

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 به منظور 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. بدین ترتیب 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 تحلیل هفت زلزله‌ی حوزی 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.

مقدمه

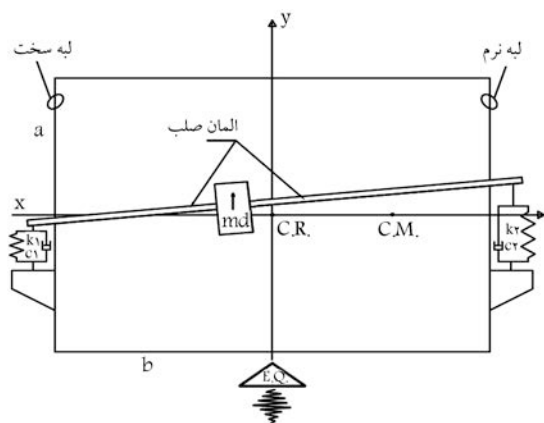
در تحقیقات مختلف نشان داده شده است که میراگرهای جرمی تنظیمی از جمله ابزار کنترل سازه‌اند که در محدوده‌ی رفتار ارتجاعی و در حالت تشدید با سازه عملکرد بسیار خوبی در کاهش تغییر مکان‌های جانبی و جذب ارتعاشات ساختمان‌ها از خود نشان داده‌اند؛ به طوری که در سراسر جهان و برای نمونه‌های متعدد و قابل توجهی به‌کار گرفته شده‌اند. ساختار عمومی این میراگر متشکل از جرم، فنر و میراگر لزوج 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 به منظور 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 به اختصار 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 به صورت 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، به منظور کنترل پیچش از دو میراگر جرمی که در دو

در سال ۲۰۰۲ به منظور 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.^[۲] این بررسی متأثر از دو تحقیق پیش‌گفته، و در دسته مطالعات با کاربرد چندمیراگر قرار می‌گیرد. پارامترهای بهینه‌ی طرح به کمک الگوریتم ژنتیک به دست آمدند. در سال ۲۰۰۳ نیز از چهار میراگر جرمی تنظیمی که در اطراف مرکز جرم بام قرار گرفته‌اند استفاده شد تا ضمن کنترل مودهای ارتعاشی خمشی، مودهای ارتعاشی پیچشی را نیز کنترل کنند.^[۳] در این تحقیق هم برای تعیین طرح بهینه‌ی سیستم جاذب از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. تحریک ورودی چهار زلزله‌ی ال سنترو، کوبه، هاجینوه 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^[۴] و در نهایت نشان داده شد که ایده‌ی جداسازی بام در کاهش

در سال ۲۰۰۲ به منظور 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.^[۲] این بررسی متأثر از دو تحقیق پیش‌گفته، و در دسته مطالعات با کاربرد چندمیراگر قرار می‌گیرد. پارامترهای بهینه‌ی طرح به کمک الگوریتم ژنتیک به دست آمدند. در سال ۲۰۰۳ نیز از چهار میراگر جرمی تنظیمی که در اطراف مرکز جرم بام قرار گرفته‌اند استفاده شد تا ضمن کنترل مودهای ارتعاشی خمشی، مودهای ارتعاشی پیچشی را نیز کنترل کنند.^[۳] در این تحقیق هم برای تعیین طرح بهینه‌ی سیستم جاذب از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. تحریک ورودی چهار زلزله‌ی ال سنترو، کوبه، هاجینوه 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^[۴] 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.



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

جرمی تنظیمی (TMD)^۲ اغلب نتایج حاکی از این هستند که مناسب ترین نسبت جرم میراگر به جرم مود کنترل شونده ی سازه و نسبت میرایی میراگر به ترتیب بین ۱ تا ۴ درصد و ۲۰ تا ۳۰ درصد هستند. همچنین نسبت فرکانس میراگر به فرکانس مود تنظیم شونده بین ۰/۹ تا 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، نسبت های جرمی (μ) و فرکانسی (f) و میرایی (ξ_d) میراگر جرمی تنظیم شونده ی منفرد غیر فعال اولیه، در این تحقیق چنین انتخاب شدند: نسبت جرمی μ در این بررسی برابر با ۳ درصد فرض شد. بدین معنی 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 ساختمان های نامتقارن برابر با ۹۶ درصد فرض شد. مقدار سختی کل سیستم میراگر جرمی تنظیمی منفرد اولیه از رابطه ی ۱ به دست می آید:

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

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 رابطه ی ۲ به دست می آید:

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

در روابط یاد شده ω_{1b} فرکانس مود اول ساختمان نامتقارن است. برخی از مشخصات دینامیکی ساختمان های مورد مطالعه و میراگرها در جداول ۱ تا ۳ ارائه شده اند.

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 به ویژه مودهای ارتعاشی راستای x که با میراگر هماهنگ نیستند تغییری ایجاد

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

از مطالعه ی تحقیقات یاد شده نکات قابل توجهی دریافت می شود. اکثر این تحقیقات در مورد کنترل پیچش به وسیله ی میراگر جرمی تنظیمی، در محدوده ی رفتار ارتجاعی سازه ها بوده اند؛ زیرا تأثیر مثبت این میراگر به دلیل تغییر فرکانس در محدوده ی رفتار غیر ارتجاعی و وقوع پدیده ی نانتظیمی مجموعه ی سازه- میراگر کاهش می یابد. تعلق بیشتر این تحقیقات به کاربردهای زلزله بیانگر آن است که اگرچه زلزله به دلیل کوتاه بودن زمان وقوع و عدم ایجاد تشدید مناسب با سازه، تحریک مناسبی برای سیستم های دارای میراگر جرمی تنظیمی محسوب نمی شود، این میراگر در تحقیقات مذکور عملکرد مثبتی داشته است.

معرفی سیستم میراگر استفاده شده در این تحقیق

در این بررسی از یک میراگر جرمی تنظیمی منفرد غیر فعال که در آن تغییراتی داده شده استفاده می شود. بدین ترتیب 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 می آید. آنگاه برای این که اثر جرم و فنر و میرایی به هر دو لبه ی نرم و سخت منتقل شود، فنر و میرایی آن به دو جزء فنر و دو جزء میرایی کوچک تر تقسیم می شود. 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 لبه ی سخت، و یک فنر و میرایی جزئی (k_{2}, c_{2}) که روی لبه ی نرم قرار می گیرند (شکل ۱). مجموع سختی دو فنر جزئی کوچک تر برابر با سختی کل (k_d)، و مجموع دو میرایی جزئی کوچک تر برابر با میرایی کل (c_d) آن سیستم میراگر جرمی تنظیمی منفرد اولیه است. با این فرض که تمام قسمت های این سیستم با یک رابط صلب به یکدیگر متصل اند تا اثر آن جرم و فنرها و میرایی ها به دو لبه ی سخت و نرم منتقل شوند، سیستم مذکور روی بام ساختمان قرار می گیرد.

از آنجا که هدف کنترل و کاهش حرکت جانبی - پیچشی ساختمان است باید پارامترهای این سیستم در بهترین حالت به دست آیند. این پارامترها عبارتند 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 بهینه ی نسبت جرم و فرکانس و میرایی روش های مختلفی از جمله بهینه سازی با کمک الگوریتم های ژنتیک یا میانگین مربع پاسخ ها^۱ به کار گرفته شده است. براساس نتایج تحلیلی در تحقیقات انجام شده با موضوع^[۸،۷] میراگر

جدول ۱. مشخصات سیستم میراگر جرمی تنظیمی منفرد اولیه و ساختمان های نامتقارن.

ساختمان نامتقارن با خروج از مرکزیت (%)	شماره ی مود	ω (r/sec)	جرم مؤثر مودی Kg.f.s ^۲ /m	m_d kgf.s ^۲ /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).

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

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

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

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 سه طبقه فولادی با ابعاد کلی ۸ متر (a) در ۱۲ متر (b) است که ارتفاع هر طبقه 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 به ترتیب برابر ۵۰۰ و ۲۰۰ و برای بام به ترتیب برابر با ۴۵۰ و ۱۵۰ kgf/m² در نظر گرفته شدند. این ساختمان در حالت کاملاً متقارن طراحی شد. از آنجا که ناسازه‌ها در مدل در نظر گرفته نشدند، نسبت میرایی ساختمان برای تمام مودها در محدوده‌ی رفتار خطی و غیرخطی برابر ۲ درصد فرض شد. مدل‌سازی اثر پیش‌براساس نامتقارنی جرم نسبت به سختی ساختمان انجام شد.^[۹]

چگونگی بررسی‌ها

پس از تعیین جرم، سختی و میرایی کل سیستم میراگر جرمی تنظیمی منفرد اولیه، به منظور تعیین بهترین محل جرم (m_d) و بهترین توزیع سختی‌ها و میرایی‌های (k_۱, k_۲, c_۱, c_۲) یک سلسله تحلیل‌های تاریخی‌جهی 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 چاک نوع ۲ رخ داده‌اند، استفاده شد. این زلزله‌ها عبارت‌اند از: چیچی ۱۹۹۹ (۰/۴۸۲g)، ایمپریال ولی 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). همگی زلزله‌ها به ۰/۳۵g مقیاس شدند.

حرکت جانبی - 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:

$$(k_1 x_1 + k_2 x_2) = X_{kd}(k_1 + k_2) \quad (3)$$

$$(c_1 x_1 + c_2 x_2) = X_{cd}(c_1 + c_2) \quad (4)$$

که در این روابط x_i فاصله ی سختی (یا میرایی) ام سیستم میراگر از یک محور مبنای فرضی (در این بررسی لبه ی سخت) بوده، و X_{kd} و X_{cd} به ترتیب مرکز سختی و مرکز میرایی سیستم مذکور هستند. سازه ی مورد نظر به صورت با/بدون میراگر تحلیل شد و پاسخ ها با هم مقایسه شدند. برای مدل سازی فنرها و میرایی ها، و نیز تحلیل مدل از گزینیه ی Link نرم افزار SAP2000 استفاده شد. جرم میراگر در جهت y (m_y) در نظر گرفته شد، و نیز به منظور ایجاد رابط صلب سه گره تشکیل دهنده ی این میراگر، از قیده های مناسب این برنامه استفاده شد. تحلیل گام به گام انتگرال گیری تاریخی زمانی غیرخطی براساس پیش فرض این برنامه، یعنی با روش H.H.T. و با تکیه بر مفصل خمیری پیش فرض آن انجام شد.

بررسی مشاهدات و نتایج تحلیل ها

بررسی بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی

از آنجا که این مشاهدات در محدوده ی رفتار خطی و غیرخطی برای ساختمان های نامتقارن با خروج از مرکزیت ۲۰ و ۳۰ درصد مشابه ساختمان نامتقارن ۱۰ درصد بوده ولی از شدت کم تری برخوردارند (که این نشانگر کاهش تأثیر میراگر با افزایش خروج از مرکزیت ساختمان ها است)، به منظور رعایت اختصار در ادامه فقط نتایج به دست آمده برای ساختمان نامتقارن با خروج از مرکزیت ۱۰ درصد ارائه و ارزیابی می شوند.

با توجه به حاصل تحلیل خطی حالت های M (شکل ۳) دیده می شود که: اولاً هرچه محل جرم میراگر از مرکز تقارن ساختمان دور می شود اختلاف بین بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی کاهش یافته ی دو لبه ی نرم و سخت بیشتر می شود (که مطلوب نیست)؛ ثانیاً این اختلاف وقتی محل جرم میراگر به سمت لبه ی سخت پیش می رود بیشتر از وقتی است که به سمت لبه ی نرم نزدیک می شود. دلیل اتفاقات یاد شده این است که همانند یک ساختمان نامتقارن که به دلیل اختلاف بین محل جرم و سختی اش، در آن لبه های نرم و سخت پدید می آیند، در سیستم میراگر نیز به هم خوردن تقارن محل جرم باعث می شود پاسخ کاهش یافته ی اولیه به تدریج زیاد شود و از تأثیر کاهنده ی میراگر کاسته شود.

حاصل تحلیل خطی حالت های 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 می شود اختلاف بین بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی کاهش یافته ی دو لبه ی نرم و سخت بیشتر می شود (که مطلوب نیست)؛ ثانیاً این اختلاف وقتی محل مرکز سختی میراگر به سمت لبه ی سخت پیش می رود با وقتی که به سمت لبه ی نرم نزدیک می شود تقریباً یکی است. دلیل اتفاقات یاد شده این است که همانند یک ساختمان نامتقارن که به دلیل اختلاف بین محل جرم و سختی اش، در آن لبه های نرم و سخت پدید می آیند، در سیستم میراگر نیز به هم خوردن تقارن سختی باعث می شود پاسخ کاهش یافته ی اولیه به تدریج زیاد شود و از تأثیر کاهنده ی میراگر کاسته شود. از طرفی باید در نظر داشت هرگاه محل مرکز سختی میراگر به هر لبه نزدیک شود، پاسخ آن لبه به تدریج زیاد می شود، و در حالی که پاسخ آن لبه را کم می کند

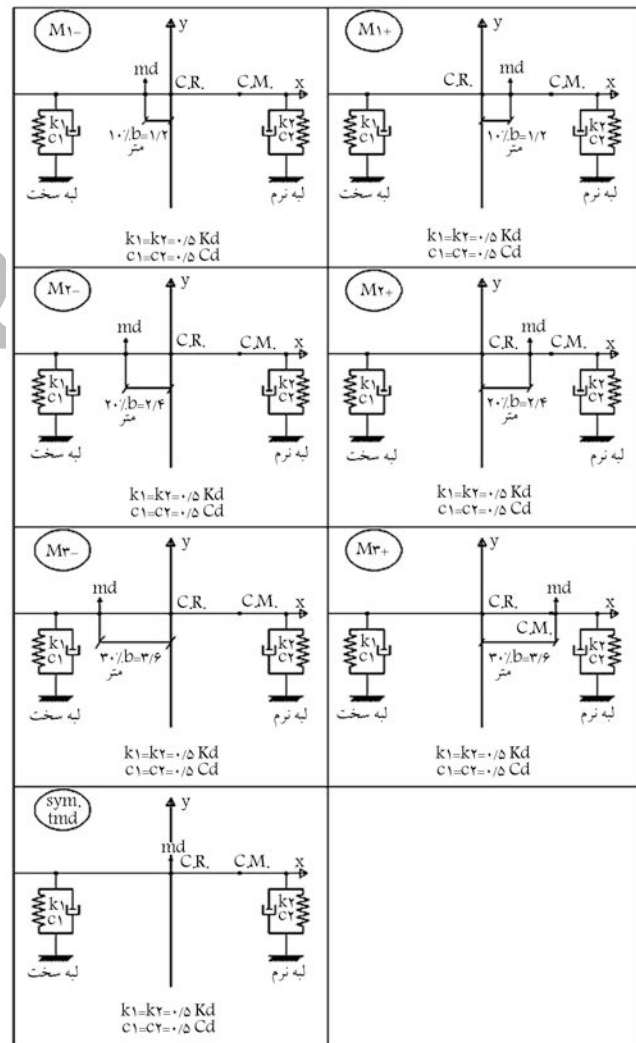
چپ و راست آن (یعنی در سمت منفی و مثبت محور x) قرار گیرد. این حالت ها $M1+, M2+, M3+, M1-, M2-, M3-$ نامیده شدند (شکل ۲).

ب) حالت های K : محل جرم و مرکز میرایی سیستم میراگر روی محور مذکور در بند الف ثابت باشند، ولی مرکز سختی آن روی موقعیت های یاد شده قرار گیرد. این حالت ها $K1+, K2+, K3+, K1-, K2-, K3-$ نامیده شدند (مشابه شکل ۲ ولی به جای توزیع جرم، توزیع سختی انجام شده است).

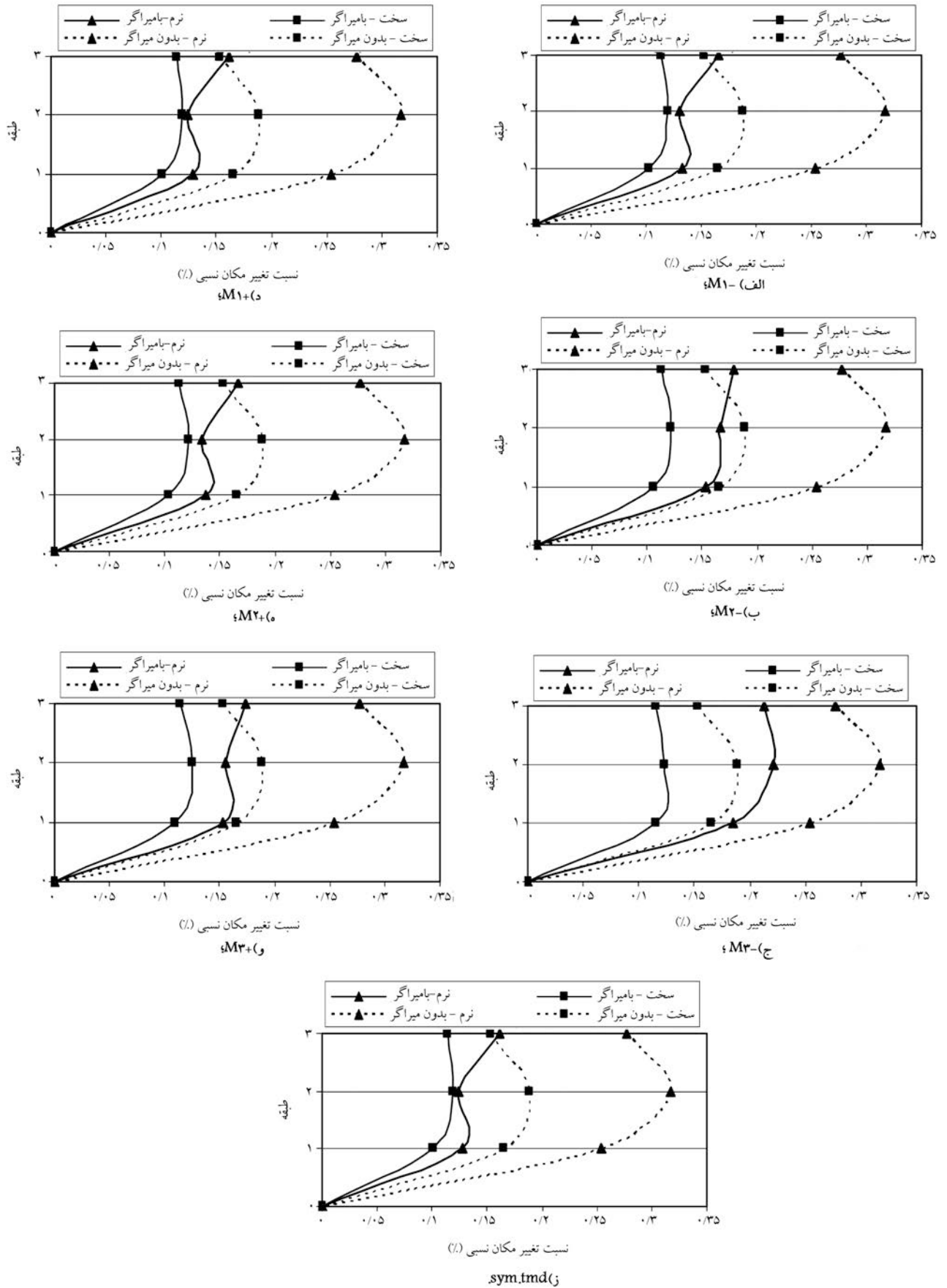
ج) حالت های C : محل جرم و مرکز سختی سیستم میراگر روی محور مذکور در بند الف ثابت باشند، ولی مرکز میرایی آن روی موقعیت های یاد شده قرار گیرد. این حالت ها $C1+, C2+, C3+, C1-, C2-, C3-$ نامیده شدند (مشابه شکل ۲ ولی به جای توزیع جرم، توزیع میرایی انجام شده است).

افزون بر این، برای تمام ساختمان های 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.

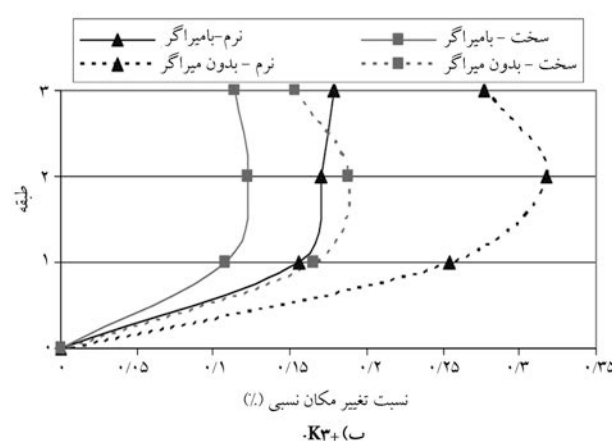
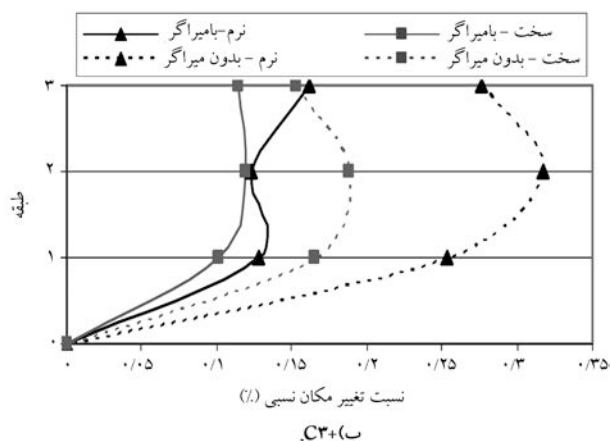
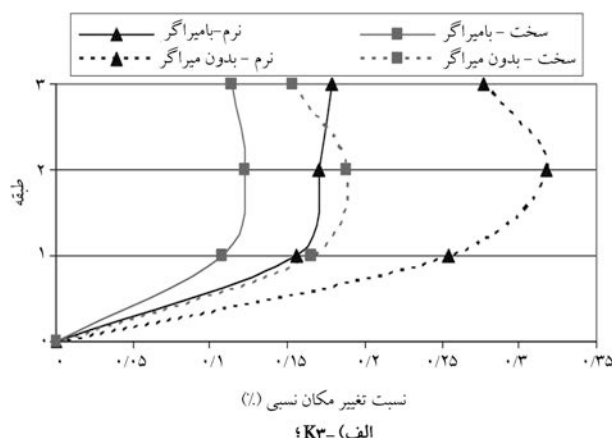
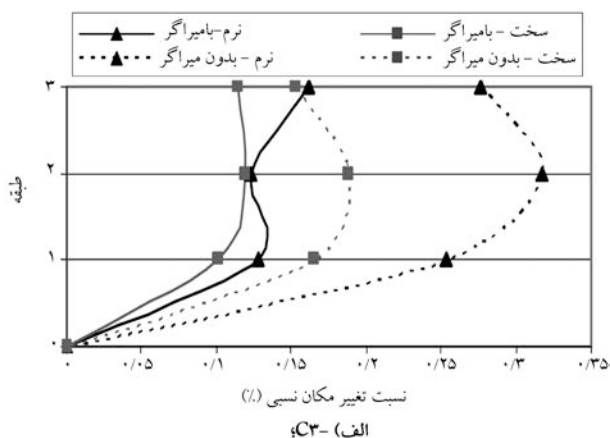
هدف از بررسی این حالات، مطالعه ی امکان کمینه کردن اختلاف بین نسبت تغییر مکان نسبی دو لبه ی نرم و سخت بود. به عبارت دیگر، بررسی امکان سوق دادن



شکل ۲. الگوی شماتیک تغییرات محل جرم سیستم میراگر.



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



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

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

با نزدیک شدن مرکز سختی به لبه 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 کم شدن کارایی میراگر به علت نانتظیمی آن نسبت داد.

در مورد 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.

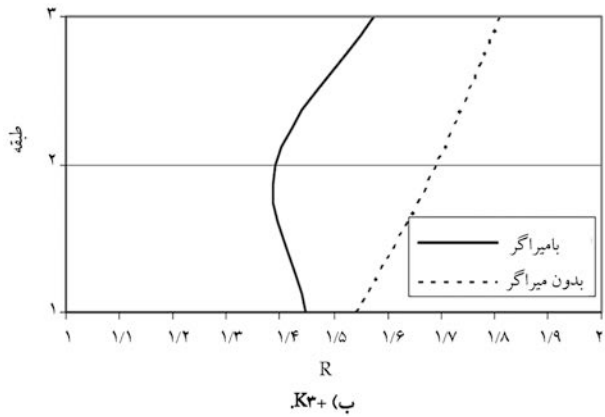
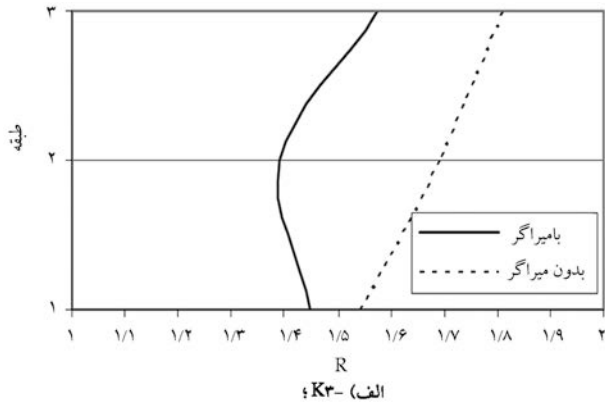
برای شناخت و بررسی بیشتر کارایی این میراگر به گونه‌ی دیگر عمل شد؛ بدین صورت که حاصل نسبت بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی لبه نرم به بیشترین نسبت تغییر مکان نسبی لبه سخت (R) برای تمام حالت‌های مختلف و تمام ساختمان‌های نامتقارن و برای تحلیل‌های خطی و غیرخطی به دست آمد. در حقیقت این نسبت نشان‌دهنده درصد کاهش 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

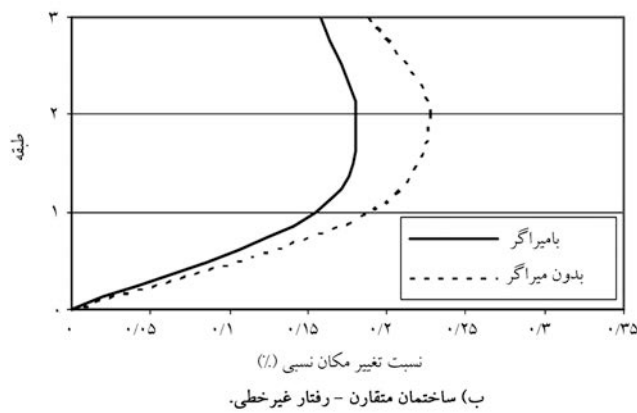
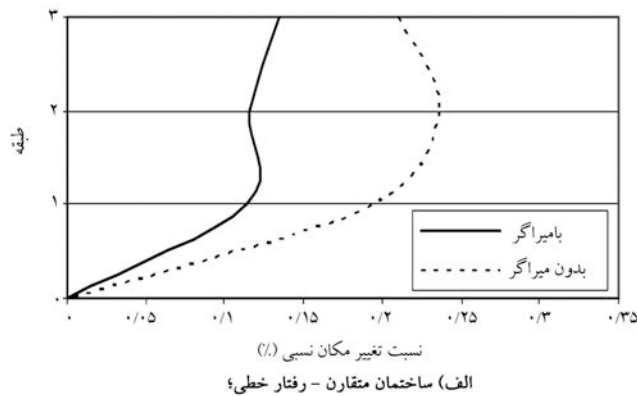
نتایج تحلیل خطی سه حالت از حالت‌های M در شکل ۶ نشان داده شده است. چنان که در این شکل دیده می‌شود هرچه محل جرم میراگر به لبه‌های نرم و سخت

ولی پاسخ کاهش یافته به تدریج زیاد می‌شود؛ ثالثاً حالت‌های K بهتر از حالت‌های M توانسته‌اند پاسخ‌های کاهش یافته 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 کاهش یافته‌ی دو لبه 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 به دلیل تغییر (کاهش) فرکانس و پدیده‌ی نانتظیمی، کارایی و تأثیر میراگر کم شده و قضاوت در مورد تأثیر این حالت‌ها سخت می‌شود. به علاوه از بررسی نمودارهای آنها چنین برمی‌آید که اولاً هرچه محل جرم میراگر به لبه سخت نزدیک می‌شود از تأثیر میراگر کاسته می‌شود. در صورتی که برای حالت‌های نزدیک‌شونده به لبه 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 در نتیجه‌ی نزدیک شدن محل جرم میراگر به هر لبه پاسخ مذکور آن لبه به تدریج زیاد می‌شود (اثر نامطلوب دارد) و چون بخشی از سختی و میرایی بر آن لبه قرار گرفته، باعث می‌شود میراگر حرکت آن لبه را بپذیرد، و در حالی که پاسخ لبه را نسبت به حالت بدون میراگر کم می‌کند، پاسخ کاهش یافته‌ی اولیه با در نظر گرفتن میراگر به تدریج زیاد شود. در صورتی که برای لبه مخالف، به دلیل دور بودن از محل جرم میراگر، اثر نامطلوب میراگر بر آن کم شده و اثر کاهش‌دهنده‌اش تقریباً ثابت می‌ماند.



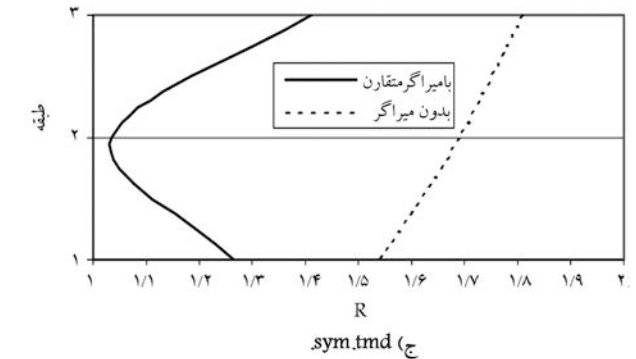
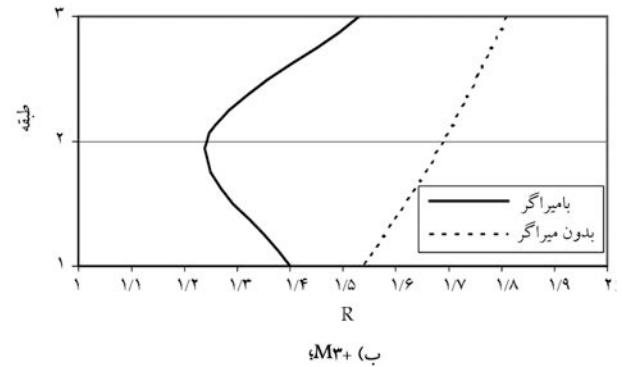
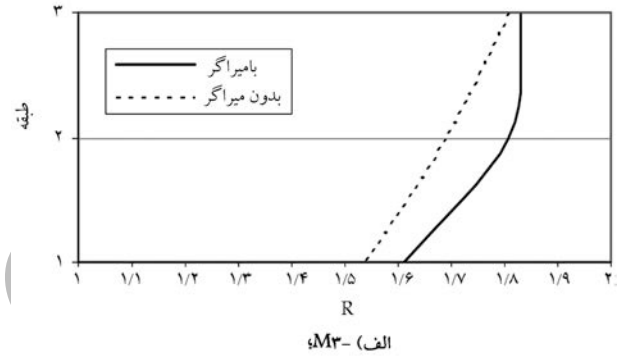
شکل ۷. نسبت R، تحلیل خطی، ساختمان نامتقارن (با خروج از مرکزیت ۱۰٪).



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

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. به‌طور کلی 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 میراگر تغییر 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 میراگر یادشده اثر زیادی در کاهش پاسخ‌ها ندارد، به‌ویژه هنگامی که جرم میراگر یا مرکز سختی آن به لبه‌ی سخت نزدیک می‌شوند



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

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 به معنای کاهش تأثیر میراگر در صورت ایجاد نامتقارنی در خود سیستم میراگر پیشنهادی است؛ یعنی اینرسی ایجاد شده در جرم میراگر به نوعی تلاش می‌کند پاسخ کاهش یافته را زیاد کند.

نتیجه‌گیری

با توجه به آنچه که در قسمت‌های پیشین بیان شد می‌توان گفت سیستم میراگر جرمی تنظیمی پیشنهادی توانایی خوبی در کاهش پاسخ‌های مورد بررسی، به ویژه 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؛ به عبارت دیگر حالت میراگر متقارن انتخابی مناسب برای این میراگر خواهد بود.

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 میراگر پیشنهادی در رفتار خطی به خوبی توانسته حرکت جانبی را کم کند. در محدوده‌ی رفتار غیرخطی به دلیل تغییر فرکانس و نانتظیمی میراگر به شدت از اثر آن کاسته شده است.

این اثر عموماً با در نظر گرفتن 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 کم شدن اثر میراگر می‌شود. به عنوان مثال، اگر

پانویس

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).