳۸	۰/۹۸۷۶	۰/۰۴۹۸۱
	۰/۰۱	۷/۷۴۳	۰/۹۸۵	۰/۰۴۹۸۱
	۰/۰۲	۶/۲۰۵	۰/۹۸۱۹	۰/۰۴۹۸۱
	۰/۰۵	۳/۷۹۸	۰/۹۷۰۴	۰/۰۴۹۸۲
	۰/۱	۲/۲۴۹	۰/۹۴۳۶	۰/۰۴۹۸۲
۰/۰۳	۰	۶/۰۵۸	۰/۹۶۳۶	۰/۰۸۵۶۶
	۰/۰۱	۵/۱۱	۰/۹۵۹۲	۰/۰۸۵۶۶
	۰/۰۲	۴/۴۲۴	۰/۹۵۴۵	۰/۰۸۵۶۶
	۰/۰۵	۳/۱۰۹	۰/۹۳۸	۰/۰۸۵۶۷
	۰/۱	۲/۰۳۶	۰/۹۰۳۲	۰/۰۸۵۶۹
۰/۱	۰	۳/۶۰۲	۰/۸۸۶۱	۰/۱۵۲۷
	۰/۰۱	۳/۲۸۵	۰/۸۷۸۹	۰/۱۵۲۷
	۰/۰۲	۳/۰۱۴	۰/۸۷۱۴	۰/۱۵۲۸
	۰/۰۵	۲/۳۹۹	۰/۸۴۶۸	۰/۱۵۲۹
	۰/۱	۱/۷۶۵	۰/۷۹۹۱	۰/۱۵۳۱

جرمی متوازن و میرایی صفر و دیگری دارای میرایی ای برابر میرایی میراگر جرمی متوازن و سختی ۰/۰۱ (برای جلوگیری از بروز خطای محاسباتی) است. جرم میراگر نیز بصورت نقطه ای فرض می‌شود که به آن جرم میراگر را اختصاص می‌دهیم و درجه آزادیهای غیرلازم را مقید می‌کنیم. رفتار خود سازه نیز در محدوده رفتار خطی برآورد می‌شود.

۴-۱. سیستم یکدرجه آزادی

بعنوان اولین نمونه به بررسی اثر میراگر جرمی بر روی سیستم سازه‌ای یکدرجه آزادی می‌پردازیم. مشخصات هندسی سیستم یک درجه آزادی در نظر گرفته شده به صورت شکل ۳ می‌باشد.



شکل ۳. هندسه سیستم یکدرجه آزادی

جرم سازه مورد بحث ۲۰۰۰ کیلوگرم فرض شده که این مقدار بصورت دو جرم متمرکز در نقاط ۱ و ۲ قرار داده شده‌اند. مقدار پیوند سازه قبل از قرار دادن میراگر ۰/۴۰۷ ثانیه می‌باشد و سیستم سازه- میراگر تحت زلزله‌های ال سنترو (از ثانیه ۰ تا ۱۵ زلزله مربوطه) و منجیل-آب بر (از ثانیه ۰ تا ۲۰ زلزله مربوطه) با مقیاس g ۰/۲۵ قرار داده شده است. لذا مقادیر پارامترهای میراگر به این قرار است:

جدول ۲. پارامترهای میراگر بهینه

μ	۱٪	۳٪	۵٪
α_{opt}	۰/۹۹	۰/۹۷۰۸	۰/۹۵۲
ζ_{opt}	۰/۰۶۰۹	۰/۱۰۴۵	۰/۱۳۳۶
$K_{TMD} (kg/s^2)$	۴۶۷۰	۱۳۴۸۰	۲۱۶۰۰
$C_{TMD} (kg/s)$	۴۰	۱۸۸	۳۹۵
$M_{TMD} (kg)$	۲۰	۶۰	۱۰۰
T (sec) بعد از اتصال میراگر	۰/۴۱۹۳	۰/۴۳۷۷	۰/۴۵۲۵
نسبت جابجایی نسبت شتاب نسبت تغییرات طول	جابجایی	۳۸٪	۲۷٪
	شتاب	۴۸٪	۳۷٪
	جابجایی	۵۸٪	۳۶٪
	شتاب	۶۸٪	۴۸٪

میراگر جرمی را در کاهش پاسخ مود اول سازه‌های چند درجه آزادی تأیید کرده و مشکلی در طراحی میراگر برای سازه‌هایی که میرایی مشخص و قابل محاسبه ای ندارند ایجاد نمی‌کند.

۳. بررسی ملاحظات اجرایی

در انتخاب سیستم میراگر جرمی پارامترهای مهم زیادی وجود دارند [۴] از قبیل: کارایی، ابعاد و متراکم بودن، هزینه اقتصادی خود سیستم، هزینه اجرایی و کارگذاری، نگهداری و امنیت سیستم برای خود ساختمان. در طراحی مهندسی یک سیستم میراگر جرمی، مقدار کاهش پاسخ دینامیکی که بطور عملی می‌تواند بدست آید با یکسری ملاحظات طراحی اجرایی اعمال می‌شود. اولین و مهمترین پارامتر، مقدار جرم اضافه شده به سیستم می‌باشد که در بالای ساختمان قرار داده و معمولاً بیشتر از ۱ تا ۲ درصد جرم مودی در نظر نمی‌گیرند. داشتن وزنی تا حدود ۴۰۰ تن برای جرم میراگر مقدار غیر متعارفی نیست. جرم میراگر معمولاً از فولاد یا بتن ساخته شده و سیستم میراگر جرمی باید در فضایی خالی کارگزارده شود که مناسب بوده و جرم مذکور براحتی بتواند حرکت کند. بعنوان یک نمونه استفاده شده از این میراگرهای جرمی در دنیا می‌توان به میراگر جرمی استفاده شده در برج Citicorp نیویورک اشاره کرد که ارتفاعی بالغ بر ۲۷۸ متر داشته و از میراگر سکویی لغزنده هیبرید (ترکیب سیستم غیر فعال و فعال) برای کنترل جابجاییها در طبقه ۶۳ ساختمان بنا شده است.

میراگر شامل جرم بتنی مسلح شده ۳۷۳ تنی است که بر روی دو تحملگر هیدروستاتیکی با اصطکاک بسیار کم قرار داده شده و برای عکس العمل نشان دادن به تحریکات سازه تا حداکثر شتاب ۱ mg (میلی g) طراحی شده است. حداکثر تغییر مکان مجاز برای میراگر جرمی ۱/۱۴± متر می‌باشد. سختی میراگر نیز با فنرهای بادی پر شده از جنس نیتروژن می‌باشد. لذا مقدار فرکانس ارتعاش را می‌توان براحتی با تغییر فشار متوازن کرد. میرایی میراگر توسط دو عملگر فرمان دهنده که در راستاهای شرق- غرب و شمال- جنوب نصب شده و توسط یک حلقه بزرگ به پایه جرم میراگر متصل شده است. سیستم فوق یک میرایی کل که مجموع میرایی مؤثر میراگر و میرایی سازه است بمقدار ۴٪ میرایی بحرانی ایجاد می‌کند و انتظار می‌رود که ارتعاشات ناشی از باد را ۴۰٪ تا ۵۰٪ کاهش دهد.

۴. بررسی رفتار سیستم‌های مختلف سازه‌ای

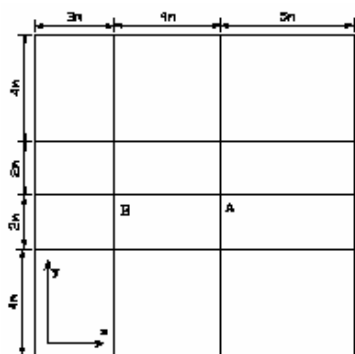
نرم افزار مورد استفاده در این مقاله، SAP2000 [۱۰] می‌باشد. در مدلسازی کامپیوتری سیستم میراگر جرمی از عضو اتصال غیر خطی (Non-Linear Link) استفاده شده است. به اینصورت که دو عضو Nlink با خصلت Damper روی یکدیگر و در بین حد فاصل جرم میراگر جرمی و محل اتصال میراگر جرمی با سازه قرار داده شده است که یکی دارای سختی‌ای برابر سختی مورد نیاز در میراگر

۴-۲. سازه چند درجه آزادی

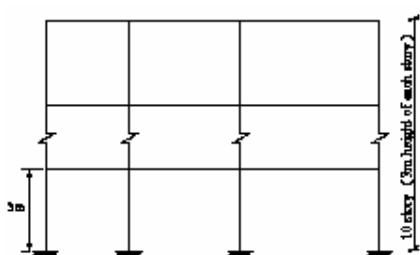
اکنون برای مطالعه رفتار میراگر جرمی بر روی سازه‌های چند درجه آزادی، یک ساختمان ۱۰ طبقه را در وضعیت‌های متفاوت سازه‌ای مورد بررسی قرار می‌دهیم:

۴-۲-۱. اسکلت فولادی ۱۰ طبقه با اتصالات خمشی

بعنوان حالت اول، سیستم سازه‌ای فولادی با اتصالات خمشی و کفها دیافراگم صلب در نظر گرفته می‌شود. پلان و مقطع ساختمان در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. نکته قابل توجه در کارگذاری میراگر جرمی اینست که چون جرم نوسان کننده در بالای سازه به سیستم نیرو اعمال می‌کند، لذا باید مسیر حرکت میراگر و نقطه اعمال نیروی میراگر حول و حوش مرکز سختی بوده تا در سازه ایجاد پیچش نکند. مثلاً برای قرار دادن میراگر در امتداد محور X بهتر است میراگر در نقطه A قرار داده شود تا مسیر حرکت در امتداد AB گردد.



شکل ۸. پلان ساختمان مورد بررسی



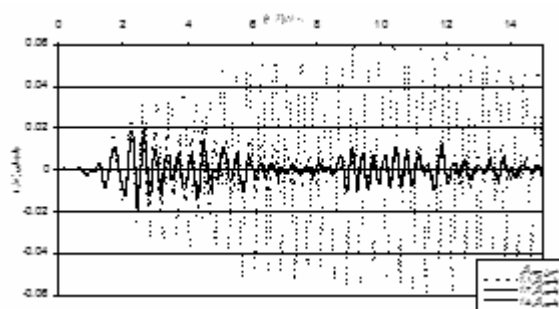
شکل ۹. مقطع ساختمان مورد بررسی

بعد از انجام آنالیز مودال سازه (جرم سهمیه هر طبقه در امتداد X و Y، ۷۹۳۰۰ کیلوگرم فرض شده است که این مقدار با در نظر گرفتن بارمرده ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد) مقدار پریود غالب سازه برای امتداد X ۲/۵۴ ثانیه بدست آمد. همینطور سازه در دو حالت با میرایی و بدون میرایی بررسی شده است. مقدار μ (نسبت جرم میراگر به جرم کل سازه تنها) ۵٪ فرض شده و لذا با توجه به غالب بودن مد اول، پارامترهای مربوط به میراگر بهینه به این قرار است:

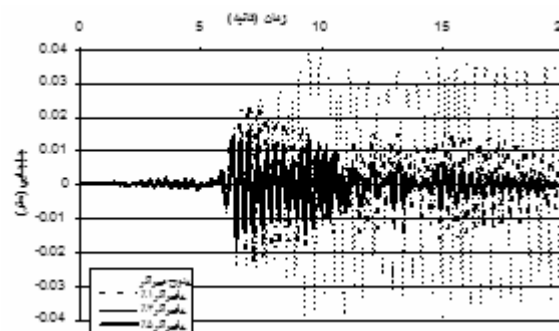
اگر $\mu = \frac{m}{M}$ برابر ۵٪ باشد، لذا $\frac{m}{79300} = 0.05$ که در نتیجه جرم میراگر

برابر ۳۹۶۵ کیلوگرم و از رابطه ۶، α_{opt} برابر ۰/۹۵۲ و از رابطه ۸، ξ_{opt}

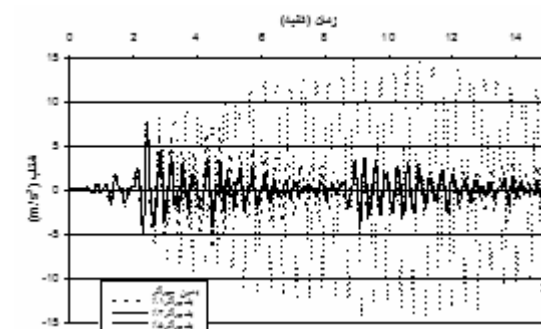
شکل‌های ۴ تا ۷ مربوط به جابجاییها و شتاب نقطه‌ای از بام تحت زلزله های السنترو و منجیل در سازه یکدرجه آزادی می‌باشد. بوضوح دیده می‌شود که میراگر جرمی متوازن روی سازه های یکدرجه آزادی (و سازه هایکه یک مود غالب دارند) بخوبی اثر گذاشته و ارتعاشات ناشی از زلزله را کاهش داده است. لذا می‌توان انتظار داشت در سازه‌هایی مانند برج‌های مخابراتی که معادل یک درجه آزادی می‌باشند اثر میراگرهای جرمی در کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله یا باد قابل قبول و کاملاً ملموس است.



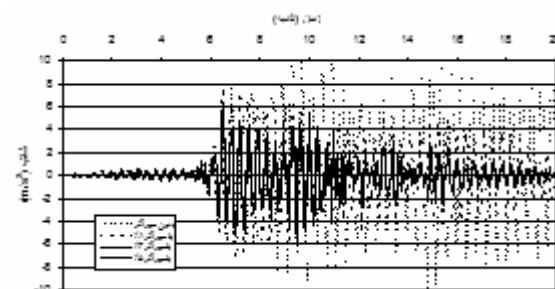
شکل ۴. نمودار جابجایی بام تحت زلزله السنترو



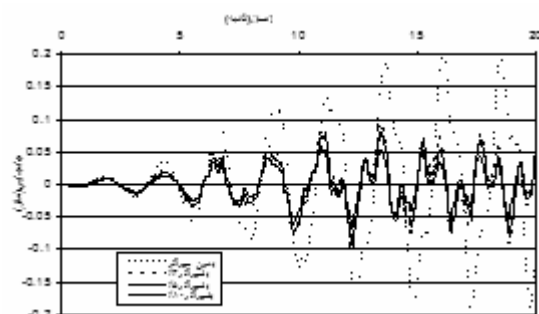
شکل ۵. نمودار جابجایی بام تحت زلزله منجیل



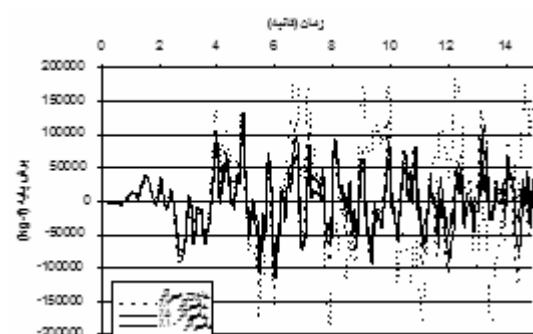
شکل ۶. نمودار شتاب بام تحت زلزله السنترو



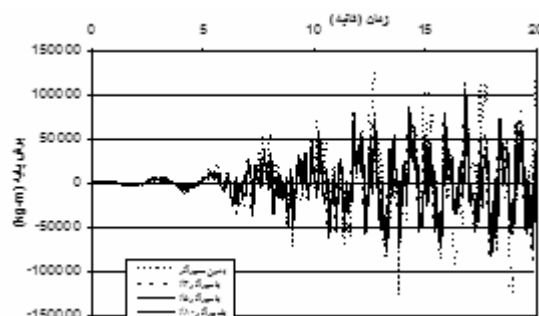
شکل ۷. نمودار شتاب بام تحت زلزله منجیل



شکل ۱۲. جابجایی نقطه‌ای از بام در سازه نامیرا تحت زلزله منجیل



شکل ۱۳. برش پایه در سازه نامیرا تحت زلزله السنترو



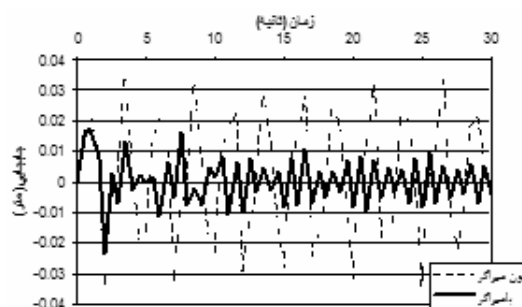
شکل ۱۴. برش پایه در سازه نامیرا تحت زلزله منجیل

همانطور که دیده می‌شود استفاده از میراگر جرمی در کاهش مقدار برش پایه نیز موثر بوده و علاوه بر تعدیل ارتعاشات سازه، مقدار نیروی برشی در پای سازه را کم کرده که این امر باعث نیاز به استفاده از مقاطع سبکتر در اسکلت سازه می‌شود.

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مقدار نیروی ایجاد شده در فتر را تحت دو زلزله مذکور نشان می‌دهد. با توجه به اینکه زلزله یک بار تصادفی طبیعی بوده و فرکانسهای گوناگونی را در بر دارد و میراگر جرمی دارای تنها یک فرکانس ارتعاش طبیعی می‌باشد، لذا عملکردی که میراگر در کاهش ارتعاشات ناشی از بار زلزله دارد باندازه ارتعاش هارمونیک و یا تحریکات ناشی از باد نمی‌باشد.

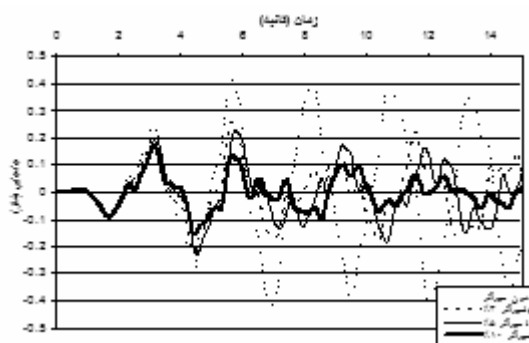
همانطور که در نمودارهای مربوط به جابجایی دیده می‌شود رفتار میراگر بعد از گذشتن از اولین نقطه اوج فعال می‌شود.

برابر 0.1336 می‌شود. چنانچه محاسبات در راستای X را انجام دهیم مقدار سختی میراگر 21900 کیلوگرم بر مجذور ثانیه و ضریب میرایی میراگر 2320 کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. ابتدا سیستم سازه و میراگر تحت اثر یک بارگذاری هارمونیک به معادله $F(t)=10000 \sin \pi t$ مشابه با مطالعه Park و Reed [۱۱] بررسی می‌شود که نمودار جابجاییهای نقطه‌ای از بام در سازه در شکل ۱۰ ترسیم شده است. پریود سازه بعد از اضافه کردن میراگر $3/11$ ثانیه شده است که پریود مذکور مربوط به نوسان میراگر می‌باشد. در این حالت نسبت مقدار اوج جابجایی بعد از اضافه کردن میراگر به اوج جابجایی بدون داشتن میراگر 65% می‌باشد.



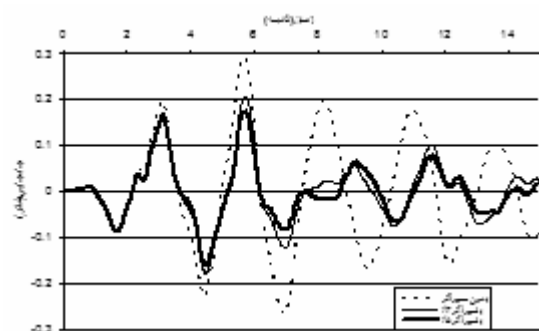
شکل ۱۰. جابجاییهای یک نقطه از بام تحت اثر یک بار هارمونیک

بعنوان حالت بعدی سیستم سازه- میراگر تحت زلزله السنترو (از ثانیه ۰ تا ۱۵) و منجیل- آب بر (از ثانیه ۰ تا ۲۰ زلزله مربوطه) با مقیاس $g/25$ قرار داده شده است. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ بترتیب نشانگر جابجایی نقطه‌ای از بام تحت زلزله السنترو و منجیل و شکل‌های ۱۳ و ۱۴ برش پایه تحت زلزله‌های مذکور می‌باشد. همانطور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ دیده می‌شود، میراگر جرمی با نسبت‌های 3% ، 5% و 10% در زلزله السنترو بترتیب 41% ، 51% و 60% و در زلزله منجیل- آب بر 52% ، 59% و 70% از مقدار حداکثر جابجایی را کاهش می‌دهد. استفاده از میراگر جرمی همچنین در کاهش برش پایه نیز تا حدودی موثر می‌باشد. همانطور که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود مقدار حداکثر برش پایه با استفاده از میراگرهای 3% ، 5% و 10% بترتیب تحت زلزله السنترو باندازه 33% ، 39% و 44% و تحت زلزله منجیل- آب بر باندازه 10% ، 20% و 35% کاهش یافته است.

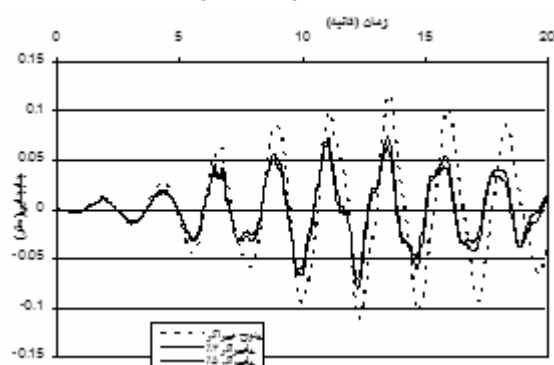


شکل ۱۱. جابجایی نقطه‌ای از بام در سازه نامیرا تحت زلزله السنترو

میرایی در خود سازه بعد از شروع به ارتعاش، این ارتعاش رو به افزایش رفته و حالتی مشابه حالت تشدید ونده خواهیم داشت. حال استفاده از میراگر جرمی بشدت کمک به تعدیل این ارتعاشات می‌کند. در صورتیکه در سازه میرا میرایی خود سازه کمک به کاهش این حداکثرها شده و از حالت تشدید شونده کمی فاصله می‌گیریم. لذا مقادیر ماکزیمم‌های ایجاد شده در سازه میرا کمتر بوده و نتیجتاً اثر میراگر بر روی این سازه نسبت به سازه نامیرا کمتر محسوس می‌باشد.



شکل ۱۷. جابجایی نقطه ای از بام با در سازه میرا ($\xi_s = 0.5\%$)
تحت زلزله السنترو

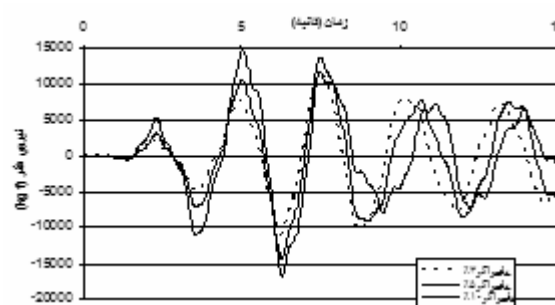


شکل ۱۸. جابجایی نقطه ای از بام با در سازه میرا ($\xi_s = 0.5\%$)
تحت زلزله منجیل (آب بر)

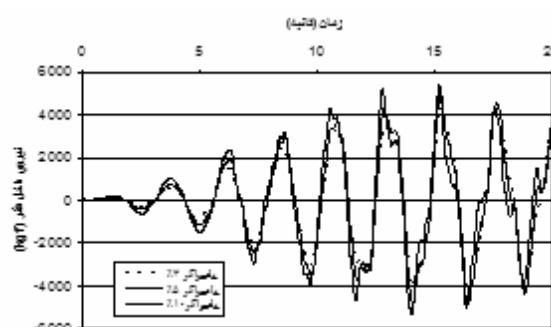
۲-۲-۴. اسکلت فولادی ۱۰ طبقه با اتصالات مفصلی همراه با بادبندهای ضربدری

در این قسمت به بررسی دو حالت در قرار گرفتن وضعیت بادبندهای ضربدری می‌پردازیم.

۲-۲-۴-۱. حالت اول: در این حالت فرض بر این است که صفحه بادبندها بر صفحه مسیر حرکت میراگر منطبق است (شکل ۱۹). شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نشانگر جابجایی‌های نقطه‌ای از بام در دو حالت بدون میراگر و با میراگر می‌باشد. پیوند سازه بدون میراگر ۲/۳۵۱ ثانیه می‌باشد. جدول ۴ مقادیر پارامترهای میراگر بهینه را نمایش می‌دهد. همانطور که بوضوح دیده می‌شود سیستم میراگر جرمی مورد استفاده بخوبی جابجاییهای ایجاد شده تحت زلزله منجیل را تا حدود یک سوم کاهش داده و نتیجتاً نسبت به زلزله السنترو بسیار موثرتر واقع شده است.



شکل ۱۵. مقدار نیروی فتر در سازه نامیرا تحت زلزله
السنترو



شکل ۱۶. مقدار نیروی فتر در سازه نامیرا تحت زلزله
منجیل

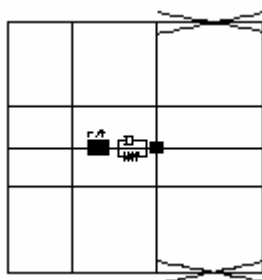
حال چنانچه خود سازه دارای میرایی ۰.۵٪ بوده و پیوند سازه ۲/۵۴ ثانیه باشد، از جدول ۱ پارامترهای میراگر بهینه برای $\xi_s = 0.5\%$ ، $\xi_s = 3\%$ و $\mu = 0.5$ که با درونیایی بین مقادیر مربوط به $\mu = 0.3$ و $\mu = 0.1$ بدست می‌آید به این قرار است:

جدول ۳. پارامترهای میراگر بهینه

μ	۰.۳	۰.۵
α_{opt}	۰/۹۳۸	۰/۹۱۲
ξ_{opt}	۰/۰۸۵۶۷	۰/۱۰۴۸
$K_{TMD} (kg/s^2)$	۱۲۹۵۰۰	۲۰۱۶۰
$C_{TMD} (kg/s)$	۹۵۵	۱۸۷۵
$M_{TMD} (kg)$	۲۴۰۰	۳۹۶۵
T (sec) بعد از اتصال میراگر	۲/۹۶۳	۳/۱۱۳
نسبت ماکزیمم	۰/۶۶	۰/۶۰
السنترو		

شکل‌های ۱۷ و ۱۸ بیانگر جابجایی مطلق نقطه ای از بام در سازه میرا تحت دو زلزله مذکور می‌باشد. با مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۲ و ۱۷ و ۱۸ دیده می‌شود که اثر وجود میراگر در سازه نامیرا محسوس‌تر می‌باشد. علت این امر اینست که همانطور که در نمودارهای مربوطه (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) در سازه نامیرا دلیل نبود

جابجایی مطلق نقطه‌ای از بام در حالات بدون استفاده از میراگر و با استفاده از میراگر و تحت دو زلزله مورد بحث می‌باشد. پریود سازه بدون اتصال میراگر ۱/۵۵ ثانیه می‌باشد.



شکل ۲۲. پلان بادبندها در حالت دوم

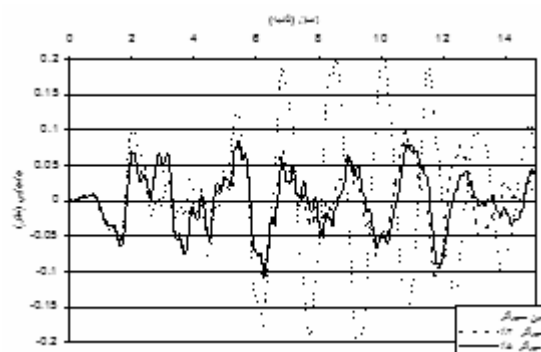
جدول ۵. پارامترهای میراگر بهینه

μ	۳٪	۵٪
α_{opt}	۰/۹۷۰۸	۰/۹۵۲
ζ_{opt}	۰/۱۰۴۵	۰/۱۳۳۶
$K_{TMD} (kg/s^2)$	۳۷۲۰۰	۵۹۰۵۰
$C_{TMD} (kg/s)$	۱۹۸۰	۴۰۹۰
$M_{TMD} (kg)$	۲۴۰۰	۳۹۶۵
T (sec) بعد از اتصال میراگر	۱/۸۲	۱/۹۲
نسبت ماکزیمم جابجایی در سازه با میراگر به سازه بدون میراگر	نسبتو	۵۳٪
	منجیل (آبیر)	۵۹٪
نسبت ماکزیمم جابجایی در سازه با میراگر به سازه بدون میراگر	نسبتو	۵۶٪
	منجیل (آبیر)	۶۳٪

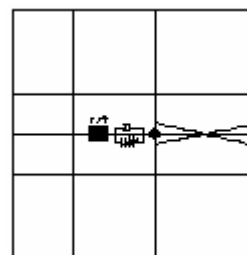
همانطور که دیده می‌شود حالتیکه سازه صلبتر شده است (یعنی استفاده از دو بادبند)، تاثیر میراگر بر روی سازه کمتر شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هر چه سازه نرمتر باشد اثر میراگر جرمی بر روی آن ملموستر و بیشتر می‌باشد.

۳-۴. بررسی اثر تعداد طبقات بر روی رفتار میراگر

برای بررسی اثر تعداد طبقات، یکبار کاهش ارتعاشات بر روی ساختمان ۵ طبقه و یکبار بر روی ساختمان ۲۰ طبقه بررسی می‌گردد.



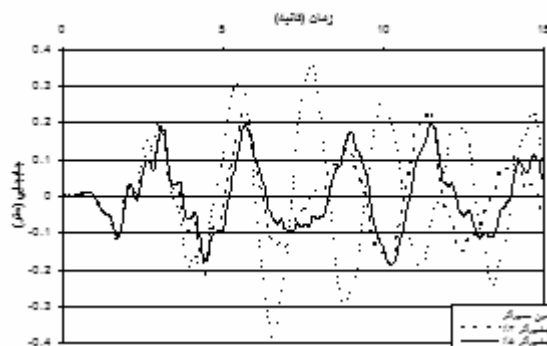
شکل ۲۳. جابجایی نقطه‌ای از بام در حالت دوم تحت زلزله السنترو



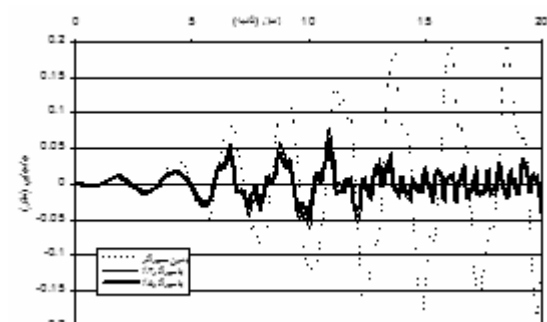
شکل ۱۹. پلان بادبندها در حالت اول

جدول ۴. پارامترهای میراگر بهینه

μ	۳٪	۵٪
α_{opt}	۰/۹۷۰۸	۰/۹۵۲
ζ_{opt}	۰/۱۰۴۵	۰/۱۳۳۶
$K_{TMD} (kg/s^2)$	۱۶۷۰۰	۲۶۴۵۰
$C_{TMD} (kg/s)$	۱۳۵۰	۲۷۵۰
$M_{TMD} (kg)$	۲۴۰۰	۳۹۶۵
T (sec) بعد از اتصال میراگر	۲/۷۱۴	۲/۹۳۲
نسبت ماکزیمم جابجایی در سازه با میراگر به سازه بدون میراگر	نسبتو	۶۲٪
	منجیل (آبیر)	۵۲٪
نسبت ماکزیمم جابجایی در سازه با میراگر به سازه بدون میراگر	نسبتو	۳۹٪
	منجیل (آبیر)	۳۰٪



شکل ۲۰. جابجایی نقطه‌ای از بام تحت زلزله السنترو



شکل ۲۱. جابجایی نقطه‌ای از بام تحت زلزله منجیل

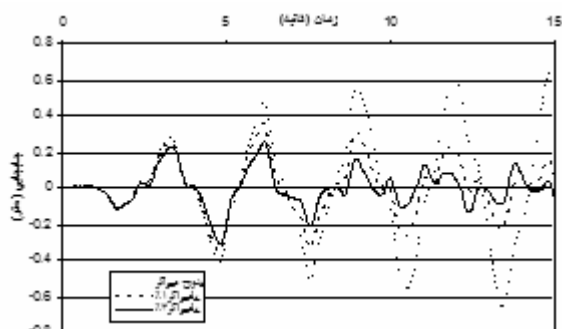
۲-۲-۲-۴. حالت دوم: در این حالت بادبندها در وضعیت نشان داده شده و در طرفین ساختمان (در شکل ۲۲) استفاده شده‌اند که سختی پیچشی و جانبی سازه نسبت به حالت قبل بسیار بیشتر شده و اصطلاحاً سازه صلبتر شده است. شکلهای ۲۳ و ۲۴ مربوط به

۴-۳-۲. ساختمان ۲۰ طبقه

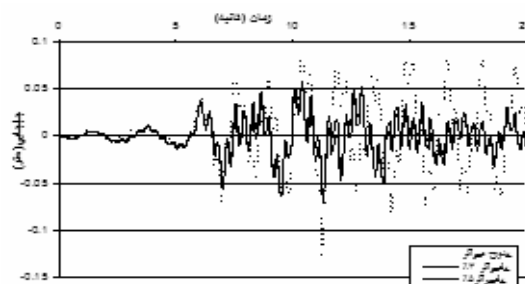
در این حالت بدلیل زیاد بودن تعداد طبقات، ۵٪ جرم کل ساختمان بعنوان جرم میراگر مقداری بسیار زیاد و غیر اجرایی می‌شود. لذا صرفاً به بررسی مقادیر ۳٪ و ۱٪ می‌پردازیم. پریود سازه بدون میراگر ۳ ثانیه می‌باشد. با داشتن اتصالات خمشی برای خود سازه و بکاربردن میراگر جرمی با پارامترهای زیر، مقادیر جابجایی نقطه ای از دیافراگم بام بدون داشتن میراگر و با اتصال میراگر بصورت شکل ۲۷ است. همانطور که در شکل دیده می‌شود جابجاییهای سازه بدون میراگر بصورت افزایشی و زیاد شونده می‌باشد. استفاده از میراگر جرمی بخوبی کمک به کاهش و شکستن نقاط اوج جابجایی می‌کند و رفتار زیاد شونده را به رفتار کم شونده تبدیل می‌کند. همانطور که دیده می‌شود بدلیل زیاد بودن پریود ارتعاشی سازه تعداد اعوجاجات (fluctuations) بالای سازه در حین زلزله نسبت به ساختمان قبلی (۵ طبقه) کمتر بوده که این موضوع باعث می‌شود میراگر در عمل راحت تر بتواند حرکت و فعالیت کند. لذا رفتار میراگر جرمی در عمل بر روی سازه هایی که پریود بالایی دارند (و نتیجتاً تعداد اعوجاجات یا فرکانس کمتری دارند)، به رفتار تثوریک آنها نزدیکتر است. حال اگر تعداد درجات آزادی در سازه های بلندی که پریود بالایی هم دارند کم باشند (نزدیک به یک درجه آزادی)، رفتار تثوریک و عملی میراگر جرمی بهم نزدیک و بهینه می‌باشد.

جدول ۷. پارامترهای میراگر بهینه

۳٪	۱٪	μ
۰/۹۷۰۸	۰/۹۹	α_{opt}
۰/۱۰۴۵	۰/۰۶۰۹	ζ_{opt}
۱۹۸۵۰	۷۰۰۰	$K_{TMD} (kg/s^2)$
۲۰۵۰	۴۰۰	$C_{TMD} (kg/s)$
۴۸۰۰	۱۶۰۰	$M_{TMD} (kg)$
۳/۴۴	۳/۲۴	T (sec) بعد از اتصال میراگر
نسبت ماکزیمم جابجایی در سازه با میراگر به سازه بدون میراگر	السنتر	۵۴٪
۴۴٪		



شکل ۲۷. جابجایی نقطه‌ای از دیافراگم بام در سازه ۲۰ طبقه



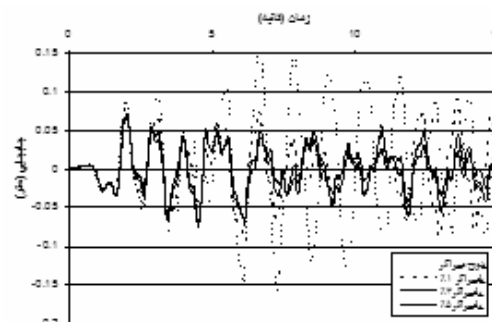
شکل ۲۴. جابجایی نقطه‌ای از بام در حالت دوم تحت زلزله منجیل

۴-۳-۱. ساختمان ۵ طبقه

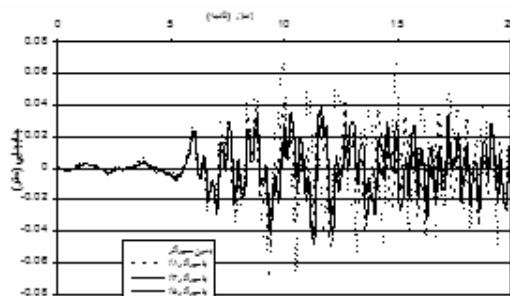
با در نظر گرفتن همان پلان گفته شده برای ساختمان ۵ طبقه، پریود ساختمان با اتصالات خمشی و بدون داشتن میراگر ۱/۲۴ ثانیه می‌باشد. شکلهای ۲۵ و ۲۶ بیانگر مقادیر جابجایی مطلق نقطه‌ای از بام در حالات بدون میراگر و با میراگر می‌باشند.

جدول ۶. پارامترهای میراگر بهینه

۵٪	۳٪	۱٪	μ
۰/۹۵۲	۰/۹۷۰۸	۰/۹۹	α_{opt}
۰/۱۳۳۶	۰/۱۰۴۵	۰/۰۶۰۹	ζ_{opt}
۴۶۰۰۰	۳۰۰۰۰	۱۰۱۰۰	$K_{TMD} (kg/s^2)$
۲۵۵۰	۱۲۵۰	۲۵۰	$C_{TMD} (kg/s)$
۱۹۸۰	۱۲۰۰	۴۰۰	$M_{TMD} (kg)$
۱/۴۸	۱/۴۱	۱/۳۴	T (sec) بعد از اتصال میراگر
نسبت ماکزیمم جابجایی در سازه با میراگر به سازه بدون میراگر	السنتر	۵۶٪	۴۳٪
منجیل (آبیر)	۵۷٪	۶۶٪	۵۴٪



شکل ۲۵. جابجایی نقطه‌ای از بام تحت زلزله السنتر



شکل ۲۶. جابجایی نقطه‌ای از بام تحت زلزله منجیل (آبیر)

۴-۵. استفاده از سیستم‌های با چند میراگر (MTMD)

از بررسی نتایج تحلیلی و عددی انجام شده می‌توان دید که ۱- زاویه رویداد زلزله بحرانی بگونه‌ای تعیین می‌شود که میانگین مربعات پاسخ مربوط به درجه آزادی کنترل شده مورد نظر حداکثر شود. ۲- مد غالب درجه آزادی کنترل شده مورد نظر بعنوان مود کنترل شده میراگر جرمی در نظر گرفته می‌شود. ۳- نقطه‌ای از ساختمان که مد غالب، دارای بیشترین تغییر مکان است بهترین نقطه برای قراردادن میراگر می‌باشد. ۴- راستای حرکت میراگر همان درجه آزادی مورد نظر می‌باشد. ۵- با یک میراگر می‌توان هر دو حرکت انتقالی و پیچشی ساختمانهای بلند را با هر زاویه رویداد زلزله‌ای بخوبی کاهش داد. با اینحال یک میراگر دومی هم برای ساختمانهای با سختی تقریباً مساوی در دو راستای X و Y مورد نیاز است.

Lin و همکاران [۱۲] بر روی سیستم‌های با چند میراگر به این نتیجه رسیده‌اند که چنانچه در دو جهت سختی سازه تقریباً برابر باشد، نیاز به استفاده از میراگر دوم می‌باشد. ولی اگر سختی در یک جهت بسیار بیشتر از دیگری باشد یک میراگر نیز برای کنترل ارتعاشات کفایت می‌کند. در مورد اثر میراگر بر روی مدهای دیگر می‌توان گفت هنگامیکه یک میراگر برای کنترل یک مود خاص نصب می‌گردد، خواص سیستم ترکیبی دچار تغییر می‌شود و از سیستم اولیه متفاوت می‌شود. بنابراین در این وضعیت اگر یک میراگر دیگر برای کنترل یک مد دیگر نصب شود، مطابق انتظار عمل نخواهد کرد. همچنین وجود این میراگر ثانویه می‌تواند بر روی رفتار و بازده میراگر نیز تاثیر گذارد. مطالعات [۱۲] نشان می‌دهد که: ۱- برای کنترل موثر و با بازده هر مود خاصی، یک میراگر جدا بلاخص برای آن مود باید فراهم شود. ۲- پاسخ سازه‌ای مود کنترل شده اول بخاطر حضور میراگر متوازن کننده مودهای دیگر کمی افزایش می‌یابد. ۳- پاسخ سازه‌ای مودهای دوم و سوم کنترل شده بخاطر حضور میراگرهای متوازن کننده مدهای دیگر کمی کاهش می‌یابد.

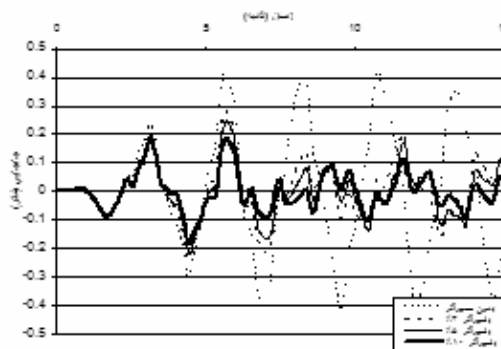
۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار میراگر جرمی بر روی حالات مختلف سیستم‌های ساختمانی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به رفتار نوسانی میراگر بر روی سازه، نیاز به آزادی حرکت بدون قید و داشتن ریل‌هایی صیقل و عاری از اصطکاک از جمله ملزومات این سیستم کنترل سازه در برابر نوسانات بار خارجی می‌باشد. لذا تمامی مطالعات فوق بر اساس داشتن مسیر بدون اصطکاک بوده و مسلماً در عمل بسته به وضعیت ریل‌های مربوطه مقداری از راندمان بدست آمده برای سیستم میراگر جرمی کمتر خواهد شد.

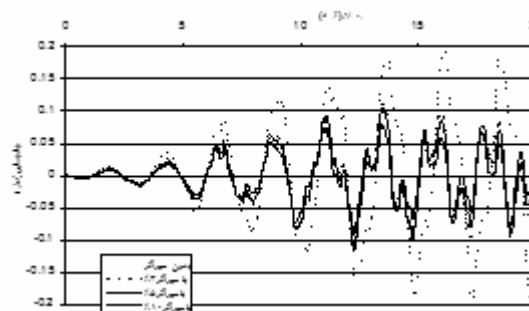
مطالعات فوق نشانگر اثر ملموس و مثبت میراگر جرمی بر روی ارتعاشات سازه می‌باشد. نکته مهم در راندمان میراگر غالب بودن یک مود در سازه می‌باشد که میراگر برای کنترل آن مود طراحی و نصب می‌گردد و بازده میراگر صرفاً به تعداد طبقات سازه مربوط نیست.

۴-۴. بررسی محل قرار گرفتن میراگر در ارتفاع

در این قسمت به بررسی اثر محل قرار گرفتن میراگر جرمی در رفتار میراگر بر روی سازه می‌پردازیم. در سازه ۱۰ طبقه بحث شده چنانچه میراگر در طبقه‌ای به غیر از بام قرار گیرد، مثلاً در طبقه ششم ساختمان قرار بگیرد جابجایی نقطه‌ای از دیافراگم بام ساختمان که بیشترین جابجایی را دارد به صورت شکل‌های ۲۸ و ۲۹ می‌باشد.



شکل ۲۸. جابجایی نقطه‌ای از دیافراگم بام هنگامیکه میراگر در طبقه ۶ قرار داشته باشد (تحت زلزله السنترو)



شکل ۲۹. جابجایی نقطه‌ای از دیافراگم بام هنگامیکه میراگر در طبقه ۶ قرار داشته باشد (تحت زلزله منجیل)

همانطور که در قسمت ۴-۲-۱ دیده شد هنگامیکه میراگر در بام قرار داشت، میزان کاهش جابجایی حداکثر در سازه با میراگرهای با نسبت جرمی ۳٪، ۵٪ و ۱۰٪ نسبت به سازه تنها (بدون میراگر) تحت زلزله السنترو بترتیب ۴۱٪، ۵۱٪ و ۶۰٪ و تحت زلزله منجیل بترتیب ۵۲٪، ۵۹٪ و ۷۰٪ بود. اما هنگامیکه میراگر در طبقه ۶ قرار گرفت، نسبت کاهش مذکور برای میراگرهای گفته شده تحت زلزله السنترو بترتیب ۳۵٪، ۴۱٪ و ۵۵٪ و تحت زلزله منجیل ۴۳٪، ۴۷٪ و ۶۰٪ گردید. با مقایسه نمودارها هنگامیکه میراگر در طبقه ششم قرار داده شده، مقدار کاهش جابجایی نسبت به حالتیکه میراگر در بام قرار داده شده است کمتر می‌باشد. دلیل این موضوع غالب بودن مد اول در این سازه است و چون در مد اول بیشترین تغییر مکان مربوط به بالاترین نقطه ساختمان یعنی بام می‌باشد قرار دادن میراگر روی بام بیشترین تاثیر مثبت داشته و میراگر می‌تواند بصورت بهینه در فاز مخالف تحریک سازه قرار گیرد.

Earthquake Excitation, Engineering Structures, Vol.23, 2001, PP. 802-814.

- [12] Lin, C.C., Ueng, J.M., Haung, T.C., *Seismic Response Reduction of Irregular Buildings Using Passive Tuned Mass Dampers*, Engineering Structures, Vol. 21, 1999, PP. 513-524.

مسلماً روابط اخیر برای سازه‌های یکدرجه آزادی جواب بهتری داده و میراگر طراحی شده برای این سازه‌ها عملکردی بهتر دارند. لذا سازه‌های یکدرجه آزادی بلند مرتبه ای که دارای جرم متمرکزی در ارتفاع بالا می‌باشند مانند برجهای مخابراتی بهترین گزینه برای استفاده از میراگرهای جرمی در کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله و باد در آنها می‌باشد. از دیگر نتایج بدست آمده راندمان و تاثیر بیشتر میراگر جرمی بر روی سیستم‌های سازه‌های نامیرا می‌باشد. در رفتار میراگر جرمی می‌توان به این نکته توجه داشت که میراگر اصولاً بعد از وقوع اولین ماکزیمم بار ورودی (یا شتاب) فعال شده و توان فرونشاندن حداکثرهای بعدی را داراست. لذا نسبت جابجایی حداکثر سیستم با میراگر به جابجایی سیستم بدون میراگر به شکل رکورد (زلزله) ورودی وابسته است.

مراجع

- [1] Soong, T.T., Dargush, G.F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons Ltd, 1987.
- [2] Den Hartog, J.P., *Mechanical Vibrations*, 4th edition, McGraw-Hill, NY, 1956.
- [3] Jennige, R.L., Frohrib, D.A., *Alternative Tuned Absorbers for Steady State Vibration Control of Tall Structures*, J. Mech. Des., ASME, Paper No. 77-DET-84, 1977, PP. 1-7.
- [4] Soong, T.T., Spencer, B.F., *Supplemental Energy Dissipation, State-of-the-Art and State-of-the-Practice*, Engineering Structures, Vol. 24, 2002, PP. 243-259.
- [5] Zahrai, S.M., Ghannadi_Asl, A., *Seismic Performance of TMDs in Improving the Response of MRF Buildings*, Scientia Iranica, Vol. 18, No. 1, 2008.
- [6] Zahrai, S.M., Dehghan-Niri, E., Mohtat, A., *Design Methodology for MTMD Performance Optimization Using a New Criterion for Robustness*, COMPDYN European conference on computational methods in structural dynamics and earthquake engineering, Rethymno, Greece, 2007.
- [7] Kwok, K.C.S., Samali, B., *Performance of Tuned Mass Dampers Under Wind Loads*, Engineering Structures, Vol.17, No.19, 1995, PP. 655-667.
- [8] Rana, R., Soong, T.T., *Parametric Study and Simplified Design of Tuned Mass Dampers*, Engineering Structures, Vol.20, No.3, 1993, PP. 193-204.
- [9] Cao, H., Reinhorn, A.M., Soong, T.T., *Design of an Active Mass Damper for a Tall TV Tower in Nanjing, china*, Engineering Structures, Vol.20, No.3, 1998, PP. 134-143.
- [10] Habibullah, A., Wilson, E., *SAP2000 Manual*, ver.7.42, 2001.
- [11] Park, J., Reed, D., *Analysis of Uniformly and Linearly Distributed Mass Dampers Under Harmonic and*