

کنترل غیرفعال با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده‌ی بهینه و عملکرد آن در سازه با رفتار غیرخطی

رضا کریمی محمّدی* (دانشیار)

آرین صالحی زبیرانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۵ (۱۳۹۵)
دوره ۲ - شماره ۲/۲، ص. ۱۱۵-۱۰۷، یادداشت شنی

یکی از روش‌های کنترل غیرفعال سازه‌ها استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده (TMD)^۱ است، که مقدار پاسخ با اضافه کردن درصدی از جرم مؤثر سازه تا حد مطلوبی کاهش می‌یابد. فرایند طراحی این میراگر شامل مشخص کردن پارامترهای آن یعنی جرم، سختی، و میرایی است. یکی از موضوعات اصلی در زمینه مطالعه و طراحی میراگر جرمی تنظیم شده، یافتن پارامترهای بهینه‌ی آن است. در این مطالعه براساس معادله‌ی بالانس انرژی در سازه، ضمن معرفی رابطه‌ی جهت کمینه‌سازی مقدار انرژی مازاد سیستم مرکب سازه و میراگر، جست‌وجوی عددی هدف‌داری جهت یافتن پارامتر بهینه‌ی میراگر برای کاهش پاسخ بیشینه‌ی لرزه‌یی سازه انجام شده است. این مطالعات برای دو حالت شتاب پایه‌ی هارمونیک و زلزله صورت گرفته و مطابقت خوبی بین نتایج به دست آمده و مطالعات گذشته در این زمینه مشاهده شده است. همچنین عملکرد میراگر بهینه در یک سازه با رفتار غیرخطی بررسی شده است.

واژگان کلیدی: کنترل غیرفعال، میراگر جرمی تنظیم شده، بهینه‌یابی، بالانس انرژی، رفتار غیرخطی.

۱. مقدمه

نظر گرفته شده است.^[۷-۵] در سال ۱۹۶۷، برای دست‌یابی به کمینه‌ی پاسخ بیشینه و بیشینه‌ی میرایی مؤثر در سازه‌ی اصلی، روند بهینه‌یابی انجام شده است.^[۶] در پژوهش دیگری نیز (۱۹۷۸)، روابطی تجربی برای پارامترهای بهینه‌ی یک سازه با میرایی کم ارائه شده است.^[۷] برخی پژوهشگران نیز جداولی تهیه کرده‌اند که در آن برای مقادیر مشخص میرایی سازه و نسبت جرم TMD، نسبت‌های تنظیم و میرایی میراگر ارائه شده است.^[۸،۹] همچنین در پژوهش‌های مختلفی به منظور تسهیل طراحی TMD، پارامترهای بهینه برای انواع مختلف بارگذاری به صورت روابط صریحی، که از درون‌یابی به دست آمده‌اند، ارائه شده است.^[۱۰] در پژوهش دیگری (۲۰۱۰) نیز مدل‌های مختلف ریاضی برای سازه، شرایط مختلف بارگذاری، معیارهای مختلف بهینه‌یابی نظیر کمینه‌سازی شتاب و تغییر مکان بیشینه، دریافت طبقات و... مقایسه‌ی خوبی بین آن‌ها انجام شده است.^[۱۱] روش‌های مختلف بهینه‌یابی نظیر ژنتیک، جست‌وجوی هارمونی،^[۱۲] ازدحام ذره^[۱۳] و شیوه‌های جست‌وجوی عددی و... جنبه‌های مختلف مطالعه در این زمینه را تشکیل داده‌اند.

در بیشتر مطالعات انجام شده، به دلیل اینکه مقدار بهینه‌ی جرم میراگر بزرگ است و از نظر اجرایی صرفه‌ی اقتصادی ندارد، به عنوان یک پارامتر از پیش تعیین شده در طراحی در نظر گرفته شده است، و دو پارامتر نسبت تنظیم (f) و میرایی (ξ) به عنوان متغیرهای مسئله‌ی بهینه‌یابی لحاظ شده‌اند. در این نوشتار، ابتدا بر روی یک مدل ساده‌ی یک درجه آزادی با رفتار خطی مجهز به TMD با مقدار معلوم سختی و میرایی مطالعه شده است، و با در نظر گرفتن کرانی برای جرم میراگر به عنوان مقدار

میراگر جرمی تنظیم شده (TMD)، که طرح ابتدایی آن برای اولین بار در سال ۱۹۰۹ ارائه شده است،^[۱] امروزه به عنوان یکی از روش‌های پرکاربرد کنترل غیرفعال سازه‌ها به حساب می‌آید. میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) در ساده‌ترین شکل، به صورت جرمی حدوداً ۱ تا ۱۰ درصد جرم کل سازه است، که توسط فنر و کمک‌فنر (میراگر ویسکوز) به سازه‌ی اصلی متصل می‌شود و مشخصات آن به گونه‌ی انتخاب می‌شود که بسامد آن با بسامد مشخصی از سازه تنظیم شود. در نتیجه وقتی سازه به ارتعاش درمی‌آید، جرم ثانویه با ۹۰ درجه اختلاف فاز به حرکت درمی‌آید و انرژی وارده به سازه، از طریق میراگر تلف می‌شود و پاسخ را به طرز مطلوبی کاهش می‌دهد. کانر^۲ در کتاب خود مطالب خوبی در این زمینه جمع‌آوری کرده است.^[۲]

با وجود اینکه سازوکار این میراگر امری ساده و مشخص است، ولی مطالعات نشان داده است که تغییر پارامترهای آن یعنی جرم، سختی فنر، و نسبت میرایی در اثربخشی آن در کاهش پاسخ دینامیکی سازه مؤثر است، لذا برای بهبود عملکرد کنترل، یافتن پارامترهای بهینه از موضوعات مهم در مطالعه TMD است. از سال ۱۹۴۰ که برای اولین بار تئوری طراحی بهینه‌ی میراگر برای سازه‌ی بدون میرایی و تحت تحریک هارمونیک ارائه شده است،^[۳] تا به امروز مطالعات زیادی در زمینه بهینه‌یابی پارامترهای این میراگر صورت گرفته است. در این زمینه، برای اولین بار در پژوهشی در سال ۱۹۵۲،^[۴] و در برخی پژوهش‌های دیگر نیز میرایی در سازه در

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۳/۸/۴، پذیرش ۱۳۹۳/۸/۱۷.

در رابطه‌ی ۴، نماد E بیانگر امید ریاضی یا متوسط زمانی است. بدین ترتیب جمله‌ی مشخص شده با حرف A ، توان ورودی به سازه ناشی از تحریک خارجی است، که همواره مقدار مثبتی است. جمله‌ی که با حرف B مشخص شده است، توان انتقالی از سیستم سازه به میراگر را نشان می‌دهد، در نتیجه یک معیار مناسب از اثربخشی TMD است، به این معنی که هر چقدر جریان توان بیشتر باشد، شاهد اثربخشی بیشتری خواهیم بود. بیشینه‌ی توان انتقالی از میراگر به سازه زمانی به دست می‌آید که تغییر مکان میراگر نسبت به سازه‌ی اصلی 90° درجه تأخیر فاز پیدا کند.^[۱۴] در این مطالعه تفاوت انرژی ورودی به سازه و انرژی انتقالی از سازه به میراگر، مازاد انرژی سیستم مرکب سازه و میراگر اطلاق و مطابق رابطه‌ی ۵ با E_M نشان داده شده است:

$$E_M = |A - B| \quad (5)$$

۳. روش جست‌وجو

بر اساس توضیحات گفته شده، با برابر صفر قراردادن سمت راست رابطه‌ی ۴، عبارتی برای محاسبه‌ی جرم به دست می‌آید که به صورت رابطه‌ی ۶ است:

$$m_d = - (m + m_d) \cdot \frac{E [\ddot{u}_g \dot{u}]}{E [\ddot{u}_d \dot{u}]} \quad (6)$$

در استفاده از الگوریتم تغییر شکل‌های یکنواخت، برخی پژوهشگران یک رابطه‌ی اصلاح شده برای جست‌وجوی مشخصات سازه‌ی ارائه کرده‌اند، که منجر به رسیدن پاسخ‌های سازه به توزیع خاص مطلوب طراحی شده است.^[۱۷-۱۵] در این مطالعه با بسط دادن مفاهیم بهینه‌یابی، رابطه‌ی برای جست‌وجوی هدف‌دار جهت یافتن جرم بهینه به دست آمده، که مطابق با رابطه‌ی ۷ است. با توجه به محدوده‌ی نسبت جرم متداول TMD که بین ۱ تا ۱۰ درصد است، یک مقدار اولیه برای جرم میراگر انتخاب شده و جست‌وجوی عددی به دنبال جرم بهینه، یعنی جرمی که منجر به کمترین پاسخ بیشینه‌ی سازه شود، آغاز می‌شود. با توجه به رابطه‌ی تکراری، جرم در هر گام اصلاح می‌شود تا مقدار انرژی E_M را به سوی صفر شدن، که در اینجا به مفهوم بیشینه‌ی انرژی انتقالی به میراگر است، ببرد:

$$m_d^{j+1} = m_d^j \times \beta_{j+1}^{\alpha_1} \quad (7)$$

مثل سایر مسائل تکراری، باید ابتدا مقادیر اولیه تعیین شوند، برای $j = 0$ ، مقدار اولیه‌ی به عنوان کران بالای جرم انتخاب می‌شود (m_d^0)، همچنین با فرض $\beta_{j+1}^{\alpha_1} = 0.99$ داریم: $\beta_{j+1}^{\alpha_1} = 0.99$ ، $m_d^1 = m_d^0 \times \beta_{j+1}^{\alpha_1} = m_d^0 \times 0.99$ در گام‌های بعدی ضریب اصلاحی با استفاده از روابط ۸ الی ۱۰ محاسبه می‌شود. بر اساس رابطه‌ی ۸، کمینه‌ی مقدار برای β_{j+1} ، که خود از رابطه‌ی تکراری تعیین می‌شود و تابعی از A_{j+1} است، برابر ۱ است. لذا برای توان‌های منفی ضریب اصلاح، جرم‌های به دست آمده دنباله‌ی نزولی را تشکیل می‌دهند، که در نهایت به جرم بهینه، یعنی جرمی که مقدار انرژی مازاد (E_j) را به صفر برساند، هم‌گرا می‌شود:

$$\beta_{j+1} = \max \{1, \beta_j \times A_{j+1}\} \quad (8)$$

بر اساس رابطه‌ی ۹، A_{j+1} تابعی از نسبت بین رشد مجاز انرژی مازاد در هر گام (E_j) و رشد مجاز است، که یک مقدار بیش فرض است (Y). برای مثال $Y = 2$

اولیه، جست‌وجوی عددی هدف‌داری به منظور یافتن جرم بهینه صورت گرفته است. از دیدگاه انرژی، هدف از به کارگیری TMD، به بیشینه رساندن جریان انتقالی انرژی به میراگر است، که متناظر با کمینه‌ی انرژی مازاد سیستم مرکب است؛ بر این اساس با استفاده از یک رابطه‌ی تکراری، جرم انتخاب شده در چندین گام اصلاح شده است، تا هم‌زمان با کمینه‌سازی انرژی مازاد سیستم مرکب و پاسخ بیشینه‌ی لرزه‌ی سازه جرم بهینه به دست آید. مطالعه‌ی پارامتریک در دو بخش تحریک هارمونیک و زلزله‌ی ال سنتر (۱۹۴۰) انجام شده و نتایج به دست آمده مطابقت خوبی با نتایج مطالعات پیشین داشته است. در ادامه، با تعیین جرم بهینه، مطابق با روش معرفی شده، برای یک سازه‌ی یک درجه آزادی غیرخطی معادل با قاب ۳ طبقه SAC تأثیر رفتار غیرخطی در عملکرد میراگر بررسی شده است.

۲. معادلات حرکت

معادله‌ی حرکت حاکم بر سیستم دو جرمی سازه و میراگر تحریک شده با شتاب پایه‌ی \ddot{u}_g (شکل ۱)، به صورت رابطه‌ی ۱ است. m ، k و c ، به ترتیب جرم، سختی و میرایی سازه‌ی یک درجه آزادی و m_d ، k_d و c_d نیز مشخصات جرم ثانویه را نشان می‌دهند. \ddot{u} و \dot{u} به ترتیب تغییر مکان، سرعت و شتاب سازه، \ddot{u}_d و \dot{u}_d نیز تغییر مکان و شتاب نسبی میراگر نسبت به سازه هستند.

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + ku + c\dot{u} = -m_d\ddot{u}_g - m_d\ddot{u} - m_d\ddot{u}_d \quad (1)$$

رابطه‌ی ۱ را می‌توان به فرم رابطه‌ی ۲ نیز نوشت:

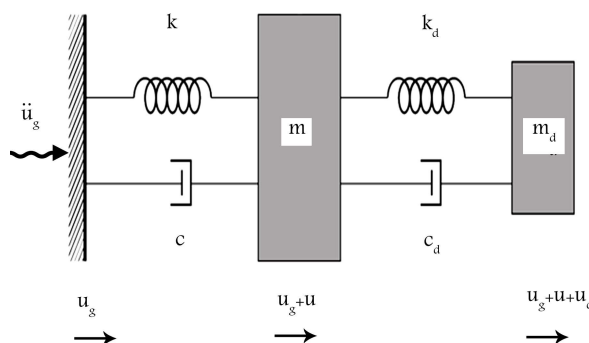
$$(m + m_d)\ddot{u} + ku + c\dot{u} = - (m + m_d)\ddot{u}_g - m_d\ddot{u}_d \quad (2)$$

با ضرب طرفین رابطه‌ی ۲ در \dot{u} ، رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$(m + m_d)\dot{u}\ddot{u} + ku\dot{u} + c\dot{u}^2 = - (m + m_d)\dot{u}_g\dot{u} - m_d\dot{u}_d\dot{u} \quad (3)$$

در نهایت با متوسط‌گیری از رابطه‌ی ۳، نتیجه را می‌توان به شکل بالانس انرژی بازنویسی کرد (رابطه‌ی ۴):

$$(m + m_d)E[\dot{u}\ddot{u}] + kE[u\dot{u}] + cE[\dot{u}^2] = - \underbrace{(m + m_d) \cdot E[\dot{u}_g\dot{u}]}_A - \underbrace{m_d E[\dot{u}_d\dot{u}]}_B \quad (4)$$



شکل ۱. سیستم دو جرمی سازه و میراگر.

رشد مجاز ۲٪ را نشان می‌دهد:

$$A_{j+1} = \min \left\{ 1.08, \left\{ \frac{\|E_j\| - \|E_{j-1}\| \times 100}{\|E_{j-1}\| \times (Y)} \right\}^{-0.005} \right\} \quad (9)$$

براساس روابط ارائه شده، پایه‌ی ضریب اصلاح‌کننده (β) یک پارامتر مؤثر در جرم میراگر است و براساس میزان رشد انرژی مازاد در گام قبل تغییر می‌کند؛ به عبارت دیگر، اگر رشد مازاد در هر گام از مقدار مجاز تجاوز کند، β جلوی رشد را می‌گیرد و بالعکس. محدود کردن β به ۱٫۰۸ قید دیگری است که روی β اعمال شده است.

همان‌طور که در رابطه‌ی ۱۰ مشاهده می‌شود، نمای ضریب اصلاح (α_{j+1}) تابع دیگری از انرژی مازاد است و سرعت هم‌گرایی را کنترل می‌کند. وقتی E_j نزدیک به صفر (مقدار مطلوب در مطالعه) شود، α_{j+1} نیز به صفر میل می‌کند و ضریب اصلاح تقریباً برابر ۱ می‌شود و تغییرات جرم کُند می‌شود و اگر E_j خیلی بزرگ شود، مقدار توان به α میل می‌کند:

$$\alpha_{j+1} = \frac{|E_j|}{1 + |E_j|} \times \alpha \quad (10)$$

در هر مسئله‌ی بهینه‌یابی با توجه به تحریک اعمالی به سازه مقادیر انرژی مازاد متفاوت است، برای اینکه هم‌گرایی به جرم بهینه در تعداد تکرار کمتری به‌وقوع بپیوندد، باید مقدار مناسبی برای α انتخاب شود. در این پژوهش، مقدار مذکور در بازه $[0, -1]$ قرار داشته است.

۱.۴. تحریک هارمونیک

وقتی پاسخ حالت پایدار تحت تحریک هارمونیک را در نظر می‌گیریم، با توجه به اینکه مقدار $E[j \cdot y]$ و $E[y \cdot y]$ برابر صفر می‌شود، رابطه‌ی ۴ به صورت رابطه‌ی ۱۱ در می‌آید:

$$cE[\dot{u}'] = -(m + m_d) \cdot E[\ddot{u}_g \dot{u}] - m_d E[\ddot{u}_d \dot{u}] \quad (11)$$

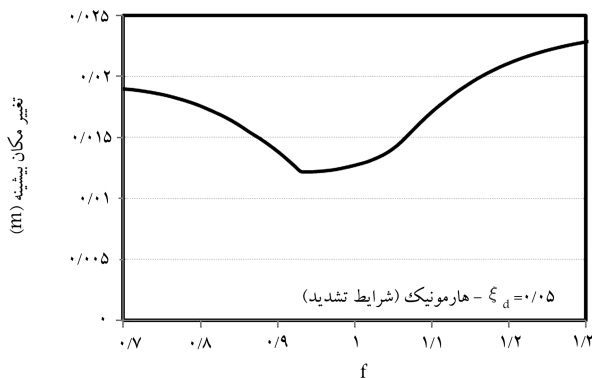
که در آن، عبارت سمت چپ تساوی، انرژی تلف‌شده‌ی ناشی از میرایی سازه است. در نتیجه در این حالت عملکرد بهینه TMD، یعنی بیشترین جریان انرژی از سازه به میراگر، معادل با کمینه‌شدن پاسخ متوسط مربعات سرعت سازه است. [۱۴] در این حالت، جریان انرژی معادل یک انرژی اتلافی مؤثر است، که میرایی مؤثر کل در سازه را افزایش می‌دهد.

تحریک هارمونیک به شکل سینوسی و برای در نظر گرفتن شرایط رزونانس، با بسامدی برابر با بسامد سازه انتخاب شده است، لذا نسبت بسامد تحریک برابر ۱ است. مدت دوام آن ۷ ثانیه است و به صورت شتاب به پای سازه اعمال شده است. در نتیجه اثرات ناشی از خاک منطقه اعمال نشده است. مطالعات پارامتری در این بخش برای مقادیر معلوم نسبت میرایی میراگر $\xi_d = 5\%$ و سختی فذر $k_d = 163570 \text{ kg/m}$ انجام شده است، که برای نمونه، نتایج یک جست‌وجو با جرم اولیه‌ی 200 kg (معادل 5% جرم کل سازه)، مطابق جدول ۱ است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نسبت بسامد تنظیم (نسبت بسامد میراگر به بسامد سازه) تقریباً نزدیک به ۱ به دست آمده است، که با نتایج مطالعات انجام شده در این زمینه مطابقت دارد.

تغییرات جرم میراگر در طی جست‌وجو، بسامد میراگر را تغییر می‌دهد؛ در نتیجه نسبت بسامد نیز در حال تغییر است. پس در طی جست‌وجو، برای نسبت‌های مختلف تنظیم، تغییر مکان بیشینه‌ی سازه کنترل و انرژی متناظر تعیین شده است، که به ترتیب روند تغییرات آن‌ها در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که روند تغییرات مازاد انرژی و تغییر مکان شباهت زیادی دارند و با نزدیک شدن انرژی

جدول ۱. مشخصات میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی بهینه.

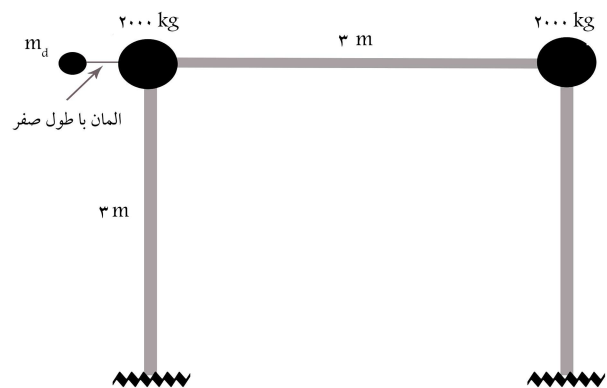
جرم بهینه (m_{opt})	۹۱٫۱۷ kg
نسبت بسامد تنظیم (f)	۰٫۹۳۷
نسبت جرم (μ)	۰٫۲۲۸
نسبت میرایی (ξ_d)	۰٫۰۵



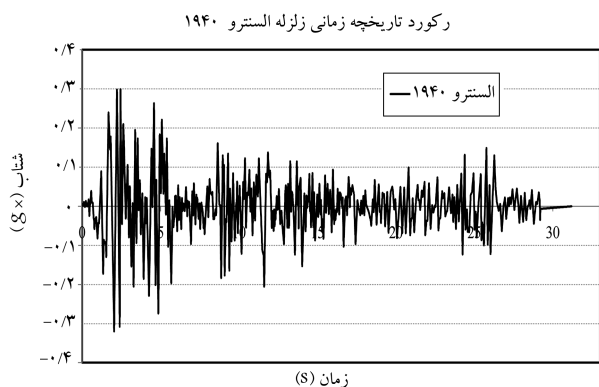
شکل ۳. تغییرات تغییر مکان بیشینه در مقابل نسبت تنظیم.

۴. مدل یک درجه آزادی خطی

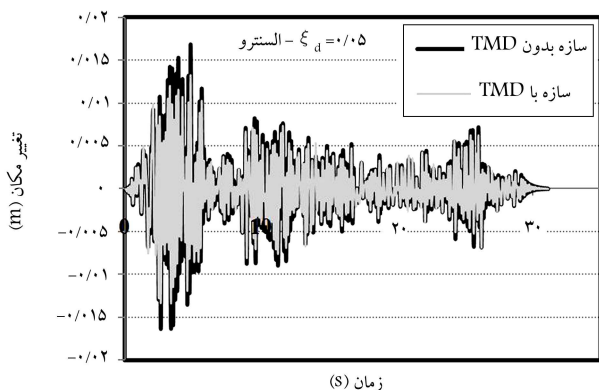
مدل ساده‌ی یک درجه آزادی مورد استفاده در این مطالعه، یک قاب ۱ طبقه با المان‌های تیرستون خطی است (شکل ۲)، که در دو بخش تحت تحریک پایه‌ی هارمونیک و رکورد زلزله قرار گرفته است. در این مدل، پای ستون‌ها گیردار و در محل اتصال تیر به ستون‌ها نیز دو جرم متمرکز 2000 kg کیلوگرمی در نظر گرفته شده است، دوره‌ی تناوب سازه برابر 0.14 s ثانیه است. میرایی ذاتی سازه برابر 5% و به صورت میرایی رایلی مدل شده است. مدل‌سازی با نرم‌افزار OpenSees V2.4.0 و با ارتباط بین نرم‌افزار (R2a) $7.14 \cdot 0.739$ و Matlab پردازش روی اطلاعات خروجی و جست‌وجوی عددی انجام شده است.



شکل ۲. مدل قاب خطی یک درجه آزادی.



شکل ۶. رکورد زلزله‌ی ال سنترو (۱۹۴۰).

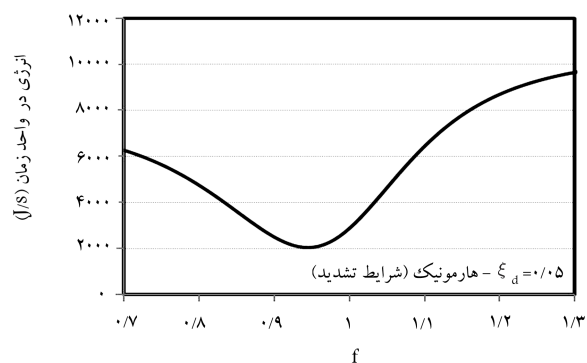


شکل ۷. تاریخچه‌ی زمانی پاسخ سازه با و بدون میراگر در شرایط بهینه تحت زلزله‌ی ال سنترو (۱۹۴۰).

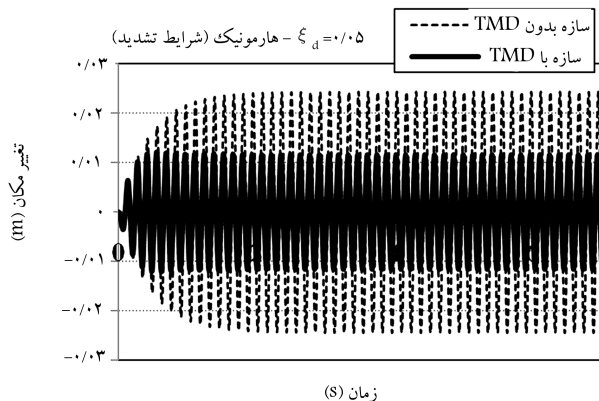
رکورد مذکور از دسته زلزله‌های دور^۴ است و پهنای باند بسامدی باریک و مدت دوام زیادی دارد. از آنجایی که محتوای زلزله مانند تحریک هارمونیک، تک بسامدی نیست، لذا در اینجا نسبت بسامد تحریک تعریف نشده است.

در این بخش نیز همانند روش گفته شده برای تحریک هارمونیک، جست‌وجوی جرم بهینه برای مقادیر معلوم نسبت میرایی و سختی فتر و با جرم اولیه‌ی ۴۰۰ کیلوگرم معادل نسبت جرم ۱۰٪ بررسی شده است، که برای نمونه نتایج مربوط به میرایی ۵٪ ارائه شده است. همچنین پاسخ سازه بدون میراگر و با میراگر بهینه‌ی مشخص شده از جست‌وجو در شکل ۷ نشان داده شده است، البته همان‌طور که انتظار می‌رفت، اثربخشی TMD در برابر زلزله به خوبی تحریک هارمونیک نیست و کاهش تغییرمکان بیشینه در این حالت به ۲۱٪ کاهش یافته است. مشخصات میراگر جرمی بهینه نیز در جدول ۳ ارائه شده است. در این حالت نیز نسبت تنظیم از ۱ فاصله گرفته است.

در این بخش نیز جهت اعتبارسنجی روش مورد استفاده، از روابط ارائه شده برای f_{opt} و ξ_d^{opt} توسط سادک^۵ و همکارانش (۱۹۹۷)^[۱۸] استفاده شده است. آن‌ها این روابط را برای یک سیستم یک درجه آزادی با میرایی تحت شتاب پایه‌ی زلزله به دست آورده‌اند. در اینجا نیز از همان روش گفته شده در بخش هارمونیک استفاده شده و نتایج برای بازه‌ی از نسبت‌های تنظیم به دست آمده و مقایسه شده است، که در جدول ۴ ارائه شده است. با مقایسه‌ی جرم بهینه‌ی به دست آمده از این مطالعه و جرم به دست آمده از رابطه‌ی سادک و همکاران^[۱۸] و تغییرمکان‌های متناظر این جرم‌ها مشاهده می‌شود که با جرم‌هایی بیشتر نسبت به نتایج سادک، کاهش بیشتری در تغییرمکان‌های بیشینه به دست می‌آید. با استفاده از روش گفته شده برای زلزله‌های



شکل ۴. تغییرات انرژی مازاد در مقابل نسبت تنظیم.



شکل ۵. تاریخچه‌ی زمانی پاسخ سازه با و بدون میراگر در شرایط بهینه تحت تحریک هارمونیک.

به مقدار کمیته، تغییرمکان نیز به مقدار کمیته میل می‌کند، یعنی نقطه‌ی هدف و جرم متناظر این نقطه همان جرم بهینه‌ی میراگر است.

جرم بهینه‌ی به دست آمده در طی جست‌وجو که در جدول ۱ ذکر شده است، تغییرمکان بیشینه‌ی سازه را از ۲۴۴ متر به ۱۲۲ متر کاهش داده است (۵۰٪ کاهش) که این کاهش در شکل ۵ نشان داده شده است.

به منظور اعتبارسنجی روش به کار برده شده در این مطالعه، بازه‌ی از نسبت‌های بسامد (f) بین ۰/۸۵ تا ۰/۹۹ در نظر گرفته شده است، سپس برای هر کدام از f_i ‌های متعلق به این بازه، براساس رابطه‌ی بیکرو و جنگید^[۱۹] که برای نسبت f_{opt} سیستم یک درجه آزادی با میرایی تحت شتاب پایه ارائه کرده‌اند، مقدار μ با تکرار و سعی و خطا به دست آمده است. سپس با جایگذاری μ به دست آمده، ξ_d^{opt} متناظر این نسبت جرم نیز به دست می‌آید. همچنین با توجه به اینکه $k_d = m d f^2 \omega^2$ پس برای هر کدام از f_i ‌ها، هم مقدار سختی میراگر و هم نسبت میرایی متناظر آن مشخص است، و جست‌وجو به دنبال جرم بهینه‌ی آن (m_{opt}) انجام می‌شود. ω بسامد طبیعی سیستم سازه است. در ادامه، نتایج این جست‌وجو در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج با دقت خوبی به نتایج مطالعه‌ی بیکرو و جنگید^[۱۹] نزدیک است.

۲.۴. تحریک زلزله

مطالعات پارامتری که در بخش هارمونیک انجام شده است، در این بخش نیز تکرار شده است؛ با این تفاوت که سازه تحت شتاب پایه‌ی مؤلفه‌ی شمالی - جنوبی زلزله‌ی ال سنترو (۱۹۴۰) (شکل ۶) قرار گرفته است. علت انتخاب این رکورد این است که

جدول ۲. مقايسه‌ى ميراگر بهينه‌ى مطالعه‌ى حاضر و مطالعه‌ى بېكر و جنگيد،^[۱۰] و پاسخ‌هاى متناظر.

نسبت تنظيم	جرم (kg) (بېكر و جنگيد)	جرم (kg) (مطالعه‌ى حاضر)	تغييرمكان بېشینه (بېكر و جنگيد)	تغييرمكان بېشینه (مطالعه‌ى حاضر)
۰٫۸۵	۳۸۹٫۷۲	۳۸۰٫۹۰	۰٫۰۰۸۳	۰٫۰۰۸۲
۰٫۸۶	۳۵۶٫۴۴	۳۴۶٫۵۳	۰٫۰۰۸۵	۰٫۰۰۸۴
۰٫۸۷	۳۲۳٫۶۶	۳۱۴٫۷۸	۰٫۰۰۸۷	۰٫۰۰۸۷
۰٫۸۸	۲۹۱٫۴۱	۲۷۹٫۸۸	۰٫۰۰۹۰	۰٫۰۰۹۰
۰٫۸۹	۲۵۹٫۷۴	۲۵۵٫۵۳	۰٫۰۰۹۳	۰٫۰۰۹۳
۰٫۹۰	۲۲۸٫۷۱	۲۲۵٫۴۵	۰٫۰۰۹۷	۰٫۰۰۹۷
۰٫۹۱	۱۹۸٫۳۹	۱۹۶٫۴۰	۰٫۰۱۰۱	۰٫۰۱۰۱
۰٫۹۲	۱۶۸٫۸۷	۱۶۹٫۰۴	۰٫۰۱۰۶	۰٫۰۱۰۶
۰٫۹۳	۱۴۰٫۲۸	۱۳۹٫۸۰	۰٫۰۱۱۲	۰٫۰۱۱۲
۰٫۹۴	۱۱۲٫۷۹	۱۱۰٫۹۷	۰٫۰۱۲۰	۰٫۰۱۲۰
۰٫۹۵	۸۶٫۶۲	۸۷٫۲۲	۰٫۰۱۲۹	۰٫۰۱۲۹
۰٫۹۶	۶۲٫۱۴	۶۲٫۹۹	۰٫۰۱۴۱	۰٫۰۱۴۱
۰٫۹۷	۳۹٫۸۶	۴۰٫۶۸	۰٫۰۱۵۷	۰٫۰۱۵۷
۰٫۹۸	۲۰٫۶۹	۲۰٫۷۵	۰٫۰۱۷۹	۰٫۰۱۷۹
۰٫۹۹	۶٫۲۵	۶٫۳۳	۰٫۰۲۱۱	۰٫۰۲۱۱

جدول ۳. مشخصات ميراگر جرمى تنظيم شده‌ى بهينه.

جرم بهينه (m_{opt})	۲۱۹٫۵ kg
نسبت بسامد تنظيم (f)	۰٫۶۰۴
نسبت جرم (μ)	۰٫۰۵۴۹
نسبت ميراىى (ξ_d)	۰٫۰۵

نورثريج، كوبه، و طيس نيز ميراگرهاى بهينه يافت شده و عملكرد ميراگرهاى بهينه در هر كدام از اين زلزله‌ها با يكديگر مقايسه شده است، كه نتايج مربوط به آن در شكل ۸ نشان داده شده است.

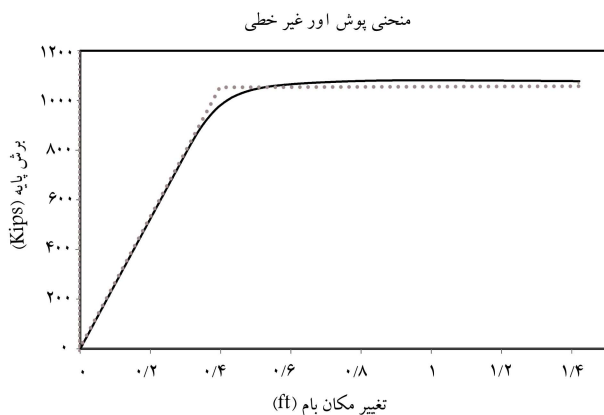
در شكل ۸ مشاهده مى‌شود كه نسبت تنظيم متناظر به ميراگر جرمى تنظيم شده‌ى بهينه براى هر كدام از زلزله‌ها متفاوت است. همچنين اثربخشى آن‌ها در كاهش پاسخ سازه متفاوت است. لذا به دليل محتواى بسامدى متفاوت زلزله‌ها نياز به مطالعه‌ى جامع‌تر بر روى تعداد بيشترى از ركوردها احساس مى‌شود. هدف اين نوشتار، فقط

جدول ۴. مقايسه‌ى ميراگر بهينه‌ى مطالعه‌ى حاضر و مطالعه‌ى سادك،^[۱۸] و پاسخ‌هاى متناظر.

نسبت تنظيم	جرم (kg) (مطالعه‌ى سادك)	جرم (kg) (مطالعه‌ى حاضر)	تغييرمكان بېشینه (مطالعه‌ى سادك)	تغييرمكان بېشینه (مطالعه‌ى حاضر)
۰٫۸۵	۶۱۹٫۷۰	۶۲۷٫۰۲	۰٫۰۱۵۴	۰٫۰۱۵۳
۰٫۸۶	۵۶۹٫۰۹	۶۰۰٫۴۹	۰٫۰۱۵۵	۰٫۰۱۵۲
۰٫۸۷	۵۱۹٫۷۴	۵۹۱٫۶۰	۰٫۰۱۵۵	۰٫۰۱۵۰
۰٫۸۸	۴۷۱٫۶۴	۵۴۳٫۶۵	۰٫۰۱۵۶	۰٫۰۱۴۹
۰٫۸۹	۴۲۴٫۷۶	۵۱۳٫۷۴	۰٫۰۱۵۶	۰٫۰۱۴۸
۰٫۹۰	۳۷۹٫۰۶	۴۶۸٫۷۷	۰٫۰۱۵۶	۰٫۰۱۴۶
۰٫۹۱	۳۳۴٫۵۵	۴۱۷٫۸۵	۰٫۰۱۵۶	۰٫۰۱۴۲
۰٫۹۲	۲۹۱٫۲۰	۳۸۷٫۸۰	۰٫۰۱۵۵	۰٫۰۱۳۷
۰٫۹۳	۲۴۹٫۰۱	۳۶۱٫۰۰	۰٫۰۱۵۵	۰٫۰۱۳۰
۰٫۹۴	۲۰۸٫۰۱	۳۲۲٫۱۴	۰٫۰۱۵۴	۰٫۰۱۲۶
۰٫۹۵	۱۶۸٫۲۳	۲۹۴٫۴۰	۰٫۰۱۵۳	۰٫۰۱۲۸
۰٫۹۶	۱۲۹٫۷۴	۲۶۴٫۱۴	۰٫۰۱۵۶	۰٫۰۱۳۱
۰٫۹۷	۹۲٫۶۸	۲۳۸٫۸۸	۰٫۰۱۵۸	۰٫۰۱۳۲
۰٫۹۸	۵۷٫۳۷	۲۰۰٫۰۰	۰٫۰۱۶۱	۰٫۰۱۲۱
۰٫۹۹	۲۴٫۶۱	۱۷۸٫۰۵	۰٫۰۱۶۷	۰٫۰۰۷۳

جدول ۵. مشخصات پوش‌آور سازی ۳ طبقه و سازی معادل.

ξ_s	T_1 (sec)	M (kips)	X_u (ft)	X_y (ft)	V_y (kips)	SAC ^۳
۰٫۰۵	۱٫۰۱۶	۱۰۱	۱٫۴۲۱	۰٫۳۸۸	۱۰۲۰	
ξ_s	T^* (sec)	M^* (kips)	u_u (ft)	u_y (ft)	q_y (kips)	SDOF _{eq}
۰٫۰۵	۱٫۰۱۶	۶۸٫۷۷	۱٫۱۲۳	۰٫۳۰۷	۸۰٫۷۴	

شکل ۹. منحنی پوش‌آور سازی SAC^۳.

جدول ۶. مشخصات میراگر بهینه.

جرم بهینه (m_{opt})	۱٫۷۲ kips
نسبت بسامد تنظیم (f)	۰٫۹۴۵
نسبت جرم (μ)	۰٫۰۲۵
نسبت میرایی (ξ_d)	۰٫۰۸

۱.۵. تحریک هارمونیک

در این بخش یک تحریک سینوسی با بسامدی برابر با بسامد مدل یک‌درجه آزادی (شرایط تشدید) و با مدت دوام ۵ ثانیه به پای سازه اعمال شده است. برای بررسی اثر شدت تحریک در عملکرد TMD بازه‌ی از شدت‌ها در نظر گرفته شده است (رابطه‌ی ۱۳).

$$a_g = Amp \times g \times \sin \Omega t$$

$$Amp = [0/001 : 0/001 : 0/15]$$

$$g = 32/185 \text{ ft/sec}^2$$

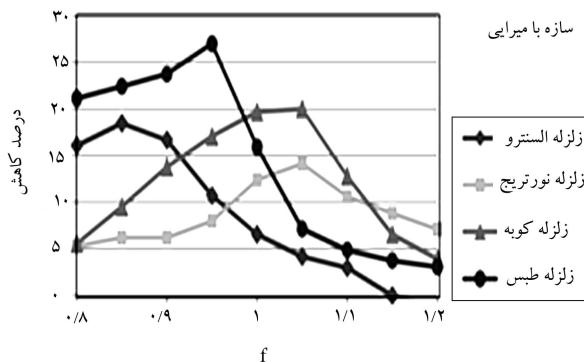
$$\Omega = 6/184 \text{ rad/sec} \quad (13)$$

برای بیان بهتر نتایج، شدت ورودی با استفاده از رابطه‌ی ۱۴ نرمالیزه شده است، که از آن با عنوان «شتاب نرمال» یاد و در نمودارها با Normal.PGA نمایش داده می‌شود. همچنین TMD بهینه‌ی با استفاده از روش گفته‌شده در مدل خطی طراحی شده است، که پارامترهای بهینه‌ی آن مطابق با جدول ۶ است:

$$\text{Normal.PGA} = \frac{\max |a_g|}{q_y/M^*} \quad (14)$$

با انجام آنالیزهای تاریخی‌چهی زمانی متعدد هر بار برای Amp_i مشخص متعلق به بازه‌ی تعریف‌شده، تغییرمکان بیشینه‌ی متناظر برای سازی بدون میراگر و با میراگر به‌طور جداگانه تحت ورودی‌های هارمونیک و زلزله‌ی ال‌سنترو قرار گرفته و در ادامه، به نتایج به‌دست‌آمده پرداخته شده است.

درصد کاهش تغییر مکان بیشینه



شکل ۸. درصد کاهش تغییرمکان بیشینه‌ی سازه تحت چند زلزله‌ی مختلف و برای شرایط تنظیم میراگر جرمی بهینه.

بررسی امکان استفاده از روش معرفی‌شده برای بهینه‌یابی میراگر در عملکردهای لرزه‌ی است.

۵. مدل غیرخطی

در این قسمت قاب ۳ طبقه‌ی SAC که براساس گزارش FEMA۳۵۵E^[۱۹] مدل شده است، با یک مدل یک‌درجه‌ی آزادی غیرخطی معادل جایگزین شده است. برای این کار، قاب ۳ طبقه‌ی موردنظر تحت آنالیز پوش‌آور با الگوی بار مثالی معکوس قرار گرفته و مشخصات پوش‌آور غیرخطی آن مشخص شده است.

منحنی برش پایه در مقابل تغییرمکان بام به‌صورت شکل ۹ به‌دست آمده است، که با رفتار کشسان کاملاً خمیری (EPP)، مدل یک‌درجه‌ی آزادی معادل جایگزین شده است (خط‌چین). مشخصات پوش‌آور سازی ۳ طبقه و سازی معادل آن نیز در جدول ۵ ارائه شده است.

برای تبدیل تغییرمکان بام سازه به تغییرمکان سازی یک‌درجه‌ی آزادی از رابطه‌ی ۱۲ استفاده شده است:^[۲۰]

$$u(t) = \frac{\phi^T M \phi}{\phi^T M \{1\}} X(t) \quad (12)$$

در جدول ۵، X_u و X_y ، V_y به ترتیب برش پایه‌ی تسلیمی، تغییرمکان تسلیم و تغییرمکان نهایی سازی ۳ طبقه و q_y ، u_u و u_y نیز مقادیر متناظر در سازی معادل را نشان می‌دهند. در ادامه، به منظور بررسی عملکرد TMD در محدوده‌ی رفتار غیرخطی سازه، مطالعه‌ی بی‌رویی این سازی معادل صورت گرفته است. سازه به‌طور جداگانه تحت ورودی‌های هارمونیک و زلزله‌ی ال‌سنترو قرار گرفته و در ادامه، به نتایج به‌دست‌آمده پرداخته شده است.

می‌تواند از ۰ تا ۱ تغییر کند، که به ترتیب مربوط به درجه‌ی خسارت سازه‌ی بدون آسیب و در آستانه‌ی فروریزش است.

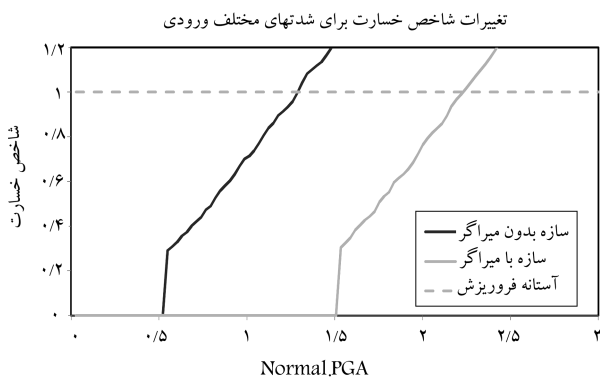
بر این اساس در مدل یک درجه آزادی مورد مطالعه، شاخص خسارت نیز در بازه‌ی مورد نظر از تحریک ورودی محاسبه شده است. در شکل ۱۲، تغییرات شاخص خسارت برای سازه با و بدون میراگر رسم شده است. ملاحظه می‌شود که در سازه‌ی بدون میراگر، در شتاب نرمال تقریباً ۰/۱۳ شاخص خسارت محاسبه شده به ۱ (آستانه‌ی فروریزش) می‌رسد، در حالی که در سازه با میراگر، فروریزش در شتاب نرمال تقریباً ۰/۲۳ اتفاق می‌افتد. پس اگر چه کارایی TMD در کاهش پاسخ بسیار کاهش می‌یابد، ولی همچنان از فروریختن سازه جلوگیری و این مزیت، استفاده از آن را به خوبی روشن می‌کند.

۲.۵. تحریک زلزله‌ی ال سنتر

در اینجا TMD بهینه‌ی با نسبت جرم ۰/۲۵، با استفاده از روابط ارائه شده توسط هوانگ و همکاران، [۲۵] طراحی شده است. پارامترهای بهینه‌ی میراگر مطابق جدول ۷ است، که در ادامه از آن به عنوان «میراگر مرجع» یاد شده است.

همچنین با استفاده از رابطه‌ی جست‌وجوی بهینه که در ابتدا معرفی شده است، TMD بهینه‌ی این مطالعه با تغییرات شدت ورودی مشخص شده است، به این معنی که برای هر آنالیز تاریخی زمانی به‌ازاء Amp_i مشخص متعلق به بازه‌ی تعریف شده، جرم بهینه جست‌وجو شده است. در ادامه، از این میراگر به عنوان «میراگر بهینه» یاد شده است.

تغییر مکان بهینه برای سازه‌ی بدون میراگر و با میراگر مرجع و با میراگر بهینه، به‌طور جداگانه به‌دست آمده است. در شکل ۱۳، منحنی پوش تغییر مکان بهینه در حالت‌های سازه‌ی بدون میراگر، سازه با میراگر مرجع و میراگر بهینه رسم شده است. مشاهده می‌شود که به‌کارگیری TMD، تأثیر کمی در جلوگیری از ورود به رفتار غیرخطی دارد. سازه در هر ۳ حالت تقریباً در شتاب نرمال ۰/۹۵ وارد محدوده‌ی غیرخطی شده است.



شکل ۱۲. شاخص خسارت برای سازه با و بدون میراگر در شدت‌های مختلف تحریک هارمونیک.

جدول ۷. مشخصات میراگر بهینه‌ی مرجع.

جرم بهینه (m_{opt})	۱/۷۲ kips
نسبت بسامد تنظیم (f)	۰/۹۳۶
نسبت جرم (μ)	۰/۰۲۵
نسبت میرایی (ξ_d)	۰/۰۹

برای شدت‌های مختلف ورودی و در دو حالت سازه با و بدون میراگر رسم شده است. به خوبی مشاهده می‌شود که به‌کارگیری TMD، ورود به رفتار غیرخطی را از شتاب نرمال تقریباً ۰/۰۵ به شتاب نرمال تقریباً ۰/۱۵ انتقال می‌دهد.

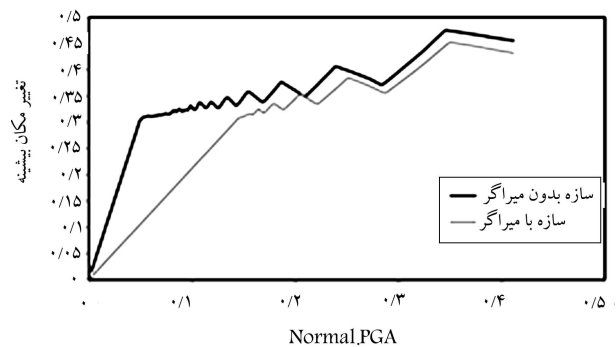
همچنین شکل ۱۱ نیز تأثیر غیرخطی شدن سازه در اثربخشی میراگر در کاهش تغییر مکان بیشینه را نشان می‌دهد، به‌گونه‌ی که در شدت‌های کم، سازه به صورت خطی رفتار می‌کند و کاهش پاسخ تقریباً ۶۵٪ است، با افزایش شدت تحریک و ورود به ناحیه‌ی غیرخطی این منحنی کاهش می‌یابد، تا جایی که وقتی رفتار غیرخطی شد، دیگر در مقدار ۱۰٪ تقریباً ثابت می‌ماند.

از آنجایی که معیار کاهش پاسخ بهینه در سازه‌های غیرخطی برای بررسی اثربخشی TMD به‌تنهایی کافی نیست، [۲۶، ۲۷] از معیار کاهش خسارت برای ارزیابی اثربخشی میراگر استفاده شده است. شاخص خسارت پیشنهاد شده توسط پارک و همکارانش، [۲۳] برای مقادیر خسارت استفاده شده است، که به صورت عمومی مطابق رابطه‌ی ۱۵ است:

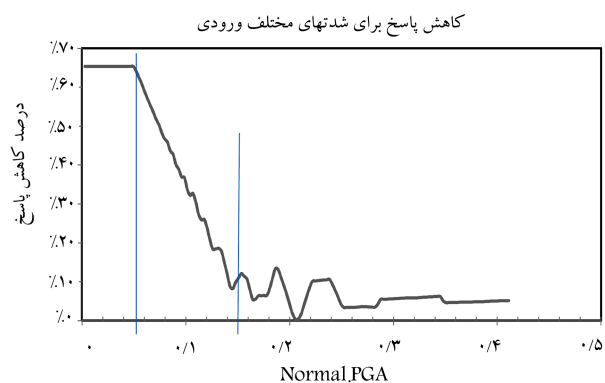
$$DI = \frac{u_m^*}{u_u^*} + \beta \frac{\int dE}{u_u^* V_y} \quad (15)$$

که در آن، u_m^* و u_u^* به ترتیب، تغییر مکان بیشینه و نهایی بام، $\int dE$ انرژی هیستریزس تجمعی سازه، V_y برش پایه‌ی تسلیم سازه، و β پارامتر زوال مقاومت هستند. پارامتر β مطابق با کار کیمپولی و همکاران، [۲۴] برابر ۰/۲۷ اختیار شده است. معادله‌ی خسارت مذکور برای خسارت ناشی از تغییر مکان بیشینه‌ی غیرکشسان و خسارت تجمعی ناشی از خستگی با چرخه‌ی کم محاسبه شده است، مقدار DI

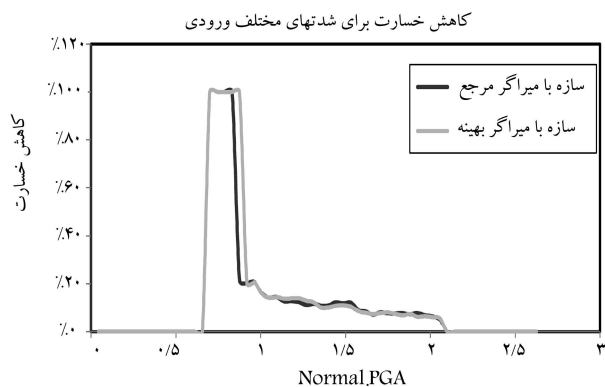
تغییرات تغییر مکان بیشینه برای شدتهای مختلف ورودی



شکل ۱۰. اثر شدت تحریک در تغییر مکان بیشینه در سازه‌ی تحت تحریک هارمونیک.



شکل ۱۱. اثر شدت تحریک در درصد کاهش پاسخ ناشی از به‌کارگیری TMD تحت تحریک هارمونیک.



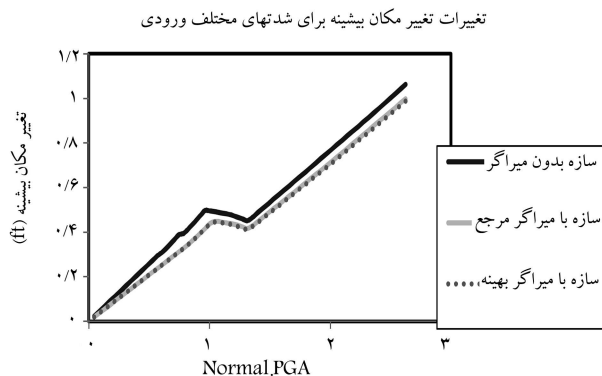
شکل ۱۶. درصد کاهش خسارت برای میراگر مرجع و بهینه در شدت‌های مختلف تحریک زلزله‌ی ال‌سنسترو (۱۹۴۰).

در شکل ۱۶ نیز درصد کاهش خسارت ناشی از به‌کارگیری میراگر مرجع و بهینه مقایسه شده است. تا قبل از شتاب نرمال ۰/۸، سازه بدون میراگر کشتان باقی می‌ماند. تقریباً از شتاب نرمال ۰/۸ تا ۰/۹ هر دو میراگر کاملاً از خسارت جلوگیری می‌کنند، ولی بعد از آن به مرور کارایی‌شان در کاهش خسارت کاهش می‌یابد، تا جایی که در شتاب نرمال ۲/۱ دیگر سازه با میراگر هم به آستانه‌ی فروریزش یعنی شاخص خسارت ۱ می‌رسد.

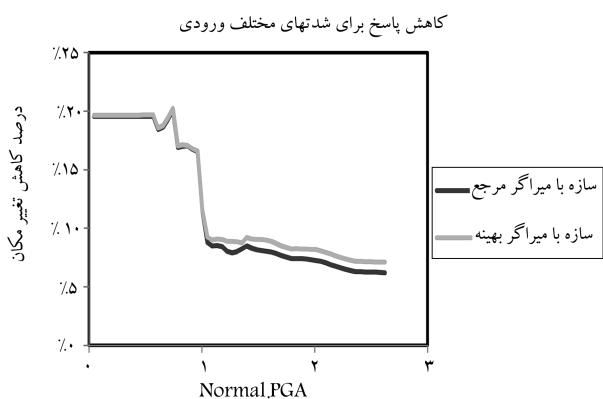
۶. نتیجه‌گیری

از دیدگاه انرژی، هدف از به‌کارگیری TMD، به بیشینه‌رساندن جریان انتقالی انرژی به میراگر است، که متناظر با کمینه‌سازی انرژی مازاد سیستم مرکب و تغییر مکان بیشینه‌ی سازه است. بر این اساس در این مطالعه رابطه‌ی معرفی شده و با در نظر گرفتن کرانی برای جرم میراگر به‌عنوان مقدار اولیه، در یک مدل ساده‌ی یک درجه آزادی با رفتار خطی مجهز به TMD، جست‌وجوی عددی هدف‌داری جهت یافتن جرم بهینه صورت گرفته است. مطالعه‌ی پارامتریک در دو بخش تحریک هارمونیک و زلزله‌ی ال‌سنسترو (۱۹۴۰) انجام شده و نتایج به‌دست‌آمده ضمن مطابقت با نتایج مطالعات پیشین حاکی از مفید بودن روش به‌کار گرفته شده است. کاهش پاسخ تغییر مکان بیشینه در حالت تحریک هارمونیک حدود ۵۰٪ بوده است، در حالی‌که این میزان برای زلزله‌ی ال‌سنسترو به ۲۱٪ کاهش یافته است.

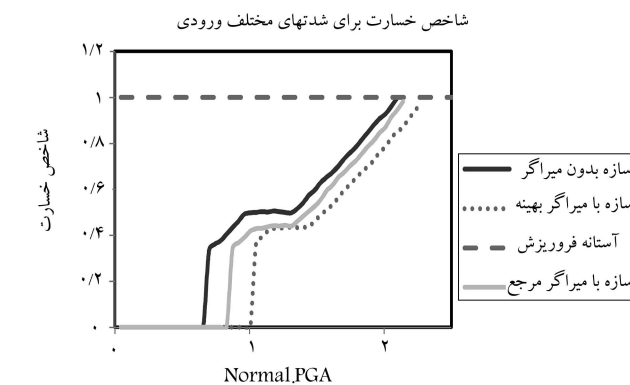
با مطالعه بر روی رفتار غیرخطی سازه‌ی معادل قاب ۳ طبقه‌ی SAC تحت شدت‌های مختلف ورودی تحریک هارمونیک مشخص شده است که بیشترین کارایی TMD در کاهش پاسخ مربوط به ناحیه‌ی رفتاری خطی است. در تحلیل نتایج مربوط به تحریک هارمونیک با ورود به ناحیه‌ی رفتار غیرخطی، درصد کاهش پاسخ از ۶۵٪ به ۱۰٪ کاهش یافته است. برای زلزله‌ی ال‌سنسترو (۱۹۴۰)، این میزان از ۲۵٪ به زیر ۱۰٪ کاهش یافته است. با وجود این، به‌کارگیری میراگر ورود به ناحیه‌ی غیرخطی را به تأخیر می‌اندازد و ضمن کاهش خسارت وارده به سازه، رسیدن به آستانه‌ی فروریزش را نیز به تأخیر می‌اندازد. در مورد تحریک زلزله‌ی ال‌سنسترو (۱۹۴۰) نیز نتیجه‌ی تقریباً مشابه به‌دست آمده است، با این تفاوت که کنترل سازه در مقابل خسارت در ناحیه‌ی غیرخطی کمتر از حالت هارمونیک بوده است. کارایی روش ذکر شده برای تحریک هارمونیک و زلزله، مزیت آن به حساب می‌آید، اما با توجه به ماهیت بسامدی متغیر زلزله، نیاز به مطالعات جامع‌تری در این زمینه در مورد رکوردهای بیشتر و یا استفاده از تحریک‌های تصادفی احساس می‌شود.



شکل ۱۷. اثر شدت تحریک در تغییر مکان بیشینه در سازه‌ی تحت تحریک ال‌سنسترو (۱۹۴۰).



شکل ۱۸. اثر شدت تحریک در درصد کاهش پاسخ ناشی از به‌کارگیری TMD تحت زلزله‌ی ال‌سنسترو (۱۹۴۰).



شکل ۱۹. شاخص خسارت برای سازه با و بدون میراگر در شدت‌های مختلف تحریک زلزله‌ی ال‌سنسترو (۱۹۴۰).

در شکل ۱۹ نیز مشاهده می‌شود که با ورود سازه به ناحیه‌ی رفتار غیرخطی، اثربخشی میراگر در کاهش پاسخ از ۲۰٪ به زیر ۱۰٪ کاهش یافته است، با وجود این، در ناحیه‌ی غیرخطی عملکرد «میراگر بهینه» بهتر از «میراگر مرجع» به نظر می‌رسد.

در شکل ۱۵ ملاحظه می‌شود که به‌کارگیری TMD رسیدن به آستانه‌ی فروریزش را تا حدی کنترل می‌کند و همچنین عملکرد میراگر بهینه در کنترل خسارت تا حدودی بهتر از میراگر مرجع است.

پانوشته‌ها

1. tuned mass damper
2. Connor
3. particle swarm
4. far field
5. Sadek
6. elastic perfectly plastic (EPP)

منابع (References)

1. Frahm, H., "Device for damping vibrations of bodies," U.S. Patent No.989958, (in Persain) (1909).
2. Connor, J.J., *Introduction to Structural Motion Control*, 1st ed., Prentice Hall (2002).
3. DenHartog, J.P., *Mechanical Vibrations*, 4th ed., New York, McGraw-Hill (1956).
4. Bishop, R.E.D. and Welbourn, D.B. "The problem of the dynamic vibration absorber", *Engineering (London)*, pp. 174-769 (1952).
5. Snowdown, J.C. "Steady-state behavior of the dynamic absorber", *Acoust. Soc. Am.*, **31**(8), pp. 1096-1103 (1960).
6. Falcon, K.C., Stone, B.J., Simcock, W.D. and Andrew, C. "Optimization of vibration absorbers: A graphical method for use on idealized systems with restricted damping", *Mech Eng. Sci.*, **9**(5), pp. 374-381 (1967).
7. Ioi, T. and Ikeda, K. "On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system", *Bull JSME*, **21**(151), pp. 64-71 (1978).
8. Randall, S.E., Halsted, D.M. and Taylor, D.L. "Optimum vibration absorbers for linear damped systems", *J. Mech. Des.*, *ASME*, **103**(4), pp. 908-913 (1981).
9. Warburton, G.B. and Ayorinde, E.O. "Optimum absorber parameters for simple systems", *Earthquake Eng Struct Dynam*, **8**(3), pp. 197-217 (1980).
10. Bakre, S.V. and Jangid, R.S. "Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system", *Struct Control Health Monitoring*, **14**(3), pp. 448-470 (2007).
11. Greco, R., Marano, G.C. and Chiaia, B. "A comparison between different optimization criteria for tuned mass dampers design", *Journal of Sound and Vibration*, **329**(23), pp. 4880-4890 (2010).
12. Bekdas, G. and Nigdeli, S.M. "Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search", *Engineering Structures*, **33**(9), pp. 2716-2723 (2011).
13. Leung, A.Y.T. and Zhang, H. "Particle swarm optimization of tuned mass dampers", *Engineering Structures*, **31**(3), pp. 715-728 (2009).
14. Soong, T.T. and Dargush, G.F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, UK, John Wiley & Sons, Ltd. (1997).
15. Karami Mohammadi, R., El naggar, M.H. and Moghaddam, H. "Optimum strength distribution for seismic resistant shear buildings", *International Journal of Solids and Structures*, **41**(22-23), pp. 6597-6612 (2004).
16. Moghaddam, H., *On the Optimum Performance-Based Design of Structures*, in U.S. Iran Seismic Workshop, pp. 175-203 (2009).
17. Garoosi, M.R. "Modifying the uniform distribution of deflection method in optimum seismic rehabilitation of vulnerable structures", M.Sc Thesis, Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology (2014).
18. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W. and Chung, R.M. "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic application", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**(6), pp. 617-635 (1997).
19. FEMA-355E, *State of the Art Report on Systems Performance of Steel Moment Frames Subject to Earthquake Ground Shaking*, Prepared for SAC Joint Venture Partnership by Helmut, Federal Emergency Management Agency (September 2000).
20. Fajfar, P. and Fischinger, M. "N2 a method for non-linear seismic analysis of regular buildings", *Presented at the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan (1988).
21. Lukkunaprasit, P. and Wanitkorkul, A. "Inelastic buildings with tuned mass dampers under moderate ground motions from distant earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **30**(4), pp. 537-551 (2001).
22. Pinkaew, T., Lukkunaprasit, P. and Chatupote, P. "Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures", *Engineering Structures*, **25**(1), pp. 39-46 (2003).
23. Park, Y.J. and Ang, A.H.S. "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete", *Journal of Structural Engineering*, **111**(4), pp. 722-739 (1985).
24. Ciampoli, M., Giannini, R., Nuti, C. and Pinto, P.E. "Seismic reliability of non-linear structures with stochastic parameters by directional simulation", *International Conference on Structural Safety and Reliability*, San Francisco, pp. 1121-1128 (1989).
25. Hoang, N., Fujino, Y. and Warnitchai, P. "Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical design formulas", *Engineering Structures*, **30**(3), pp. 707-715 (2008).