

تحلیل حساسیت پاسخ لرزه‌ای یک سازه ۱۰ طبقه فولادی به

فرکانس و میرایی میراگر جرمی تنظیم شده

هادی عسگری

استادیار

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد الیگودرز، الیگودرز،

ایران

hadi.asgari@iau.ac.ir

سیدمهدی زهرائی*

استاد

دانشکده عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران،

تهران، ایران

mzahrai@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

چکیده

یکی از انواع سامانه‌های کنترل ارتعاشات جهت کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، میراگرهای جرمی تنظیم شده^۱ می‌باشد. با تنظیم پارامترهای میرایی و فرکانس در این نوع میراگرها، می‌توان پاسخ لرزه‌ای را تا حد قابل توجهی کاهش داد. بدین جهت برای دستیابی به پارامترهای بهینه مذکور، تاکنون روش‌های متعددی پیشنهاد شده است. منتها در این پژوهش یک سازه فولادی ۱۰ طبقه مدل‌سازی شده و تحلیل حساسیت تحت ۳ رکورد زلزله حوزه دور با نسبت‌های جرمی و فرکانسی مختلف در نرم افزار اپنسیس^۲ انجام شده است. پارامترهای بدست آمده از تحلیل حساسیت در سه حالت با نسبت جرمی ۰.۲٪، ۰.۳٪ و ۰.۴٪ بررسی و مقایسه شده و از دو معیار بیشینه پاسخ‌ها و جذر مجموع مربعات برای یافتن پاسخ‌های لرزه‌ای استفاده شده است. در پایان پارامترهای بدست آمده از هر دو معیار با روابط تجربی آیکدا و آی او آی^۳ بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نسبت جرمی، پاسخ‌های جابجایی کاهش می‌یابد. همچنین میراگرهای جرمی تنظیم شده حساسیت کم‌تری به نسبت میرایی دارند، در حالیکه پاسخ‌ها به حداقل تغییرات در نسبت فرکانسی، حساسیت بالایی نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: کنترل غیرفعال، میراگر جرمی تنظیم شده، تحلیل حساسیت، تحلیل تاریخچه زمانی، فرکانس

۱. مقدمه

پیشنهاد شده است [۱-۲]. یکی از کاربردی‌ترین ابزارها

برای کنترل ارتعاش سازه استفاده از میراگر جرمی

تنظیم شده (TMD) می‌باشد که اولین بار این سیستم

در سالیان اخیر روش‌های متعددی برای کاهش پاسخ

لرزه‌ای سازه‌ها، ناشی از بارهای دینامیکی باد و زلزله

در سال ۱۹۱۱ میلادی توسط فرام پیشنهاد شد [۳]. برای حصول یک میرایی وابسته به فرکانس، میراگرهای جرمی معمولاً در تراز بالای سازه نصب می‌شود، که شامل فنر، کمک فنر و جرم اضافه می‌باشد که به سازه اصلی الحاق می‌شوند [۴].

میراگرهای جرمی تنظیم شده به ۳ دسته غیرفعال، نیمه فعال و فعال تقسیم‌بندی می‌شوند. این سیستم‌های کنترلی برای اولین بار به عنوان یک سیستم کنترلی غیرفعال اختراع شدند [۵-۷]. نکته مهم در مورد این نوع میراگرها، عدم نیاز به منبع خارجی انرژی می‌باشد. دسته دوم که به عنوان میراگرهای جرمی فعال^۴ (ATMD) شناخته می‌شوند برخلاف کنترل غیرفعال، به منبع انرژی خارجی برای انتقال نیروی مورد نیاز به سازه اصلی برای کاهش پاسخ سازه نیاز دارند.

دسته سوم میراگرهای تنظیم شونده جرمی که آخرین رویکرد کنترل پاسخ سازه می‌باشد، به عنوان کنترل نیمه فعال^۵ (SATMD) شناخته می‌شود که پارامترهای میراگر جرمی با گذشت زمان بطور لحظه‌ای تغییر می‌کنند [۸].

رضایی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی کنترل پاسخ‌های دینامیکی سازه‌های یک درجه آزادی به وسیله میراگرهای جرمی پرداخته‌اند. در این تحقیق نشان داده شد که چگونه میراگر جرمی با ارتعاشاتی که در فاز مقابل با ارتعاشات سازه اصلی انجام می‌دهند، سبب افزایش ضریب میرایی و کاهش دامنه نوسانات سازه می‌شود. طی این آزمایش ضریب میرایی ناشی از اضافه شدن میراگر جرمی به سازه به میزان ۱۲۴ درصد افزایش داشته است. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش جرم میراگر به ازای سختی ثابت تا رسیدن به حد معینی، ضریب میرایی سازه اصلی

افزایش یافته و پس از آن افزایش جرم میراگر، کاهش ضریب میرایی را در پی داشته است [۹].

در مطالعه دیگری، حق‌اللهی و همکاران به بررسی تأثیر پارامترهای موثر میراگر جرمی بر روی پاسخ سازه پرداخته‌اند. برای این منظور سه قاب ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه که معرف سازه‌های بلند است، مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل تاریخچه زمانی تحت سه رکورد زلزله برای بدست آوردن پارامترهای بهینه سیستم میراگر جرم متوازن بر روی قاب انجام شد. نتایج نشان دهنده حساسیت بیشتر پاسخ سازه به نسبت جرمی میراگر تنظیم شده در مقایسه با دو پارامتر نسبت میرایی و فرکانس میراگر، با افزایش ارتفاع سازه است. همچنین از نتایج دریافت شد که در تمامی زلزله‌ها روند تغییر کاهش پاسخ سازه با افزایش میرایی تقریباً دارای شیب ثابتی می‌باشد [۱۰].

صابری و همکاران، با بکارگیری الگوریتم رقابت استعماری، پارامترهای میراگر جرمی را بگونه‌ای تنظیم کردند که انرژی پتانسیل سازه کمینه شود. در نتیجه پاسخ‌های دینامیکی مربوط به انرژی پتانسیل و جنبشی سازه کنترل شده با میراگر، نسبت به سازه کنترل نشده به گونه موثری کاهش یافت [۱۱].

در مطالعه دیگری رضایی و همکاران به طراحی نوعی سیستم‌های فازی پرداختند که بر اساس آن پارامترهای بهینه TMDs استخراج می‌شود [۱۲].

رضایی و همکاران از میراگر STMD برای کاهش ارتعاشات نامطلوب سازه استفاده کردند. به همین منظور برای بدست آوردن نسبت میرایی سیستم، از سیستم‌های کنترلی روشن-خاموش گراند هوک بر مبنای سرعت و جابجایی استفاده شد. شواهد حاکی از این بود که، در قیاس با سیستم TMD، این سیستم

توانست پاسخ‌های جابجایی را ۸ تا ۱۵ درصد تحت زلزله‌های حوزه دور و ۱۴ تا ۲۰ درصد در حوزه نزدیک کاهش دهد [۱۳].

فرندز و همکاران در پژوهشی یک سازه یک طبقه را با سختی‌های متفاوت در نظر گرفتند و به این نتیجه رسیدند در سازه‌هایی که از TMD استفاده شده است نتایج بهتری در قیاس با سازه بدون این سامانه حاصل می‌شود. در این پژوهش از یک رابطه تجربی برای بدست آوردن پارامترهای بهینه میراگر جرمی بر مبنای یک الگوریتم فرا ابتکاری استفاده شد که تابع هدف آن، کاهش پاسخ شتاب و جابجایی سازه است. نتایج اثبات کرد که رابطه قابل قبولی بین نسبت‌های جرم به فرکانس و همچنین جرم به میرایی وجود دارد [۱۴].

در مطالعه دیگری از یک فرایند جستجوی جامع برای بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده (TMDI) با هدف کنترل ارتعاش سازه استفاده شد که پاسخ سازه با روش مذکور حداکثر تا ۳۰ درصد کاهش یافت [۱۵].

وانگ و همکاران به ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه مجهز به سامانه جداساز همراه با سامانه میراگر تنظیم شده نیمه فعال پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد استفاده از سامانه میراگر تنظیم شده غیرفعال همراه با سامانه جداساز، پاسخ جابجایی و شتاب تراز سامانه جداساز را در زلزله‌های نزدیک گسل بهبود می‌دهد [۱۶]. وهدانی و همکاران به تعیین موقعیت بهینه میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در ساختمان‌های فولادی منظم و نامنظم در پلان تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل پرداختند. نتایج نشان داد میراگرهای جرمی چندگانه تأثیر قابل توجهی در کاهش برش پایه به میزان بیش از ۴۰ درصد دارند [۱۷].

تاکنون روش‌های متعددی برای نسبت‌های بهینه میرایی و فرکانس میراگر جرمی تنظیم شونده پیشنهاد شده است لیکن کمتر به تحلیل حساسیت عملکرد لرزه‌ای به فرکانس و میرایی میراگر جرمی تنظیم شده توجه گردیده است. در این پژوهش تحلیل حساسیت پاسخ لرزه‌ای یک سازه فولادی ۱۰ طبقه به فرکانس و میرایی میراگر جرمی تنظیم شده با سه نسبت جرمی و دو معیار متفاوت پرداخته شده است و در نهایت پارامترهای بدست آمده با روابط تجربی دن هارتوگ^۶ مقایسه شده‌اند.

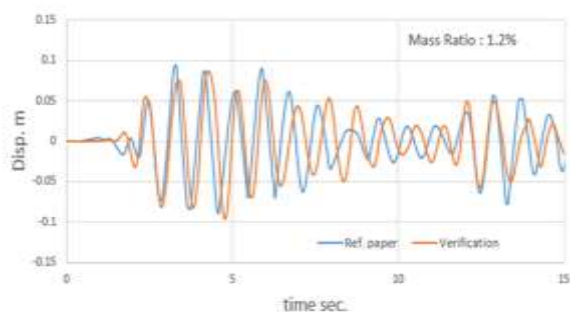
۲. تئوری میراگرهای جرمی تنظیم شده

یک سیستم میراگر غیرفعال جرمی تنظیم شده، مجموعه‌ای متشکل از کمک فنر، جرم و فنر می‌باشد که به سازه اصلی متصل شده و با انطباق بسامد خود با بسامد سازه، در جهت مخالف حرکت سازه مرتعش می‌شود و با اعمال نیروی اینرسی برگرداننده به سازه، فرکانس تحریک را مستهلک نموده و باعث کاهش پاسخ دینامیکی سازه می‌شود. در این نوع از سیستم‌های کنترلی، فنر بین تکیه‌گاه ثابت و جرمی که بر روی تکیه‌گاه‌های غلطکی واقع است، قرار می‌گیرد (شکل ۱). این نوع از ادوات کنترل در تراز طبقات فوقانی قرار می‌گیرند و با اعمال تحریک به سازه، عملکرد میرایی خود را انجام می‌دهند و پس از پایان یافتن تحریک، مجدداً به حالت اولیه باز می‌گردند. جنس جرم این میراگرها معمولاً از فولاد، بتن و یا سرب است و به صورت گروهی یا تک به ابعاد ۵ تا ۱۰ متر و به شکل مربع یا مستطیل ساخته و در تراز طبقات بالایی سازه نصب می‌شوند.

گرفته شده است. میرایی ذاتی سازه ۵ درصد و بصورت میرایی رایلی لحاظ شده است. همچنین در مقاله مرجع چندین نسبت جرمی در نظر گرفته که در این پژوهش از نسبت جرمی بهینه ۰/۱۲ استفاده شد.

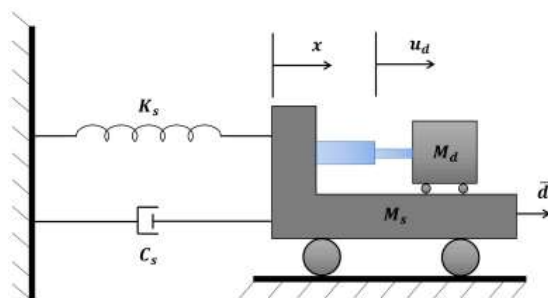
جهت مدل‌سازی میراگر جرمی تنظیم شونده در بالاترین ارتفاع و در مختصات گوشه‌ی سازه، یک نقطه تعریف شده و سپس جابجایی قائم و دوران‌های گره مورد نظر محدود و فقط میراگر در جهت محور افقی مجاز به جابجایی می‌باشد. جرم میراگر برابر ۱/۲ درصد جرم کل سازه و به صورت انتقالی (در جهت افقی) تعریف شده است. پس از تحلیل تاریخچه زمانی با میراگر جرمی تنظیم شونده تحت تأثیر زلزله السنترو، نمودار جابجایی-زمان مربوط به بام سازه ترسیم و در شکل ۳ نتایج صحت‌سنجی نشان داده شده است که با اختلاف اندک قابل تأیید است.

شکل ۳. صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی با مقاله مرجع [۱۲].



۴. مشخصات مدل سازه‌ای مورد مطالعه

در تحقیق حاضر از یک قاب ۱۰ طبقه فولادی استفاده شده است. ارتفاع طبقات و طول دهانه به ترتیب ۳/۲ و ۴/۵ متر در نظر گرفته شده است. برای تیرها از مقطع IPE و برای ستون‌ها از مقطع BOX استفاده شده است. فولاد مورد استفاده ST37 با تنش تسلیم 2400 kg/cm^2

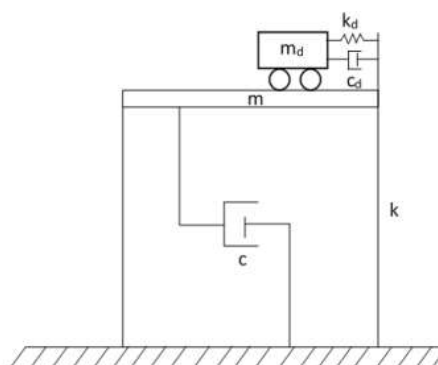


شکل ۱. شماتیک میراگر جرمی تنظیم شده.

۳. صحت‌سنجی مدل‌سازی

فردوز و همکاران در پژوهشی از یک قاب یک طبقه تحت تحریک زلزله السنترو^۷ استفاده کردند که از مدل مذکور برای صحت‌سنجی در این پژوهش استفاده شده است [۱۴].

برای مدل‌سازی ستون‌ها و تیرهای سازه از المان غیرخطی استفاده شده است. بر مبنای مقاله مرجع، ۱۱۵ تن بار بر روی سقف قاب بارگذاری شده است. بر این اساس در نرم افزار اپنسیس در گره‌های فوقانی، دو جرم متمرکز ۵۷/۵ تنی اختصاص داده شده است (شکل ۲).



شکل ۲. مشخصات قاب یک درجه آزادی جهت

صحت‌سنجی [۱۲].

اتصال ستون‌ها به زمین بصورت صلب، تغییرمکان محوری تیر و ستون‌ها ناچیز و دیافراگم صلب در نظر

۳/۷ و به فاصله ۰/۰۲ استفاده گردیده است و همچنین برای نسبت میرایی از محدوده اعداد ۰ تا ۰/۲۱ و با فاصله ۰/۰۲ استفاده شده است. در مجموع مطالعه برای ۱۲۱ حالت انجام شده و بهترین حالت تحت دو معیار بیشینه مقدار و جذر مجموع مربعات (RMS) مشخص گردیده است.

۶. پارامترهای بهینه با استفاده از روش

تجربی مرجع [۱۸]

برای اینکه معیار مناسبی برای مقایسه بهترین پاسخ در قیاس با مطالعه پارامتری بدست آید از روش تجربی آیکدا و آی او آی استفاده می‌شود [۱۸]. ابتدا روابطی برای TMD در سیستم بدون میرایی ارائه شده است:

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1 + \bar{m}} \quad (1)$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\bar{m}}{8(1 + \bar{m})}} \quad (2)$$

که α_{opt} و ξ_{opt} نسبت فرکانسی و نسبت میرایی میراگر در سیستم بدون میرایی هستند. همچنین \bar{m} نسبت جرمی میراگر به سازه اصلی است [۱۸].

سپس برای TMD در سیستم میرا شده نیز روابطی به شرح زیر ارائه شده:

$$\bar{\alpha}_{opt} = \alpha_{opt} - (0.241 + 1.7\bar{m} - 2.6\bar{m}^2)\xi_s - (1 - 1.9\bar{m} + \bar{m}^2)\xi_s^2 \quad (3)$$

$$\bar{\xi}_{opt} = \xi_{opt} + (0.13 + 0.12\bar{m} + 0.4\bar{m}^2)\xi_s - (0.01 + 0.9\bar{m} + \bar{m}^2)\xi_s^2 \quad (4)$$

و مدول الاستیسیته 20000000 kg/cm^2 می‌باشد. برای بارگذاری از مجموع بار مرده به همراه ۲۰ درصد بار زنده استفاده شده است که در مجموع 620 kg/cm^2 به سقف‌ها بار گسترده اعمال شده است. همچنین از خاک تیپ ۳ و شتاب مبنای طرح ۰/۳۵ جهت انجام آنالیز استفاده شده است.

در انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها، زلزله‌های با بزرگی ۶ تا ۷/۶ ریشتر انتخاب شده است و به منظور انتخاب زلزله‌های حوزه دور از گسل، فاصله گسل ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. از ۳ رکورد طیس، منجیل و لندرز^۸ برای انجام تحلیل دینامیکی تایخچه زمانی مطابق با جدول ۱ استفاده شده است [۱۰].

جدول ۱. مشخصات رکورد زلزله‌های انتخابی

شماره رکورد	۱	۲	۳
نام رکورد	طیس	منجیل	لندرز
ایستگاه ثبت	فردوس	قزوین	Thousand Palms Post Office
سال وقوع	۱۹۷۸	۱۹۹۰	۱۹۹۲
بزرگی	۷,۳۵	۷,۳۷	۷,۲۸

۵. معرفی پارامترهای میراگر جرمی

به منظور آنالیز حساسیت پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده، از یک قاب ۱۰ طبقه که معرف ساختمان بلند مرتبه می‌باشد استفاده شده است [۱۰] و میراگر جرمی در طبقه بام نصب گردیده و مطالعات پارامتری بر روی قاب مذکور انجام گردیده است. به این ترتیب برای نسبت فرکانسی میراگر از محدوده اعداد ۱/۷ تا

که $\bar{\alpha}_{opt}$ و $\bar{\xi}_{opt}$ بیانگر نسبت فرکانسی و نسبت میرایی TMD در سیستم میرا شده هستند [۱۸].

با توجه به روابط ارائه شده، پارامترهای بهینه شده برای ۳ نسبت جرمی ۲، ۳ و ۴ درصد، مطابق با جدول ۲ ارائه می‌شود:

جدول ۲. پارامترهای بهینه برای میراگرهایی با نسبت جرمی متفاوت

نسبت جرمی	جرم	نسبت فرکانسی	نسبت میرایی	فرکانس میراگر
\bar{m}	(kg)	$\bar{\alpha}_{opt}$	$\bar{\xi}_{opt}$	ω_{TMD}
۲٪	۱۲۰۰۰	۰/۹۶۴۳	۰/۹۲۳	۲/۷۱
۳٪	۱۸۰۰۰	۰/۹۵۴۰	۰/۱۱۱۱	۲/۶۸
۴٪	۲۴۰۰۰	۰/۹۴۳۹	۰/۱۲۶۷	۲/۶۵

۷. معیار بررسی پاسخ‌ها

برای بررسی پاسخ‌ها از دو معیار $J1$ و $J2$ استفاده شده است. معیار $J1$ نمایانگر کنترل و استفاده از بیشینه پاسخ‌های سازه کنترل شده نسبت به سازه کنترل نشده برای ارزیابی پاسخ‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه معیار $J1$ چندان معیار دقیقی برای بررسی پاسخ‌ها نیست، از معیار $J2$ نیز استفاده می‌شود که بیانگر جذر مجموع مربعات یا RMS پاسخ سازه کنترل شده نسبت به سازه کنترل نشده در طول مدت تحلیل است. رابطه‌های ۵ و ۶ نحوه محاسبه این دو معیار را نشان می‌دهند:

$$J1 = \frac{\max|x_c(t)|}{\max|x_u(t)|} \quad (5)$$

$$J2 = \frac{RMS(x_c(t))}{RMS(x_u(t))} \quad (6)$$

که $x_c(t)$ و $x_u(t)$ به ترتیب بیانگر پاسخ سازه کنترل شده با میراگر و پاسخ سازه کنترل نشده می‌باشد.

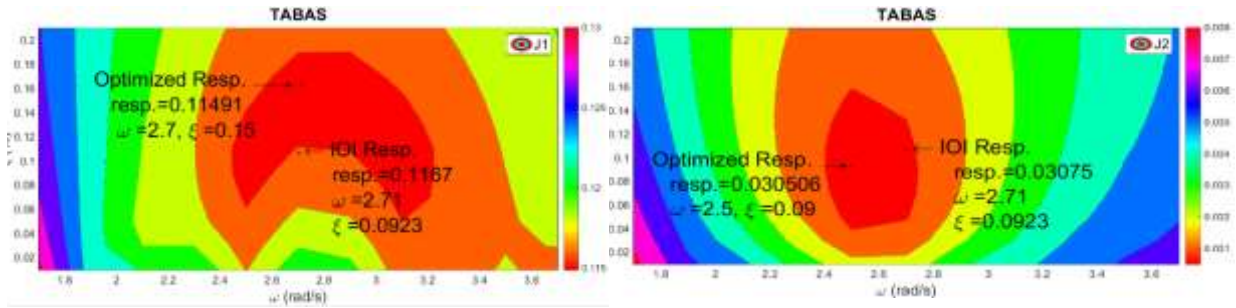
۸. تجزیه و تحلیل داده

پس از انجام تحلیل‌ها با پارامترهای مختلف در نرم افزار اپنسیس، خروجی‌ها به شکل نمودارهای کانتور ترسیم شده‌اند. در نمودارهای خروجی، محور افقی نمایانگر نسبت‌های فرکانسی و محور قائم بیانگر نسبت‌های میرایی مختلف می‌باشد و منحنی‌های داخل کانتور نیز بیانگر حداکثر جابجایی ثبت شده طبق معیارهای $J1$ و $J2$ می‌باشد.

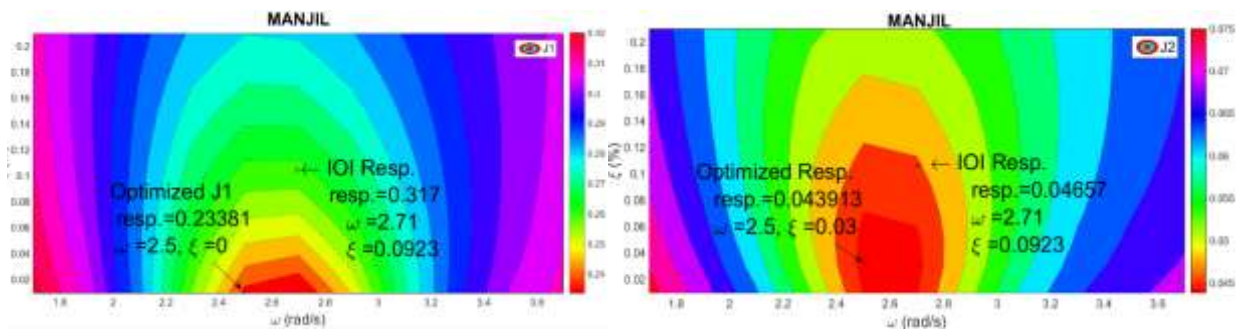
۸-۱. مطالعه پارامتری

در شکل ۴، مطالعه پارامتری بر روی سازه با نسبت جرمی ۲ درصد با استفاده از دو معیار جابجایی بیشینه ($J1$) و جابجایی RMS ($J2$) انجام شده است.

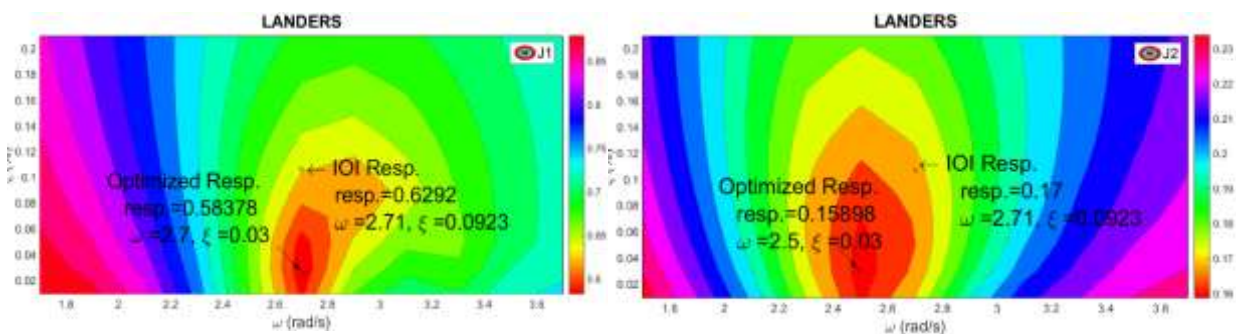
همانطور که از کانتورها مشخص است، بهترین پاسخ‌های تحلیل حساسیت برای هر ۳ رکورد در محدوده نسبت فرکانسی ۲/۵ تا ۲/۷ اتفاق افتاده است. محدوده بهینه برای نسبت میرایی برای هر رکورد متفاوت است و برای رکوردهای طیس، منجیل و لندرز به ترتیب محدوده بهینه نسبت میرایی بین (۰/۰۹ - ۰/۱۵)، (۰/۰۱ - ۰/۰۳) و (۰/۰۱ - ۰/۰۵) می‌باشد. در شکل ۵، با استفاده از دو معیار $J1$ و $J2$ آنالیز حساسیت بر روی سازه با نسبت جرمی ۳ درصد انجام گرفته است. محدوده بهینه نسبت میرایی در تحلیل حساسیت برای رکوردهای طیس، منجیل و لندرز بین (۰/۰۷ - ۰/۱۱)، (۰/۰۱ - ۰/۰۵) و (۰/۰۱ - ۰/۰۵) می‌باشد.



(الف)



(ب)

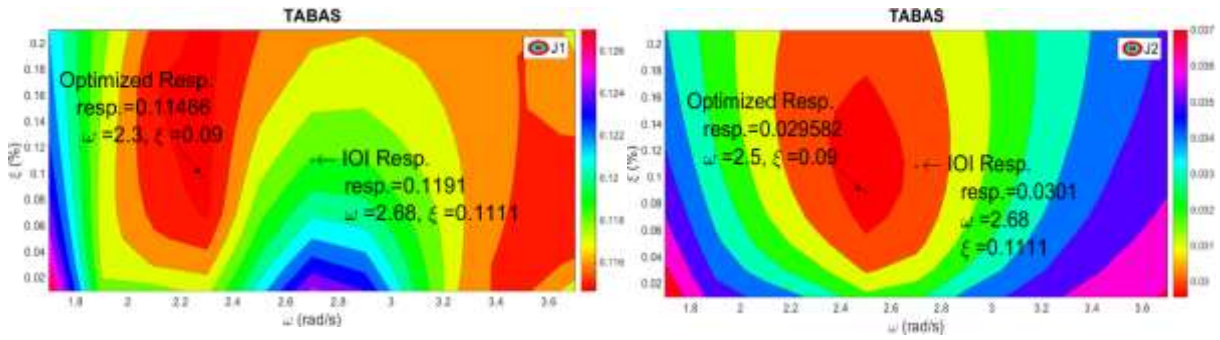


(ج)

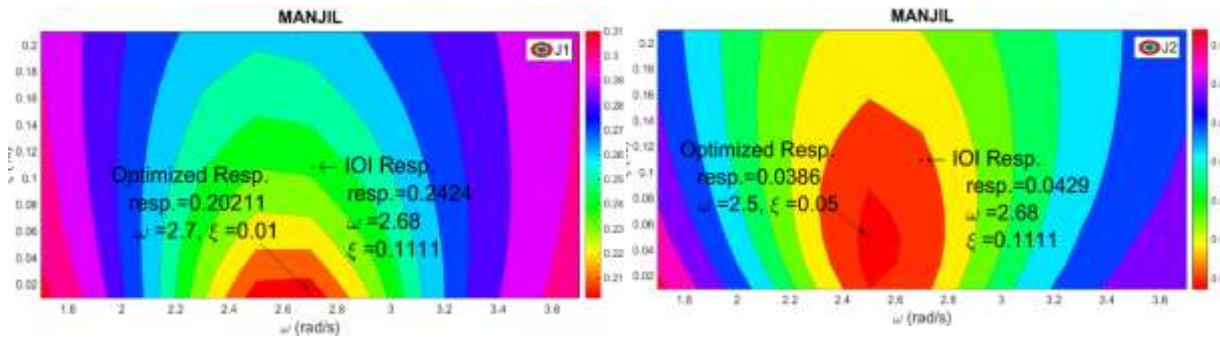
شکل ۴. مطالعه پارامتری بر روی شاخص‌های میرایی با نسبت جرمی ۲ درصد: (الف) زلزله طبس، (ب) زلزله منجیل، (ج) زلزله لندرز

بهترین پاسخ‌ها تحت تحلیل حساسیت برای رکوردها در محدوده نسبت فرکانسی ۲/۱ تا ۲/۷ اتفاق افتاده است و همچنین به ترتیب بهترین محدوده نسبت میرایی برای این مطالعه پارامتری تحت رکوردهای طبس، منجیل و لندرز بین (۰/۱۱ - ۰/۱)، (۰/۱ - ۰/۰۵) و (۰/۰۳ - ۰/۰۷) می‌باشد.

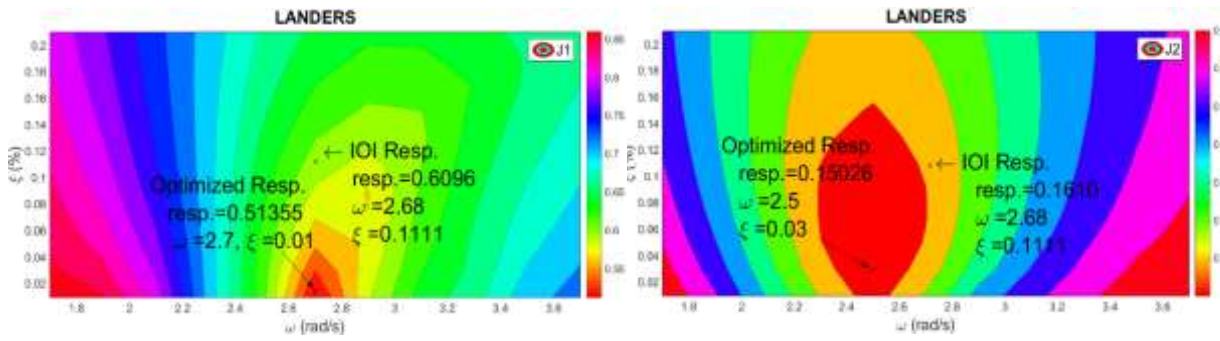
همچنین، بهترین پاسخ‌ها در تحلیل حساسیت برای هر رکورد در محدوده نسبت فرکانسی ۲/۳ تا ۲/۷ اتفاق افتاده است. نمودار کانتورهای خروجی از مطالعه پارامتری بر روی سازه با نسبت جرمی ۴ درصد با استفاده از دو معیار (J1) و (J2) در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که از کانتورها مشخص است،



(الف)

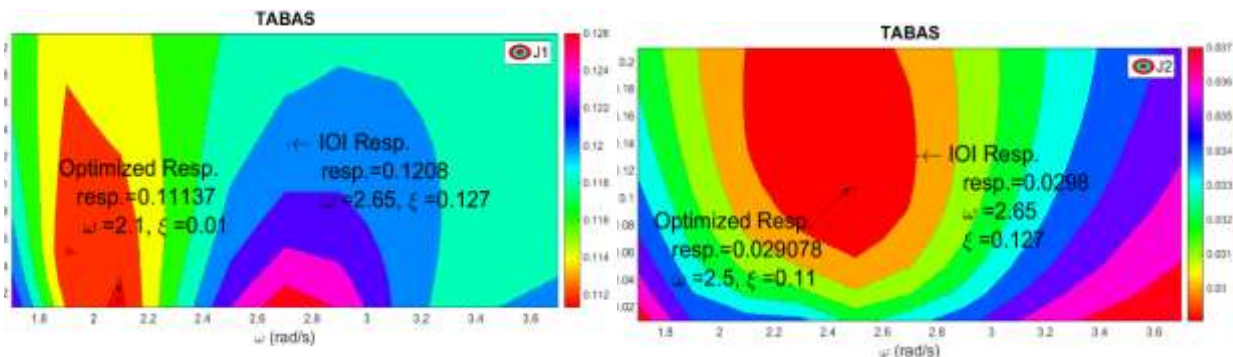


(ب)

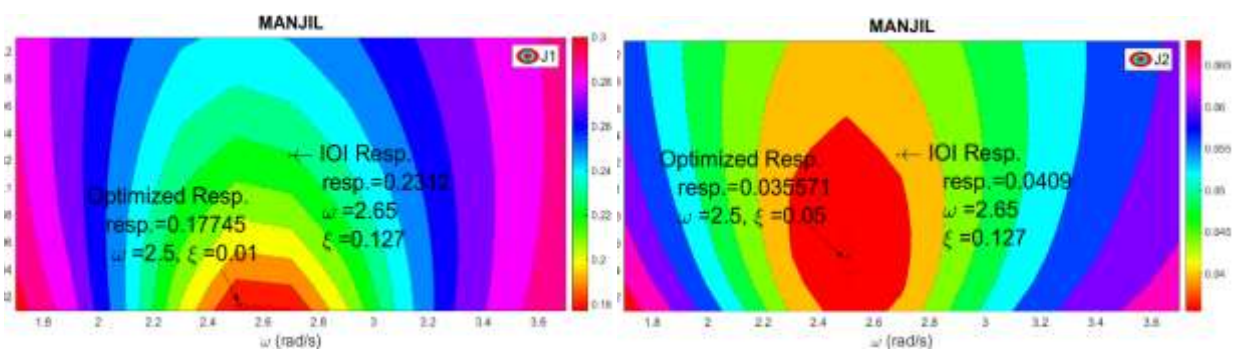


(ج)

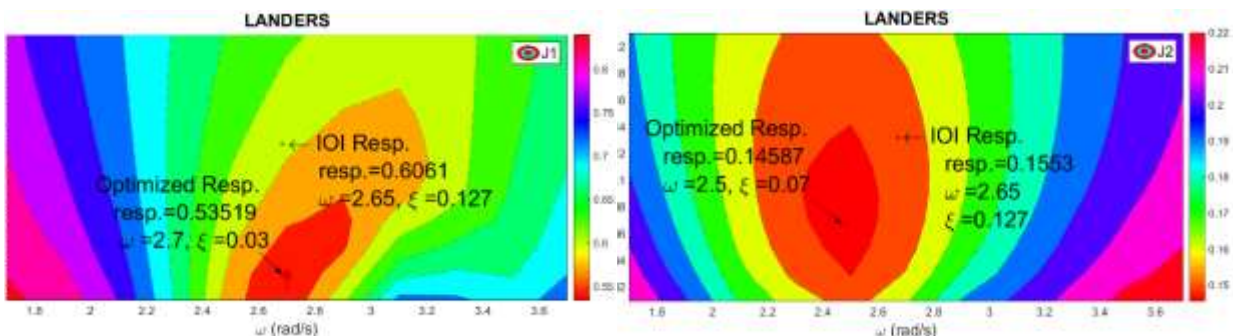
شکل ۵. مطالعه پارامتری بر روی شاخص‌های میرایی با نسبت جرمی ۳ درصد: الف) زلزله طیس، ب) زلزله منجیل، ج) زلزله لندرز



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶. مطالعه پارامتری بر روی شاخص‌های میرایی با نسبت جرمی ۴ درصد: (الف) زلزله طیس، (ب) زلزله منجیل، (ج) زلزله لندرز

جرمی به نسبت میرایی است، درحالی‌که حداقل تغییر در محدوده نسبت فرکانسی به وضوح مشهود است. همچنین تاثیر معیار سنجش در محدوده نسبت فرکانسی و نسبت میرایی در رکوردهای مختلف

با بررسی شکل‌های ۴، ۵ و ۶ همانطور که مشاهده می‌شود برای سازه با نسبت جرمی ۲ درصد، نسبت فرکانسی در قیاس با نسبت میرایی محدودتر است. علت این اتفاق عدم حساسیت چندان میراگرهای

رکورد آورده شده است. به طوریکه این دو معیار بیانگر پاسخ‌های جابجایی بام در حالتی که از میراگر استفاده شده است نسبت به پاسخ سازه کنترل نشده، به دو روش تحلیل حساسیت و روش مرجع [۱۸] می‌باشد. لازم به ذکر است مقادیر کمتر، نشان دهنده عملکرد بهتر معیار است. همانطور که از داده‌های نسبت جرمی مختلف مشخص است، رکوردهای مختلف پاسخ‌های متفاوتی را نشان می‌دهد، بطوریکه برای

مشهود است به طوریکه معیار $J1$ پاسخ‌های پراکنده‌تری را نسبت به معیار $J2$ بدست می‌دهد. بطور مثال، نتایج تحت رکورد طبس تفاوت زیادی در نسبت فرکانسی برای دو معیار مذکور و بخصوص در نسبت جرمی ۳ و ۴ درصد را نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از تحلیل حساسیت و مقایسه با پاسخ‌های معیار Ioi ، با نتایج پژوهش‌های قبلی تطابق قابل قبولی دارد [۱۲]. در جدول ۳، دو معیار سنجش $J1$ و $J2$ برای ۳

جدول ۳. معیار $J1$ و $J2$ برای پاسخ جابجایی بام سازه

رکورد زلزله	معیار سنجش	نسبت جرمی ۲٪	نسبت جرمی ۳٪	نسبت جرمی ۴٪	میانگین
طبس	$J1$	0.9040	0.9024	0.8764	0.894
	تحلیل حساسیت				
	$J2$	0.8472	0.8222	0.8083	0.826
	$J1$	0.9182	0.9371	0.9504	0.935
منجیل	$J2$	0.8527	0.8361	0.8278	0.839
	Ioi and Ikeda, 1978				
	$J1$	0.7380	0.6379	0.5603	0.645
	تحلیل حساسیت				
لندرز	$J2$	0.6157	0.5414	0.4993	0.552
	$J1$	0.8204	0.7651	0.7298	0.772
	Ioi and Ikeda, 1978				
	$J2$	0.6536	0.6031	0.5736	0.610
لندرز	$J1$	0.6868	0.6041	0.6296	0.640
	تحلیل حساسیت				
	$J2$	0.7035	0.6650	0.6456	0.671
	$J1$	0.7402	0.7172	0.7131	0.724
لندرز	Ioi and Ikeda, 1978				
	$J2$	0.7522	0.7124	0.6872	0.720

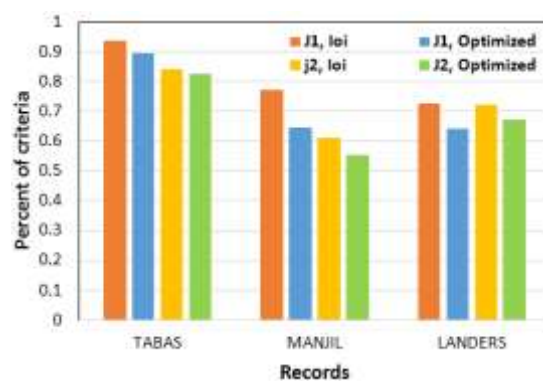
افزایش نسبت جرمی، بهبود چندانی در پاسخ‌ها دیده نمی‌شود. روند بهبود پاسخ‌ها با افزایش نسبت جرمی، برای رکوردهای منجیل و لندرز کمی متفاوت است.

رکورد طبس و برای پاسخ‌های بدست آمده از آنالیز حساسیت، با افزایش ۱٪ نسبت جرمی، پاسخ‌ها ۲٪ بهبود داشته‌اند در صورتی که برای روش Ioi با

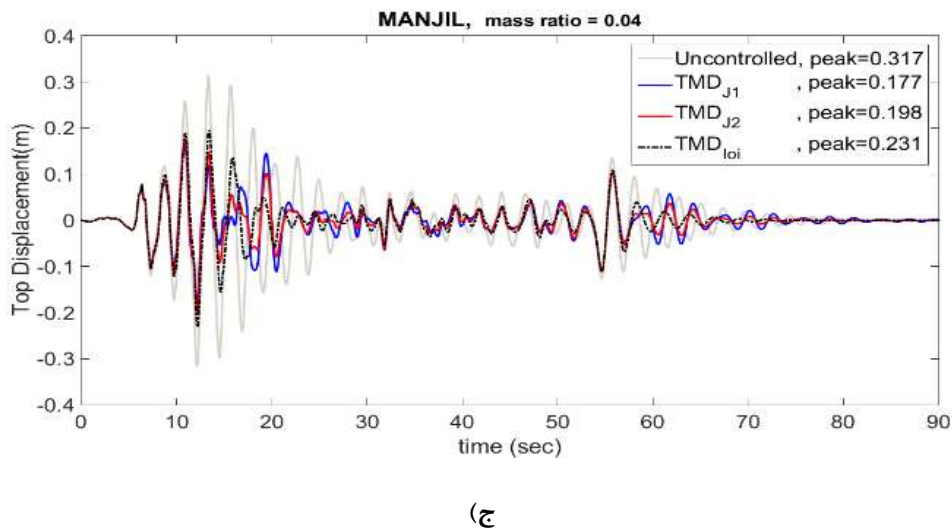
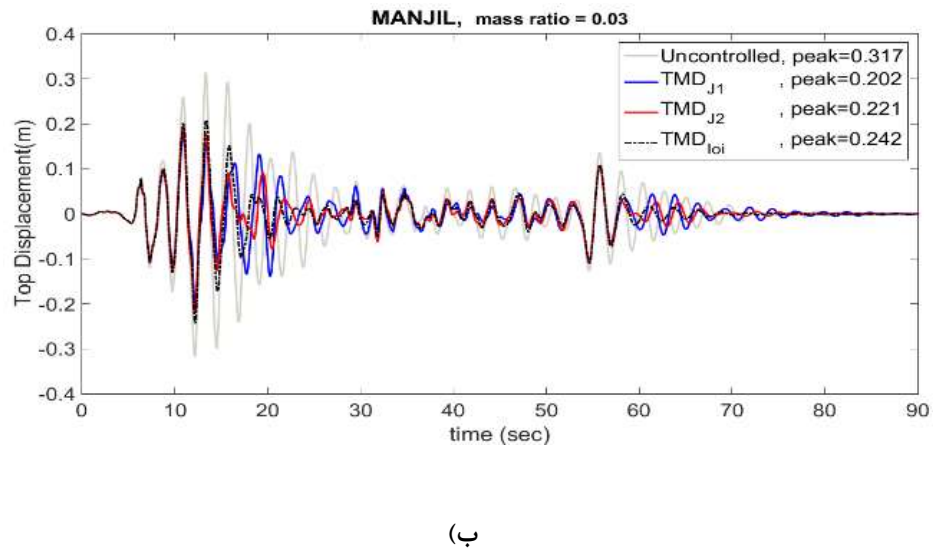
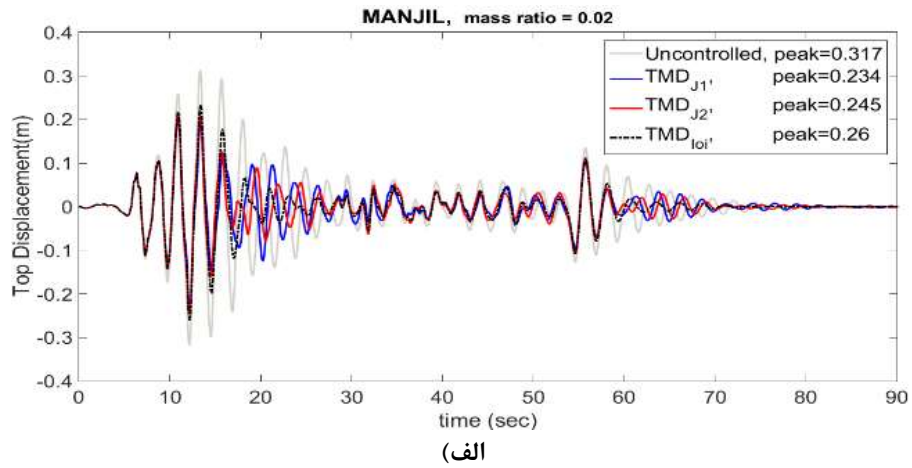
۸-۲. نمودار تاریخچه زمانی جابجایی بام

در شکل ۸ نمودار تاریخچه زمانی جابجایی بام در رکورد منجیل و با نسبت جرمی‌های مختلف جهت نمونه نشان داده شده است. نمودارهای تاریخچه زمانی در ۴ حالت سازه کنترل نشده، بهترین پاسخ سازه کنترل شده تحت تحلیل حساسیت برای معیار $J1$ ، سازه کنترل شده با بهترین پاسخ تحت تحلیل حساسیت با معیار $J2$ و سازه کنترل شده تحت روش مرجع [۱۸] ترسیم شده است. همانطور که مشخص است، بیشینه پاسخ‌ها به روش $J1$ و $J2$ کمتر از بیشینه پاسخ به روش مرجع [۱۸] هست. ولی در ۳۰ ثانیه پایانی رکورد، سازه با پارامترهای روش IoI زودتر از سازه با پارامترهای $J1$ و $J2$ روند میرایی خود را شروع کرده است. همچنین سازه با پارامتر $J2$ با وجود اینکه بیشینه پاسخ بیشتری نسبت به سازه با پارامتر $J1$ نشان می‌دهد، ولی در ۳۰ ثانیه پایانی رکورد، زودتر به میرایی می‌رسد

بطوریکه برای زلزله منجیل، روند کاهشی با روش‌های تحلیل حساسیت و روش مرجع [۱۸] به ترتیب ۱۱٪ و ۶٪ و برای زلزله لندرز به ترتیب ۴٪ و ۳٪ می‌باشد. به طور میانگین، روند بهبود پاسخ‌ها با هر ۱٪ افزایش نسبت جرمی، برای روش‌های تحلیل حساسیت و روش مرجع [۱۸] به ترتیب ۶ و ۳ درصد می‌باشد که نشان دهنده این است که در صورت استفاده از پارامترهای بدست آمده از مطالعه پارامتری، افزایش نسبت جرمی میراگرها تاثیر حدود دو برابری نسبت به پارامترهای روش مرجع [۱۸] دارد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، دو معیار با روش تحلیل حساسیت و روش مرجع [۱۸] مقایسه شده‌اند که در هر دو روش معیار $J2$ نسبت به $J1$ حدود ۵ تا ۲۰ درصد پاسخ‌های بهتری داشته است. همچنین معیارها در روش آنالیز حساسیت نسبت به روش مرجع [۱۸] عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند.



شکل ۷. تفاوت معیار $J1$ و $J2$ برای دو حالت تحلیل حساسیت و روش مرجع [۱۸]



شکل ۸. تاریخچه زمانی جابجایی سازه ۱۰ طبقه تحت رکورد منجیل با نسبت های جرمی:
 (الف) ۲٪ (ب) ۳٪ و (ج) ۴٪

۹. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مطالعه پارامتری بر روی یک سازه ۱۰ طبقه فولادی انجام شده است. هدف نهایی این مطالعه تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای نسبت میرایی و نسبت فرکانسی میراگر جرمی بوده است. این پژوهش در ۳ نسبت جرمی متفاوت انجام شده و در نهایت بیشینه پاسخ‌ها با دو معیار $J1$ و $J2$ و همچنین روش مرجع [۱۸] سنجیده شده است. نتایج این مطالعه به شرح زیر است:

(۱) در تحلیل حساسیت، مقادیر نسبت فرکانسی، محدوده کوچک‌تری را در قیاس با مقادیر نسبت میرایی نشان می‌دهد که به این معنی است که میراگرهای جرمی حساسیت کم‌تری به نسبت میرایی دارند، در حالیکه در محدوده نسبت فرکانسی، پاسخ‌ها به حداقل تغییر حساسیت نشان می‌دهند.

(۲) روش تحلیل حساسیت پاسخ‌های بهتری را در قیاس با روش مرجع [۱۸] نشان می‌دهد. بطوریکه برای روش‌های تحلیل حساسیت و روش مرجع [۱۸]، با هر ۱٪ افزایش نسبت جرمی، پاسخ‌های میانگین ۳ رکورد به ترتیب ۰.۶٪ و ۰.۳٪ بهبود داشته‌اند، که نشان دهنده اثربخشی دو برابری روش تحلیل حساسیت در قیاس با روش مرجع [۱۸] برای کاهش پاسخ‌های جابجایی است.

(۳) در هر دو روش پاسخ‌های بدست آمده از معیار $J2$ نسبت به $J1$ حدود ۵ تا ۲۰ درصد پاسخ‌های بهتری داشته است. پاسخ‌های بدست آمده از تحلیل حساسیت با معیار $J1$ نسبت به پاسخ‌های تحلیل حساسیت با معیار $J2$ و روش مرجع [۱۸] به ترتیب پاسخ بیشینه کم‌تری را نشان می‌دهد، در حالیکه این روند برای ثابتهای پایانی معکوس است و روش مرجع [۱۸] زودتر روند میرایی را آغاز می‌کند.

مراجع

- [1] Asgari, Hadi, Seyed Mehdi Zahrai, Mehdi Vajdian, and Seyed Mohamad Mirhosseini. "Cyclic testing of two-level control system using friction-yielding top plates in beam-to-column rigid connections". Structures Jan 2024, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105696>, Vol. 59, pp. 1-20.
- [2] Asgari, Hadi, Seyed Mehdi Zahrai, Mehdi Vajdian, and Seyed Mohamad Mirhosseini. "Investigating Effect of Friction-yielding Top Plate of Rigid Connections on Seismic Response of Special Moment Frames." International Journal of Engineering, Jan. 1, 2024, doi: 10.5829/ije.2024.37.08b.11, https://www.ije.ir/article_187965.html, Vol. 37, No. 8, 1580-1591.
- [3] Frahm, Hermann. "Device for damping vibrations of bodies." U.S. Patent 989,958, issued April 18, 1911.
- [4] Bathaei, Akbar, Seyed Mehdi Zahrai, and Meysam Ramezani. "Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+ MR damper using type-1 and-2 fuzzy algorithms." *Journal of vibration and control* 24, No. 13 (2018): 2938-2953.
- [5] Soheili, Saeed, Hooman Zoka, and Mahdi Abachizadeh. "Tuned mass dampers for the drift reduction of structures with soil effects using ant colony optimization." *Advances in Structural Engineering* 24, No. 4 (2021): 771-783.

- [6] Wang, Liangkun, Weixing Shi, and Ying Zhou. "Adaptive-passive tuned mass damper for structural aseismic protection including soil-structure interaction." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 158 (2022): 107298.
- [7] Su, Xiaoyang, Houjun Kang, and Tieding Guo. "Modelling and energy transfer in the coupled nonlinear response of a 1: 1 internally resonant cable system with a tuned mass damper." *Mechanical Systems and Signal Processing* 162 (2022): 108058.
- [8] Hrovat, Davorin, Pinhas Barak, and Michael Rabins. "Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control." *Journal of Engineering Mechanics* 109, No. 3 (1983): 691-705.
- [۹] سحاب، محمدقاسم و رضایی هزاوه، احسان، "مطالعه آزمایشگاهی پارامترهای موثر میراگر جرمی تنظیم شده برای مدل ساختمان یک طبقه"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، اردیبهشت ۸۹.
- [۱۰] حق‌اللهی، عباس و عباسی طرئی، مرضیه و بشارت محسنی، محسن، "تعیین پارامترهای بهینه میراگر کنترل جرمی در ساختمان های بلند مرتبه"، دومین کنفرانس ملی سازه-زلزله-ژئوتکنیک، مازندران، آذر ۹۱.
- [۱۱] صابری حسین آباد، حسین و احمدی ندوشن، بهروز، "بهینه سازی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شونده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری"، سومین کنفرانس ملی سازه و زلزله، کرمان، مهر ۹۱.
- [12] Ramezani, Meysam, Akbar Bathaei, and Seyed Mehdi Zahrai. "Designing fuzzy systems for optimal parameters of TMDs to reduce seismic response of tall buildings." *Smart Structures and Systems* 20, No. 1 (2017): 61-74.
- [13] Ramezani, Meysam, A. Bathaei, and Seyed Mehdi Zahrai. "Comparing fuzzy type-1 and-2 in semi-active control with TMD considering uncertainties." *Smart Struct Systems* 23, No. 2 (2019): 155-171.
- [14] Frans, Richard, and Yoyong Arfiadi. "Parameters optimization of tuned mass damper using fast multi swarm optimization." In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 419, No. 1, p. 012127. IOP Publishing, 2020.
- [15] Lara, L., D. Caicedo, Y. Farbiarz, J. Brito, and Y. Valencia. "Design of a Tuned Mass Damper Inerter using optimization based on exhaustive search for the vibration control of a seismically excited structure."
- [16] Wang, Liangkun, Satish Nagarajaiah, Weixing Shi, and Ying Zhou. "Seismic performance improvement of base-isolated structures using a semi-active tuned mass damper." *Engineering Structures* 271 (2022): 114963.
- [17] Vahdani, Reza, Mohsen Khazaei, and Ali Kheyroddin. "Determination of Optimum Location of Multiple Tuned Mass Dampers in Regular and Irregular Steel Buildings in Plan under Near and Far-Fault Earthquakes." *Journal of Structural and Construction Engineering* 8, no. Special Issue 2 (2021): 264-285.
- [18] Ioi, Toshihiro, and Ken Ikeda. "On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system." *Bulletin of JSME* 21, No. 151 (1978): 64-71.

-
- ¹ Tuned Mass Damper (TMD)
 - ² OpenSees
 - ³ Ikeda and Ioi
 - ⁴ Active Tuned Mass Damper (ATMD)
 - ⁵ Semi Active Tuned Mass Damper (SATMD)
 - ⁶ Den Hartog
 - ⁷ El Centro Earthquake
 - ⁸ Landers, in USA