مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۶، شماره‌ی ۳، ص. ۷۳-۸۰

بررسی پاسخ‌های پیچشی ساختمان‌های نامتقارن با استفاده از میراگر جرمی تنظیمی

امیرحسن محمودی (کارشناس ارشد)
عبدالرضا سروقد مقدم (استادیار)
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

یکی از اثرات زلزله بر ساختمان‌ها پدیده‌ی پیچش است. راهبردهای گوناگونی به‌منظور کاهش این اثر ارائه شده‌اند که یکی از آنها کنترل سازه‌ها با کمک میراگرهایی نظیر میراگر جرمی تنظیمی است. تحقیقاتی که برای کنترل پدیده‌ی پیچش با استفاده از این میراگر انجام شده عموماً مبتنی بر استفاده از چند میراگر بوده است. در این بررسی یک نوع میراگر جرمی تنظیمی غیرفعال برای کنترل پیچش در ساختمان‌های نامتقارن تک‌محوره که تحت تحریک زلزله قرار می‌گیرند پیشنهاد شده است. بدین‌ترتیب که سختی و میرایی این سیستم، به دو فنر و دو میرایی تقسیم شده، بر لبه‌های نرم و سخت ساختمان قرار می‌گیرند تا اثر میراگر به پیرامون ساختمان منتقل شود. نتایج حاصل از تحلیلِ هفت زلزله‌ی حوزه‌ی دور نشان‌گر این است که سیستم پیشنهادی قابلیت کاهش پیچش ساختمان را داشته، به‌ویژه بر کاهش تغییر مکان نسبی لبه‌ی نرم اثر آشکارتری دارد.

واژگان کلیدی: میراگر جرمی تنظیمی، پیچش، ساختمان نامتقارن، لبه‌ی نرم و سخت، کنترل غیرفعال.

amirhasanmahmoodi@yahoo.com
moghadam@iiees.ac.ir

مقدمه

در تحقیقات مختلف نشان داده شده است که میراگرهای جرمی تنظیمی ازجمله ابزار کنترل سازه‌اند که در محدوده‌ی رفتار ارتجاعی و در حالت تشدید با سازه عملکرد بسیار خوبی در کاهش تغییر مکان‌های جانبی و جذب ارتعاشات ساختمان‌ها از خود نشان داده‌اند؛ به‌طوری که در سراسر جهان و برای نمونه‌های متعدد و قابل توجهی به‌کار گرفته شده‌اند. ساختار عمومی این میراگر متشکل از جرم، فنر و میراگر لزج است که برحسب نیازهای مختلف تغییراتی در اجزاء آن پیشنهاد و اجرا شده است. تحقیقات و کاربردهای این میراگر عموماً برای تحریک باد بوده است در حالی که برای استفاده از آنها در کاربردهای زلزله اتفاق نظری به چشم نمی‌خورد. تحقیقات بسیاری در مورد این میراگرها به‌منظور کنترل حرکات جانبی ساختمان بدون در نظر گرفتن اثر پیچش انجام شده است. در عین حال تحقیقات معدود ولی ارزشمندی در زمینه ساختمان‌های نامتقارن انجام شده که به‌اختصار به برخی از آنها اشاره می‌شود.

در سال ۱۹۹۷، بر یک سیستم دو درجه آزادی (جانبی و پیچشی) که تحت تحریک اغتشاش سفید واقع شده بود، تعداد ۲۱ میراگر جرمی تنظیمی (با سختی و نسبت میرایی ثابت ولی جرم‌های متفاوت) قرار داده شد و آن را به‌صورت پارامتریک بررسی کردند.[۱] یکی از نتایج این بررسی آن است که سیستم نامتقارن مفروض چنانچه چندمیراگر باشد عملکرد بهتری از میراگر منفرد دارد. همچنین با افزایش خروج از مرکزیت، مزیت نسبی چندمیراگر در مقایسه با میراگر منفرد کم می‌شود.

در تحقیقات سال ۱۹۹۹، به‌منظور کنترل پیچش از دو میراگر جرمی که در دو امتداد متعامد حرکت می‌کنند و بر بام ساختمان برشی نصب شده‌اند (با خروج از مرکزیت یکسان برای تمام طبقات) استفاده شد.[۲] یکی از نتایج این بررسی آن است که با دو جرم مساوی کاهش ارتعاشات بیشتر است، و نیز هرچه فاصله‌ی میراگرها از مرکز جرم بام بیشتر باشد کاهش ارتعاشات بیشتر خواهد بود. نتایج نظری با یافته‌های حاصل از تحلیل با پنج شتاب‌نگاشت ال سنترو، تفت، سن فرناندو، مکزیکوسیتی و کوبه که به ۰٫۳۵g مقیاس شده بودند، تطابق داشت.

در سال ۲۰۰۲ به‌منظور کنترل پاسخ‌های همبسته‌ی جانبی - پیچشی از چهار میراگر جرمی که دو به دو در دو امتداد متعامد حرکت می‌کنند و بر بام یک ساختمان چند طبقه‌ی پیچشی قرار داشتند، استفاده شد.[۳] این بررسی متأثر از دو تحقیقِ پیش‌گفته، و در دسته مطالعات با کاربرد چندمیراگر قرار می‌گیرد. پارامترهای بهینه‌ی طرح به‌کمک الگوریتم ژنتیک به‌دست آمدند.

در سال ۲۰۰۳ نیز از چهار میراگر جرمی تنظیمی که در اطراف مرکز جرم بام قرارگرفته‌اند استفاده شد تا ضمن کنترل مودهای ارتعاشیِ خمشی، مودهای ارتعاشیِ پیچشی را نیز کنترل کنند.[۴] در این تحقیق هم برای تعیین طرح بهینه‌ی سیستم جاذب از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. تحریک ورودی چهار زلزله‌ی ال‌سنترو، کوبه، هاچینوهه و نورتریج بودند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که این راهبرد کنترلی علاوه بر پاسخ‌های خمشی سازه، قابلیت کنترل مؤثر پاسخ‌های پیچشی را نیز دارد.

در تحقیقات داخلی سال ۱۳۸۳، با هدف کاهش پاسخ‌های جانبی ساختمان‌ها (خطی و غیرخطی) مدل‌شده در نرم‌افزار درین، نسبت به جداسازی بام اقدام به عمل آمد[۵] و در نهایت نشان داده شد که ایده‌ی جداسازی بام در کاهش

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۲/۲۸، داوری ۱۳۸۷/۱۰/۳، پذیرش ۱۳۸۸/۱۲/۸.

پاسخ‌های جانبی محدوده‌ی رفتار غیرخطی نیز موفق است. در سال ۱۳۸۴ نیز با تأکید بر کاهش پیچش در محدوده‌ی رفتار غیر خطی (و البته خطی) برای دو ساختمان فولادی ۸ و ۱۵ طبقه با کمک دو میراگر جرمی،[۶] این نتیجه‌ی کلی به دست آمد که تفاوت تأثیر یک یا دو میراگر بر کاهش پاسخ‌ها خیلی چشم‌گیر نیست.

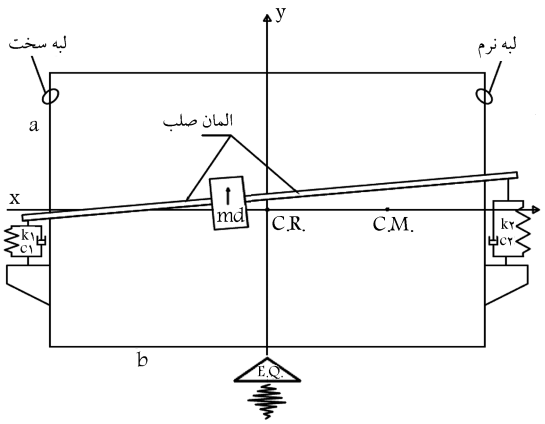
از مطالعه‌ی تحقیقات یادشده نکات قابل توجهی دریافت می‌شود. اکثر این تحقیقات درمورد کنترل پیچش به‌وسیله‌ی میراگر جرمی تنظیمی، در محدوده‌ی رفتار ارتجاعی سازه‌ها بوده‌اند؛ زیرا تأثیر مثبت این میراگر به‌دلیل تغییر فرکانس در محدوده‌ی رفتار غیرارتجاعی و وقوع پدیده‌ی ناتنظیمی مجموعه‌ی سازه- میراگر کاهش می‌یابد. تعلق بیشتر این تحقیقات به کاربردهای زلزله بیان‌گر آن است که اگرچه زلزله به‌دلیل کوتاه بودن زمان وقوع و عدم ایجاد تشدید مناسب با سازه، تحریک مناسبی برای سیستم‌های دارای میراگر جرمی تنظیمی محسوب نمی‌شود، این میراگر در تحقیقات مذکور عملکرد مثبتی داشته است.

معرفی سیستم میراگر استفاده‌شده در این تحقیق

در این بررسی از یک میراگر جرمی تنظیمی منفرد غیرفعال که در آن تغییراتی داده شده استفاده می‌شود. بدین‌ترتیب که این میراگر برای مود اول ساختمان نامتقارن تنظیم شده و مقادیر جرم (m_d)، سختی (k_d) و میرایی (c_d) آن به دست می‌آیند. آنگاه برای این که اثر جرم و فنر و میرایی به هر دو لبه‌ی نرم و سخت منتقل شود، فنر و میرایی آن به دو جزء فنر و دو جزء میرایی کوچک‌تر تقسیم می‌شود. بنابراین سیستم میراگر جرمی تنظیمی پیشنهادی در این بررسی متشکل خواهد بود از: جرم (m_d)، یک فنر و میرایی جزئی (k_1, c_1) روی لبه‌ی سخت، و یک فنر و میرایی جزئی (k_2, c_2) که روی لبه‌ی نرم قرار می‌گیرند (شکل ۱). مجموع سختی دو فنر جزئی کوچک‌تر برابر با سختی کل (k_d)، و مجموع دو میرایی جزئی کوچک‌تر برابر با میرایی کل (c_d) آن سیستم میراگر جرمی تنظیمی منفرد اولیه است. با این فرض که تمام قسمت‌های این سیستم با یک رابط صلب به یکدیگر متصل‌اند تا اثر آن جرم و فنرها و میرایی‌ها به دو لبه‌ی سخت و نرم منتقل شوند، سیستم مذکور روی بام ساختمان قرار می‌گیرد.

از آنجا که هدف کنترل و کاهش حرکت جانبی ـ پیچشی ساختمان است باید پارامترهای این سیستم در بهترین حالت به دست آیند. این پارامترها عبارت‌اند از: نسبت جرمی، نسبت فرکانسی، نسبت میرایی، محل جرم روی پلان، محل مرکز توزیع سختی و محل مرکز توزیع میرایی این سیستم روی پلان.

برای تعیین مقادیر بهینه‌ی نسبت جرم و فرکانس و میرایی روش‌های مختلفی ازجمله بهینه‌سازی با کمک الگوریتم‌های ژنتیک یا میانگین مربع پاسخ‌ها[۱] به‌کار گرفته شده است. براساس نتایج تحلیلی در تحقیقات انجام‌شده با موضوع [۸و۷] میراگر



شکل ۱. طرح شماتیک سیستم میراگر جرمی تنظیمی غیر فعال پیشنهادی.

جرمی تنظیمی (TMD)[۲] اغلب نتایج حاکی از این هستند که مناسب‌ترین نسبت جرم میراگر به جرم مود کنترل‌شونده‌ی سازه و نسبت میرایی میراگر به‌ترتیب بین ۱ تا ۴ درصد و ۲۰ تا ۳۰ درصد هستند. همچنین نسبت فرکانس میراگر به فرکانس مود تنظیم‌شونده بین ۰/۹ و ۱ در تغییر است. البته این مقادیر برای شرایط مختلف ممکن است متفاوت باشد. بنابراین با استناد به نتایج به دست آمده در تحقیقات گذشته، نسبت‌های جرمی (μ) و فرکانسی (f) و میرایی (ξ_d) میراگر جرمی تنظیم‌شونده‌ی منفرد غیر فعال اولیه، در این تحقیق چنین انتخاب شدند: نسبت جرمی μ در این بررسی برابر با ۳ درصد فرض شد. بدین‌معنی که نسبت جرم سیستم میراگر به جرم مؤثر مود اول ساختمان نامتقارن (با هر درصدی از خروج از مرکزیت) برابر با ۳ درصد است؛ نسبت فرکانسی f برای تمام ساختمان‌های نامتقارن برابر با ۹۶ درصد فرض شد. مقدار سختی کل سیستم میراگر جرمی تنظیمی منفرد اولیه از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$k_d = m_d(f\omega_{1b})^2 \qquad (1)$$

نسبت میرایی میراگر منفرد غیر فعال اولیه (ξ_d) برای تعیین ضریب میرایی آن، برابر با ۲۷ درصد فرض شد. ضریب میرایی کل سیستم میراگر جرمی تنظیمی منفرد اولیه از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$c_d = 2m_d(f\omega_{1b})\xi_d \qquad (2)$$

در روابط یادشده ω_{1b} فرکانس مود اول ساختمان نامتقارن است. برخی از مشخصات دینامیکی ساختمان‌های مورد مطالعه و میراگرها در جداول ۱ تا ۳ ارائه شده‌اند.

از آنجا که میراگر جرمی تنظیمی در این بررسی فقط با مود اول هر ساختمان نامتقارن تنظیم شده و مود اول نیز در امتداد y است، طبیعی است که در سایر مودها و به‌ویژه مودهای ارتعاشی راستای x که با میراگر هماهنگ نیستند تغییری ایجاد

جدول ۱. مشخصات سیستم میراگرجرمی تنظیمی منفرد اولیه و ساختمان‌های نامتقارن.

ساختمان نامتقارن با خروج از مرکزیت (٪)	شماره‌ی مود	ω (r/sec)	جرم مؤثر مودی $Kgf.s^2/m$	m_d $kgf.s^2/m$	k_d kgf/m	c_d kgf.s/m
۰	۱	۱۰/۹۱۶	۱۶۷۷۳	۵۰۳	۵۵۲۳۴	۲۸۴۷
۱۰	۱	۱۰/۵۷۶	۱۵۹۱۲	۴۷۷	۴۹۱۷۴	۲۶۱۵
۲۰	۱	۹/۸۳۶	۱۴۸۵۵	۴۴۶	۳۹۷۶۳	۲۲۷۴
۳۰	۱	۹/۰۹۴	۱۴۸۱۶	۴۴۵	۳۳۹۱۳	۲۰۹۸

جدول ۲. مقایسه زمان تناوب مودهای ساختمان‌های بدون میراگر و با میراگر متقارن (ثانیه).

خروج از مرکزیت سازه	e.c.c.=٪۰ (symm.)		e.c.c.=٪۱۰ (۱٫۲m)		e.c.c.=٪۲۰ (۲٫۴m)		e.c.c.=٪۳۰ (۳٫۶m)	
مود شماره	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	با میراگر
۱	۰٫۵۷۶	۰٫۶۵۵	۰٫۵۹۴	۰٫۶۷	۰٫۶۳۹	۰٫۷۰۹	۰٫۶۹۱	۰٫۷۵۹
۲	۰٫۴۸۱	۰٫۵۲۸	۰٫۴۷۹	۰٫۵۵۲	۰٫۴۷۹	۰٫۶۰۴	۰٫۴۷۸	۰٫۶۶
۳	۰٫۳۷۶	۰٫۴۸۱	۰٫۳۹	۰٫۴۷۹	۰٫۳۶	۰٫۴۷۹	۰٫۳۰۵	۰٫۴۷۸
۴	۰٫۱۷۴	۰٫۳۷۶	۰٫۱۷۹	۰٫۳۸۹	۰٫۱۹	۰٫۳۵۸	۰٫۲۰۴	۰٫۳۰۳
۵	۰٫۱۲۳	۰٫۱۷۴	۰٫۱۲۳	۰٫۱۷۹	۰٫۱۲۳	۰٫۱۹	۰٫۱۲۳	۰٫۲۰۴
۶	۰٫۱۰۷	۰٫۱۲۳	۰٫۱۱۲	۰٫۱۲۳	۰٫۱۰۶	۰٫۱۲۳	۰٫۱۰۹	۰٫۱۲۳
۷	۰٫۰۹۴	۰٫۱۰۷	۰٫۰۹۶	۰٫۱۱۲	۰٫۱	۰٫۱۰۶	۰٫۰۸۸	۰٫۱۰۹
۸	۰٫۰۵۵	۰٫۰۹۴	۰٫۰۵۶	۰٫۰۹۶	۰٫۰۵۵	۰٫۱	۰٫۰۵۵	۰٫۰۸۸
۹	۰٫۰۵۳	۰٫۰۵۵	۰٫۰۵۵	۰٫۰۵۶	۰٫۰۵۳	۰٫۰۵۵	۰٫۰۴۵	۰٫۰۵۵
۱۰	-	۰٫۰۵۳	-	۰٫۰۵۵	-	۰٫۰۵۳	-	۰٫۰۴۵

جدول ۳. مقایسه‌ی ضرایب مشارکت مودی ساختمان‌های بدون میراگر و با میراگر متقارن در جهت Y .

خروج از مرکزیت سازه	e.c.c.=٪۰ (symm.)		e.c.c.=٪۱۰ (۱٫۲m)		e.c.c.=٪۲۰ (۲٫۴m)		e.c.c.=٪۳۰ (۳٫۶m)	
مود شماره	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	با میراگر
۱	۱۳۰	−۹۴	۱۲۶	۹۲	۱۲۲	۸۸	−۱۲۲	−۸۶
۲	۰	−۹۱	۰	−۸۹	۰	۸۷	۰	۸۹
۳	۰	۰	−۳۰	۰	−۴۴	۰	−۴۶	۰
۴	۴۷	۰	−۴۶	−۳۱	۴۴	−۴۵	−۴۲	−۴۶
۵	۰	۴۷	۰	−۴۶	۰	−۴۴	۰	−۴۲
۶	۰	۰	۱۱	۰	−۲۴	۰	۲۷	۰
۷	−۲۵	۰	۲۴	۱۱	−۱۴	−۲۴	−۱۰	۲۷
۸	۰	−۲۵	۴	۲۴	۰	−۱۴	۰	−۱۰
۹	۰	۰	۰	۴	−۶	۰	۶	۰
۱۰	-	۰	-	۰	-	−۶	-	−۶

نمی‌کند. چنان که در این جدول‌ها دیده می‌شود مودهای اول دچار تغییر شده‌اند و این حاکی از تأثیر میراگر است.

ساختمان مورد بررسی یک ساختمان سه‌طبقه‌ی فولادی با ابعاد کلی ۸ متر (a) در ۱۲ متر (b) است که ارتفاع هر طبقه‌ی آن ۳ متر می‌باشد (شکل ۱). ساختمان دارای دیافراگم صلب است و سیستم مقاوم آن در برابر نیروهای جانبی در هر دو امتداد متعامد از نوع قاب خمشی فولادی ویژه‌اند. بارهای مرده و زنده برای طبقات به‌ترتیب برابر ۵۰۰ و ۲۰۰ و برای بام به‌ترتیب برابر با ۴۵۰ و ۱۵۰ $\mathrm{kgf/m^2}$ در نظر گرفته شدند. این ساختمان در حالت کاملاً متقارن طراحی شد. از آنجا که ناسازه‌ها در مدل در نظرگرفته نشدند، نسبت میرایی ساختمان برای تمام مودها در محدوده‌ی رفتار خطی و غیرخطی برابر ۲ درصد فرض شد. مدل‌سازی اثر پیچش براساس نامتقارنی جرم نسبت به سختی ساختمان انجام شد.[۹]

در این مطالعه از مؤلفه‌ی طولی (قوی‌تر) هفت زلزله‌ی حوزه‌ی دور که در خاک نوع ۲ رخ داده‌اند، استفاده شد. این زلزله‌ها عبارت‌اند از: چی‌چی ۱۹۹۹ (۰٫۴۸۲g)، ایمپریال‌ولی ۱۹۷۹ (۰٫۱۵۵g)، لندرز ۱۹۹۲ (۰٫۲۸۲g)، منجیل ۱۹۹۰ (۰٫۱۸۴g)، نورتریج ۱۹۹۴ (۰٫۲۴۷g)، سن فرناندو ۱۹۷۱ (۰٫۲۳۵g) و کرن‌کانتی (تفت) ۱۹۵۲ (۰٫۱۴۸g). همه‌ی زلزله‌ها به ۰٫۳۵g مقیاس شدند.

ملاک این بررسی‌ها، میانگین پاسخ‌های حاصل از هفت شتاب‌نگاشت بوده است. از آنجا که مرکز جرم کل ساختمان‌های نامتقارن بر روی محور x و در جهت مثبت آن تغییر می‌کند، زلزله‌ها در امتداد y و عمود بر محور x وارد شدند.

چگونگی بررسی‌ها

پس از تعیین جرم، سختی و میرایی کل سیستم میراگر جرمی تنظیمی منفرد اولیه، به‌منظور تعیین بهترین محل جرم (m_d) و بهترین توزیع سختی‌ها و میرایی‌های (k_1, k_2, c_1, c_2) یک سلسله تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی خطی و غیرخطی، با اولویت کاهش بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی به شرح زیر انجام شد:

الف) **حالت‌های M:** محل مرکزهای سختی و میرایی سیستم میراگر روی محوری که از مرکز تقارن (همان مرکز سختی) ساختمان و عمود بر صفحه‌ی دیافراگم می‌گذرد (محور z) ثابت باشند؛ ولی محل جرم سیستم میراگر در موقعیت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد بعد بزرگ ساختمان (b) نسبت به این محور و در سمت

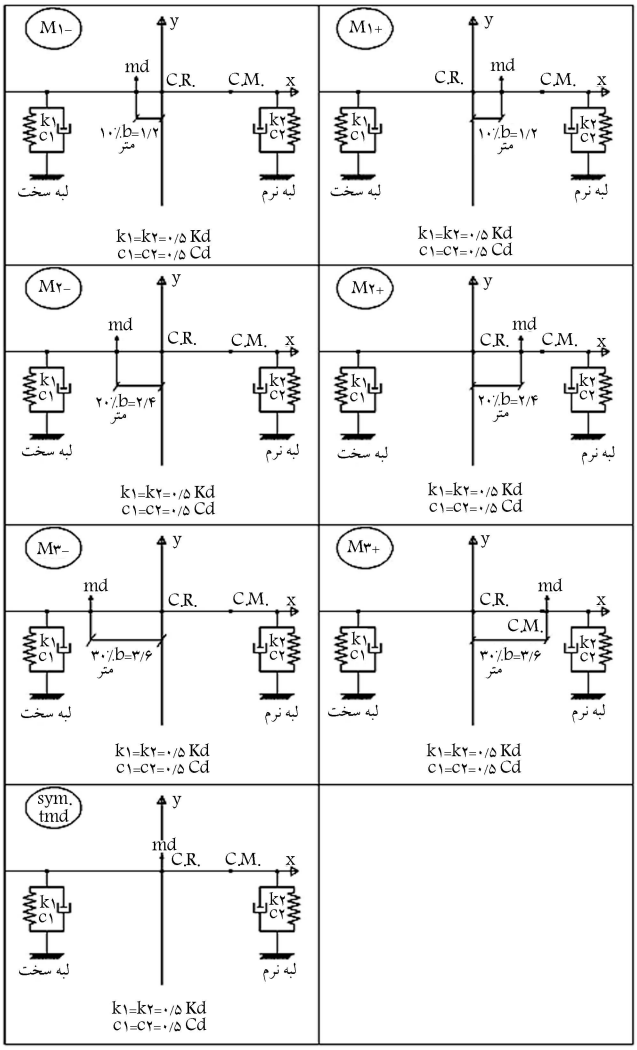
چپ و راست آن (یعنی در سمت منفی و مثبت محور x) قرارگیرد. این حالت‌ها $M3-, M2-, M1-, M1+, M2+, M3+$ نامیده شدند (شکل ۲).

ب) **حالت‌های K**: محل جرم و مرکز میرایی سیستم میراگر روی محور مذکور در بند الف ثابت باشند، ولی مرکز سختی آن روی موقعیت‌های یادشده قرارگیرد. این حالت‌ها $K3-, K2-, K1-, K1+, K2+, K3+$ نامیده شدند (مشابه شکل ۲ ولی به‌جای توزیع جرم، توزیع سختی انجام شده است).

ج) **حالت‌های C**: محل جرم و مرکز سختی سیستم میراگر روی محور مذکور در بند الف ثابت باشند، ولی مرکز میرایی آن روی موقعیت‌های یادشده قرار گیرد. این حالت‌ها $C3-, C2-, C1-, C1+, C2+, C3+$ نامیده شدند (مشابه شکل ۲ ولی به‌جای توزیع جرم، توزیع میرایی انجام شده است).

افزون براین، برای تمام ساختمان‌های نامتقارن، حالت میراگر متقارن که در آن محل جرم، مرکز سختی و میرایی سیستم میراگر بر مرکز تقارن ساختمان منطبق است نیز مورد بررسی قرار گرفت.

هدف از بررسی این حالات، مطالعه‌ی امکان کمینه‌کردن اختلاف بین نسبت تغییر مکان نسبی دو لبه‌ی نرم و سخت بود. به‌عبارت دیگر، بررسی امکان سوق‌دادن



شکل ۲. الگوی شماتیک تغییرات محل جرم سیستم میراگر.

حرکت جانبی ـ پیچشی به حرکت جانبی بود. چون دو فنر و دو میرایی وجود دارند، محل مرکز سختی و میرایی سیستم میراگر با توجه به روابط ۳ و ۴ تعیین شدند:

$$(k_1 x_1 + k_2 x_2) = X_{kd}(k_1 + k_2) \quad (۳)$$

$$(c_1 x_1 + c_2 x_2) = X_{cd}(c_1 + c_2) \quad (۴)$$

که در این روابط x_i فاصله‌ی سختی (یا میرایی) iام سیستم میراگر از یک محور مبنای فرضی (در این بررسی لبه‌ی سخت) بوده، و X_{kd} و X_{cd} به‌ترتیب مرکز سختی و مرکز میرایی سیستم مذکور هستند. سازه‌ی مورد نظر به‌صورت با/بدون میراگر تحلیل شد و پاسخ‌ها با هم مقایسه شدند. برای مدل‌سازی فنرها و میرایی‌ها، و نیز تحلیل مدل از گزینه‌ی Link نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ استفاده شد. جرم میراگر در جهت y (m_y) در نظرگرفته شد، و نیز به‌منظور ایجاد رابط صلب سه گره تشکیل‌دهنده‌ی این میراگر، از قیدهای مناسب این برنامه استفاده شد. تحلیل گام‌به‌گام انتگرال‌گیری تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی براساس پیش‌فرض این برنامه، یعنی با روش H.H.T. و با تکیه بر مفاصل خمیری پیش‌فرض آن انجام شد.

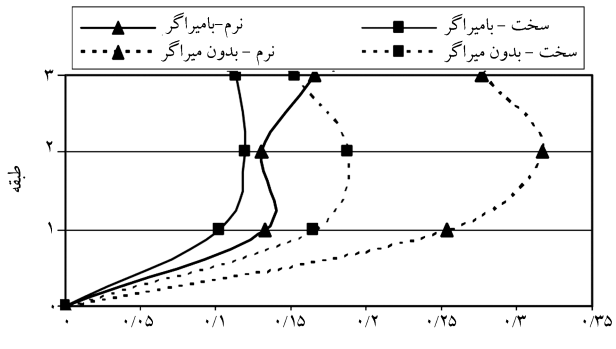
بررسی مشاهدات و نتایج تحلیل‌ها

بررسی بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی

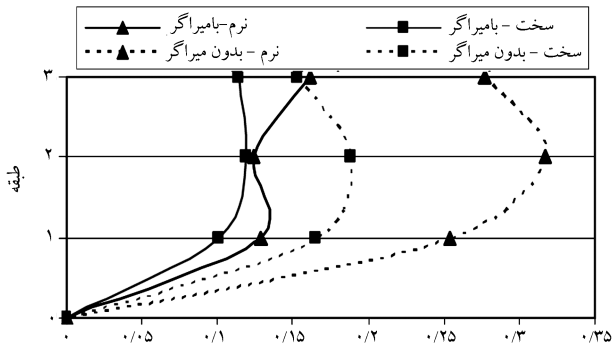
از آنجا که این مشاهدات در محدوده‌ی رفتار خطی و غیرخطی برای ساختمان‌های نامتقارن با خروج از مرکزیت ۲۰ و ۳۰ درصد مشابه ساختمان نامتقارن ۱۰ درصد بوده ولی از شدت کم‌تری برخوردارند (که این نشان‌گر کاهش تأثیر میراگر با افزایش خروج از مرکزیت ساختمان‌ها است)، به‌منظور رعایت اختصار در ادامه فقط نتایج به‌دست آمده برای ساختمان نامتقارن با خروج از مرکزیت ۱۰ درصد ارائه و ارزیابی می‌شوند.

با توجه به حاصل تحلیل خطی حالت‌های M (شکل ۳) دیده می‌شود که: اولاً هرچه محل جرم میراگر از مرکز تقارن ساختمان دور می‌شود اختلاف بین بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی کاهش‌یافته‌ی دو لبه‌ی نرم و سخت بیشتر می‌شود (که مطلوب نیست)؛ ثانیاً این اختلاف وقتی محل جرم میراگر به سمت لبه‌ی سخت پیش می‌رود بیشتر از وقتی است که به سمت لبه‌ی نرم نزدیک می‌شود. دلیل اتفاقات یادشده این است که همانند یک ساختمان نامتقارن که به‌دلیل اختلاف بین محل جرم و سختی‌اش، در آن لبه‌های نرم و سخت پدید می‌آیند، در سیستم میراگر نیز به‌هم خوردن تقارن محل جرم باعث می‌شود پاسخ کاهش‌یافته‌ی اولیه به‌تدریج زیاد شود و از تأثیر کاهنده‌ی میراگر کاسته شود.

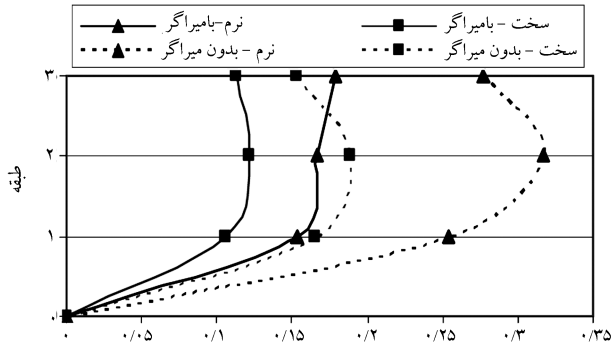
حاصل تحلیل خطی حالت‌های K که فقط دو حالت آن در شکل ۴ نشان داده شده بیان‌گر آن است که: اولاً هرچه محل مرکز سختی میراگر از مرکز تقارن ساختمان دور می‌شود اختلاف بین بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی کاهش‌یافته‌ی دو لبه‌ی نرم و سخت بیشتر می‌شود (که مطلوب نیست)؛ ثانیاً این اختلاف وقتی محل مرکز سختی میراگر به سمت لبه‌ی سخت پیش می‌رود با وقتی که به سمت لبه‌ی نرم نزدیک می‌شود تقریباً یکی است. دلیل اتفاقات یادشده این است که همانند یک ساختمان نامتقارن که به‌دلیل اختلاف بین محل جرم و سختی‌اش، در آن لبه‌های نرم و سخت پدید می‌آیند، در سیستم میراگر نیز به‌هم خوردن تقارن سختی باعث می‌شود پاسخ کاهش‌یافته‌ی اولیه به‌تدریج زیاد شود و از تأثیر کاهنده‌ی میراگر کاسته شود. از طرفی باید در نظر داشت هرگاه محل مرکز سختی میراگر به هر لبه نزدیک شود، پاسخ آن لبه به‌تدریج زیاد می‌شود، و در حالی که پاسخ آن لبه را کم می‌کند



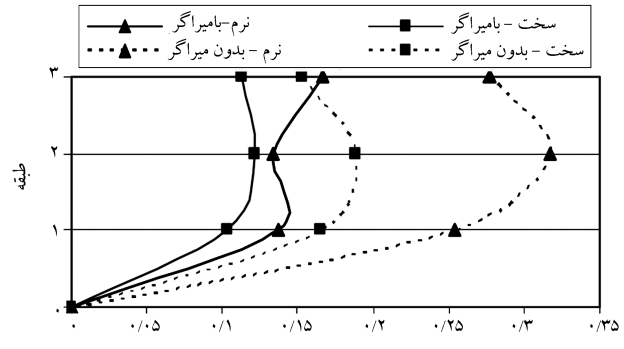
الف) -M۱،



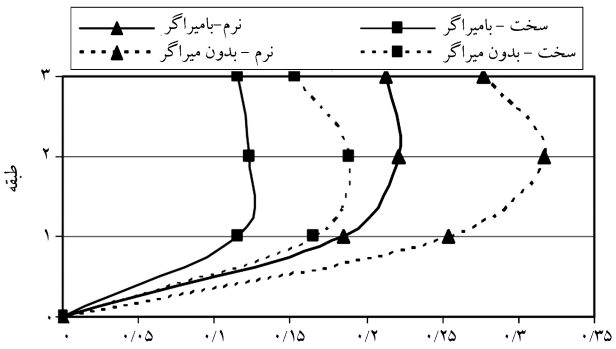
د) +M۱،



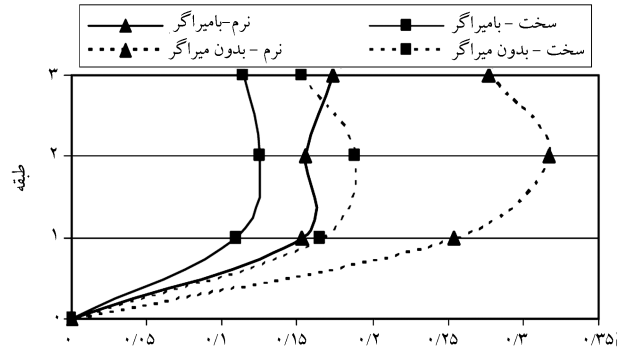
ب) -M۲،



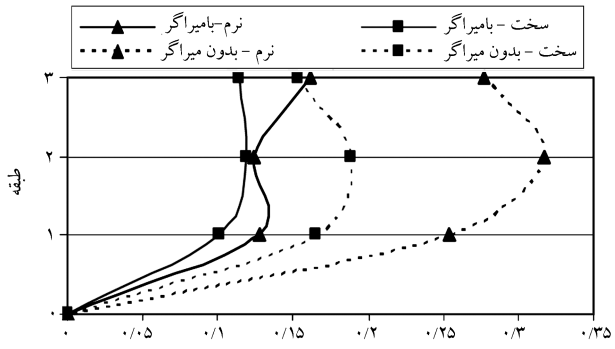
ه) +M۲،



ج) -M۳،

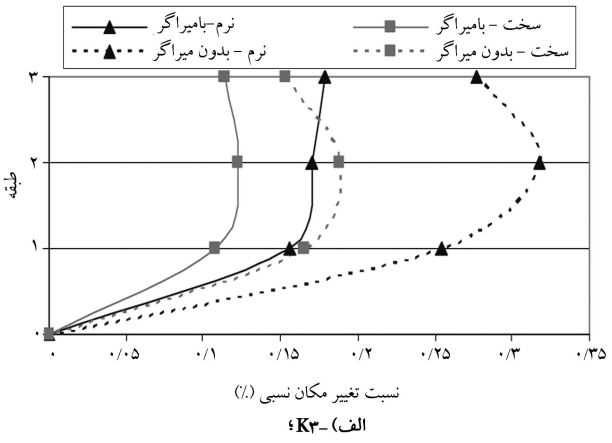


و) +M۳،

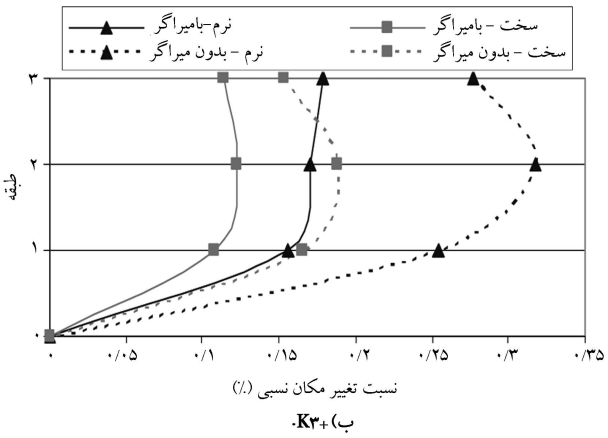


ز) sym.tmd.

شکل ۳. بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی، تحلیل خطی، ساختمان نامتقارن (با خروج از مرکزیت ۱۰٪).

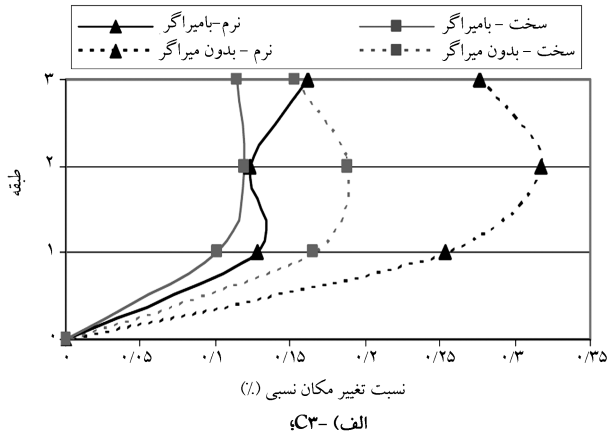


الف) -K۳؛

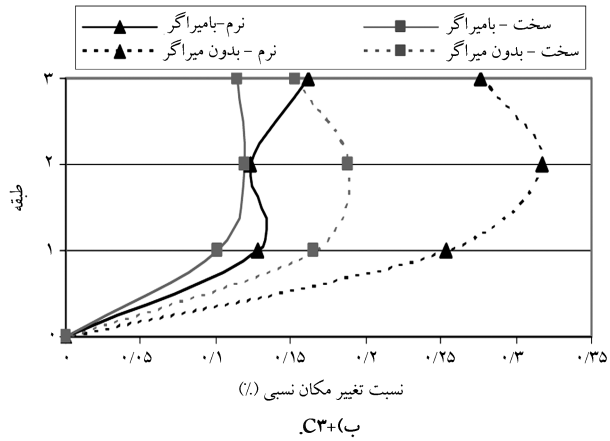


ب) +K۳.

شکل ۴. بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی، تحلیل خطی، ساختمان نامتقارن (با خروج از مرکزیت ۱۰٪).



الف) -C۳؛



ب) +C۳.

شکل ۵. بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی، تحلیل خطی، ساختمان نامتقارن (با خروج از مرکزیت ۱۰٪).

ولی پاسخ کاهش‌یافته به تدریج زیاد می‌شود؛ ثالثاً حالت‌های K بهتر از حالت‌های M توانسته‌اند پاسخ‌های کاهش‌یافته را به هم نزدیک کنند. حاصل تحلیل خطی دو حالت از حالت‌های C در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود اختلاف بین بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی کاهش‌یافته‌ی دو لبه‌ی نرم و سخت، نسبت به تغییرات مرکز میرایی سیستم میراگر حساسیتی نشان نمی‌دهند. ولی همه به یک حالت یعنی سیستم میراگر متقارن همگرا هستند.

در محدوده‌ی رفتار غیرخطی و براساس حاصل تحلیل غیرخطی حالت‌های M دیده شد که به‌دلیل تغییر (کاهش) فرکانس و پدیده‌ی ناتنظیمی، کارایی و تأثیرِ میراگرکم شده و قضاوت درمورد تأثیر این حالت‌ها سخت می‌شود. به‌علاوه از بررسی نمودارهای آنها چنین برمی‌آید که اولاً هرچه محل جرم میراگر به لبه‌ی سخت نزدیک می‌شود از تأثیر میراگر کاسته می‌شود. در صورتی که برای حالت‌های نزدیک‌شونده به لبه‌ی نرم کارایی تقریباً بدون تغییر است (یعنی این حالت‌ها تقریباً مشابه حالت میراگر متقارن عمل کرده‌اند). دلیل این اتفاقات، چنان که بیان شد، این است که درنتیجه‌ی نزدیک شدن محل جرم میراگر به هر لبه پاسخ مذکور آن لبه به‌تدریج زیاد می‌شود (اثر نامطلوب دارد) و چون بخشی از سختی و میرایی بر آن لبه قرارگرفته، باعث می‌شود میراگر حرکتِ آن لبه را بپذیرد، و در حالی که پاسخ لبه را نسبت به حالت بدون میراگر کم می‌کند، پاسخ کاهش‌یافته‌ی اولیه با در نظرگرفتن میراگر به‌تدریج زیاد شود. در صورتی که برای لبه‌ی مخالف، به‌دلیل دور بودن از محل جرم میراگر، اثر نامطلوب میراگر بر آن کم شده و اثر کاهنده‌اش تقریباً ثابت می‌ماند.

با نزدیک شدن مرکز سختی به لبه‌ی نرم به نظر می‌رسد تقریباً حالت‌های M بهتر از حالت‌های K عمل کرده‌اند؛ درحالی که دیده می‌شود برای تمام خروج از مرکزیت‌های سختی سیستم میراگر، پاسخ‌ها تقریباً یکی هستند که دلیل آن را می‌توان به کم‌شدن کارایی میراگر به‌علت ناتنظیمی آن نسبت داد.

درمورد حالت‌های C، همانند رفتار ارتجاعی با تغییر مرکز توزیع میرایی سیستم میراگر، تغییر و حساسیتی در پاسخ‌های ساختمان دیده نمی‌شود و همه به یک حالت، که همان حالت میراگر متقارن است، همگرا هستند.

برای شناخت و بررسی بیشتر کارایی این میراگر به‌گونه‌یی دیگر عمل شد؛ بدین صورت که حاصل نسبت بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی لبه‌ی نرم به بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی لبه‌ی سخت (R) برای تمام حالت‌های مختلف و تمام ساختمان‌های نامتقارن و برای تحلیل‌های خطی و غیرخطی به دست آمد. در حقیقت این نسبت نشان‌دهنده‌ی درصد کاهش پاسخ‌ها است؛ هرچه نسبت R به سمت عدد ۱ نزدیک شود بدان معناست که آن حالت خوب عمل کرده و توانسته پاسخ‌های دو لبه را به هم نزدیک کند و اختلاف بین آنها را کمینه کند. در ادامه، نسبت R برای ساختمان‌ها و حالت‌هایی که پیش‌تر بررسی شدند ارائه می‌شود.

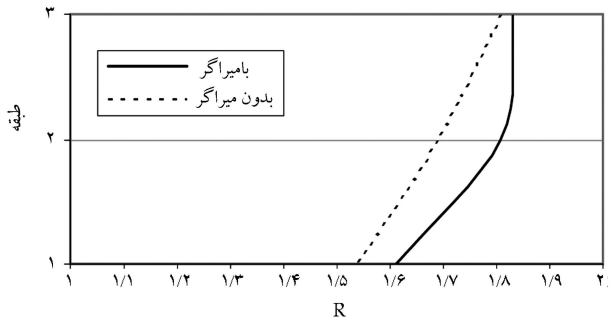
بررسی نسبت R

نتایج تحلیل خطی سه حالت از حالت‌های M در شکل ۶ نشان داده شده است. چنان که در این شکل دیده می‌شود هرچه محل جرم میراگر به لبه‌های نرم و سخت

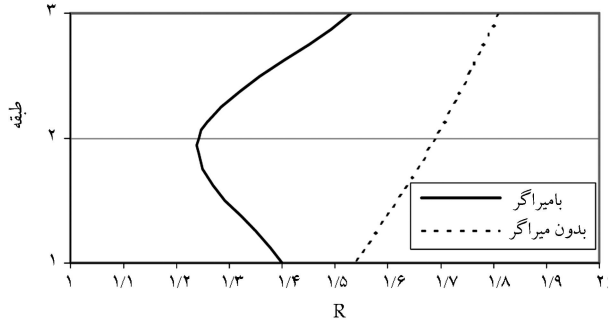
نزدیک شود اثر میراگر کم می‌شود. حالت‌هایی که در آن جرم میراگر به لبه‌ی نرم نزدیک شده بهتر از حالت‌هایی هستند که جرم میراگر به لبه‌ی سخت نزدیک شده است. به‌طورکلی حالت میراگر متقارن مناسب‌تر و بهتر از بقیه‌ی حالت‌ها بوده است.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل خطی حالت‌های K (شکل ۷)، می‌توان گفت هرچه مرکز سختی میراگر به لبه‌های نرم و سخت نزدیک شود (از مرکز تقارن ساختمان دور شود) اثر میراگر کم می‌شود. این حالت‌ها هنگامی که مرکز سختی به سمت لبه‌ی سخت نزدیک شود بهتر از حالت‌های M عمل می‌کنند. به‌طور کلی حالت میراگر متقارن مناسب‌تر و بهتر از بقیه‌ی حالت‌ها به نظر می‌رسد. برای نتایج حاصل از تحلیل خطی حالت‌های C همانند شکل‌های قبلی با تغییر مرکز میرایی میراگر تغییری در پاسخ‌ها ایجاد نشده و همه به‌حالت میراگر متقارن همگرا هستند.

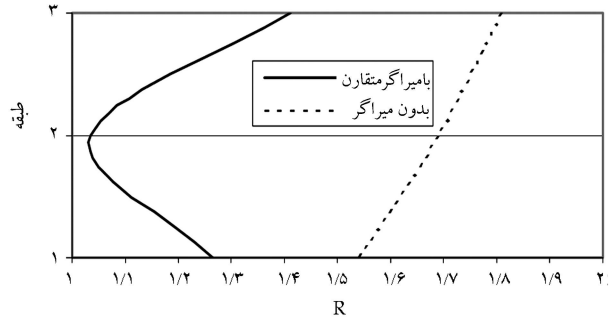
در محدوده‌ی غیرخطی نیز می‌توان دریافت که خروج از مرکزیت جرم یا مرکز سختی یا مرکز میرایی سیستم میراگرِ یادشده اثر زیادی در کاهش پاسخ‌ها ندارد، به‌ویژه هنگامی که جرم میراگر یا مرکز سختی آن به لبه‌ی سخت نزدیک می‌شوند



الف) -M۳؛

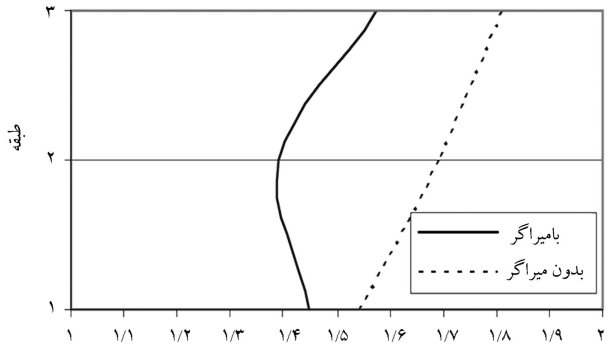


ب) +M۳؛

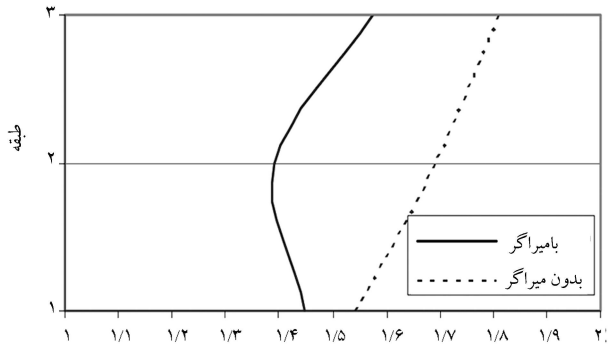


ج) sym.tmd

شکل ۶. نسبت R، تحلیل خطی، ساختمان نامتقارن (با خروج از مرکزیت ۱۰٪).

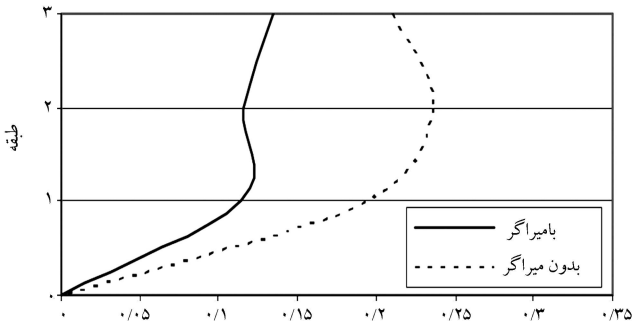


الف) -K۳؛

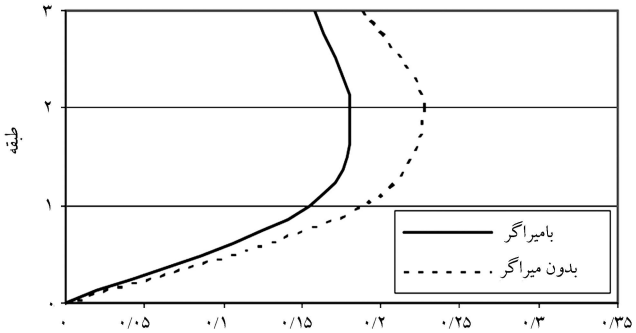


ب) +K۳.

شکل ۷. نسبت R، تحلیل خطی، ساختمان نامتقارن (با خروج از مرکزیت ۱۰٪).



الف) ساختمان متقارن - رفتار خطی؛



ب) ساختمان متقارن - رفتار غیرخطی.

شکل ۸. بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی، ساختمان متقارن بدون خروج از مرکزیت.

اثر میراگر بسیار کم شده و حتی از بین می‌رود. به‌طور کلی حالت میراگر متقارن مناسب‌تر و بهتر از بقیه‌ی حالت‌ها بوده است.

ساختمان متقارن بدون خروج از مرکزیت

با توجه به این که در این ساختمان هیچ خروج از مرکزی و نیز لبه‌های نرم و سختی وجود ندارند، فقط حالت میراگر متقارن بر این ساختمان قرار داده شد که نتایج آن برای محدوده‌ی رفتار خطی و غیر خطی در شکل ۸ نشان داده شده است. چنان که دیده می‌شود ساختمان فقط حرکت جانبی دارد و سیستم میراگرِ پیشنهادی در رفتار خطی به‌خوبی توانسته حرکت جانبی را کم کند. در محدوده‌ی رفتار غیرخطی به‌دلیل تغییر فرکانس و نا‌تنظیمی میراگر به‌شدت از اثر آن کاسته شده است.

این اثر عموماً با در نظرگرفتن تأثیرات جرم و سختی سیستم میراگر قابل توجیه است. مثلاً در حالت‌های بررسی M اگر جرم میراگر به سمت لبه‌ی نرم نزدیک شود، اثر اینرسی جرم میراگر باعث کم‌شدن اثر میراگر می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر محل جرم میراگر روی مرکز تقارن سازه در ۶ متری لبه‌ی نرم باشد، ۳ سانتی‌متر کاهش تغییر مکان در لبه‌ی نرم روی دهد، ولی اگر محل جرم میراگر در ۲ متری لبه‌ی نرم باشد ممکن است ۱٫۷ سانتی‌متر کاهش تغییر مکان در لبه‌ی نرم روی دهد. این وضعیت به‌معنای کاهش تأثیر میراگر در صورت ایجاد نامتقارنی در خود سیستم میراگرِ پیشنهادی است؛ یعنی اینرسی ایجادشده در جرم میراگر به‌نوعی تلاش می‌کند پاسخ کاهش‌یافته را زیاد کند.

نتیجه‌گیری

با توجه به آنچه که در قسمت‌های پیشین بیان شد می‌توان گفت سیستم میراگر جرمی تنظیمیِ پیشنهادی توانایی خوبی در کاهش پاسخ‌های مورد بررسی، به‌ویژه لبه‌ی نرم آن هم عموماً در محدوده‌ی رفتار خطی، دارد. از طرفی بر هم زدن تقارن ساختاری این میراگر نمی‌تواند کمک شایانی به کاهش بیشتر پاسخ‌های مورد بررسی کند؛ به‌عبارت دیگر حالت میراگر متقارن انتخابی مناسب برای این میراگر خواهد بود.

پانوشت

1. mean-square response
2. tuned mass damper

منابع

1. Jangid, R.S. and Datta, T.K. "Performance of multiple tuned mass dampers for torsionally coupled system", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* **26**, pp. 307-317 (1997).
2. Lin, C.C.; Ueng, J.M. and Huang, T.C. "Seismic response reduction of irregular buildings using passive tuned mass dampers", *Engineering Structures,* **22**, pp. 513-524 (1999).
3. Singh, Mahendra P.; Singh, Sarbjeet and Moreschi, Luis M. "Tuned mass dampers for response control of torsional buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* **31**, pp. 749-769 (2002).
4. Ahlawat, A.S. and Ramaswamy, A. "Multiobjective optimal absorber system for torsionally coupled seismically excited structures", *Engineering Structures,* **25**, pp. 941-950 (2003).
5. Gholami Rad, F., *Improving the Building Dynamic Responses By Means of Roof Isolation System,* Thesis Advisor, Nateghi Elahi, F., Tehran South Branch of Islamic Azad University, Thesis N. T456, (1383) (In Persian).
6. Javdian Arzaghi, S., *Performance Evaluation of Tuned Mass Damper to Control the Seismic Behavior of Three Dimensional Models,* Thesis Advisor: Rahimzade R., F., Sharif University, Thesis N. 09-36124, (1384) (In Persian).
7. Wang, J.F. and Lin, C.C. "Seismic performance of multiple tuned mass dampers for soil-irregular building interaction systems", *International Journal of Solids and Structures,* **42**, pp. 5536-54 (2005).
8. Li, C. and Qu, W. "Optimum properties of multiple tuned mass dampers of translational and torsional response of structures to ground acceleration", *Engineering Structures,* **28**, pp. 472-497 (2006).
9. Mahmoodi, A.H., *Reduction of Torsional Responses of Asymmetric Buildings Using Tuned Mass Dampers*, Thesis Advisor: Sarvghad Moghadam, A., Tehran South Branch of Islamic Azad University, Thesis N. T692, (1386) (In Persian).