یادداشت تحقیقاتی:

مجله علمی- پژوهشی
«عمـران مـــدرس»
دوره دهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۸۹

تحلیل عددی کنترل ارتعاشات ساختمان‌های بلند با استفاده از سیستم جرم میراگر متوازن مطالعه موردی: ساختمان برج بین‌المللی تهران

محمدرضا بمانیان[1*]، محمدرضا اخوت[2]، هانیه اخوت[3]

۱- دانشیار گروه معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دکتری عمران سازه، دانشگاه توکیو، ژاپن

۳- دانشجوی دکتری رشته معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

Bemanian@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۷/۰۷

چکیده- سیستم‌های جذب انرژی غیرفعال سازه‌ها، در سال‌های اخیر به‌طور وسیعی در صنعت ساختمان استفاده شده‌اند. به‌طور کلی، این سیستم‌ها شامل وسایل و مصالحی می‌شوند که میرایی، سختی و مقاومت سازه را افزایش داده و می‌توانند برای کاهش خطرات طبیعی محتمل و نیز مقاوم‌سازی سازه‌های جدید یا ساخته شده به‌کار روند. با وجود این، متأسفانه در صنعت ساختمان کشورمان، چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند.

سیستم کنترلی جرم میراگر متوازن[1]، یک میراگر غیرفعال نسبتاً جدید است که مطالعه راجع به آن و استفاده از آن در سال‌های اخیر انجام شده است. عملکرد این سیستم بر اساس استهلاک انرژی ارتعاشی سازه به شکل حرکت نوسانی جرم میراگر است. در این پژوهش، عملکرد سیستم جرم میراگر متوازن تحت تحریک زمین لرزه، برای یک سازه بلند خاص که به خاطر سیستم سازه‌ای به‌کار رفته در آن، شکل‌پذیری چندانی ندارد، مطالعه شده است. نتیجه آن‌که اگرچه یافته‌های حاصل تا حد زیادی به ویژگی‌های شتاب‌نگاشت مورد استفاده در تحلیل وابسته است، حتی با استفاده از جرمی کوچک در مقایسه با جرم خود سازه، می‌توان پاسخ تغییر مکان و شتاب سازه را به میزان نسبتاً مناسبی کاهش داد. از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهد که سیستم جرم میراگر متوازن نسبت به فرکانس تنظیمی خود بسیار حساس است؛ از این رو استفاده از سیستم جرم میراگر چندگانه[2] برای رفع این اشکال پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژگان: کنترل ارتعاشات، جرم میراگر متوازن، سازه‌های بلند، برج بین‌المللی تهران

۱- مقدمه

برای مشخص کردن تأثیر استفاده از سیستم کنترلی جرم میراگر متوازن بر پاسخ سازه‌ای ساختمان برج

1. TMD
2. MTMD

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-23]

تهران(شکل۱)، پس از معرفی سیستم جرم میراگر متوازن، ساختمان از لحاظ سازه و معماری بررسی می‌شود. سپس درباره نحوه مدل‌سازی و فرضیات آن بحث شده و نتایج تحلیل و اعتبارسنجی مدل ارائه می‌شود. در مرحله بعد، تعیین می‌شود مشخصات جرم میراگر متوازن فرض شده و تأثیر عملکرد آن در کاهش پاسخ ساختمان، با انجام مقایسات مربوط، مطالعه می‌شود.

شکل (۱) نمای از بالای برج در حال ساخت

۲- سازه برج تهران

ساختمان برج ٥٦ تهران دارای سه پره اصلی در پلان، به ابعاد تقریبی ٤٨ در ۲۲ متر است که در یک نقطه مرکزی با هم تلاقی دارند و طبق نقشه‌های سازه‌ای موجود، هیچ درز انبساط یا درز لرزه‌ای در آن مشاهده نمی‌شود. سیستم سازه‌ای برج تهران، بر اساس سیستم‌های سازه‌ای آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران، سیستم دیواری است[۱]. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، دیوارهای سازه‌ای بتن‌آرمه، از دو گروه دیوار تشکیل شده‌اند. گروه اول، دیوارهای سه شاخه یا دیوارهای اصلی است که شاخه‌ها نسبت به یکدیگر دارای زاویه ۱۲۰ درجه است و گروه دوم، دیوارهای عرضی عمود بر این سه شاخه یا دیوارهای فرعی است. دیوارهای فرعی با تیرهای هم‌بند (کوپله) به دیوار اصلی اتصال دارند. وظیفه باربری جانبی عمدتاً به عهده دیوارهای اصلی گذاشته شده که سهم قابل توجهی از نیروهای جانبی ایجاد شده در سازه، در اثر تحریک زمین به‌وسیله‌ی این عناصر جذب می‌شود و وظیفه باربری قائم نیز عمدتاً به عهده دیوارهای فرعی است. درواقع موقعیت قرارگیری دیوارهای فرعی به‌گونه‌ای است که سهم قابل توجهی از مساحت بارگیر هر کف از نوع دال تخت و یکنواخت را به خود اختصاص داده و بنابراین بارهای ثقلی وارد شده را تحمل می‌کند. ضخامت دیوار برشی اصلی از ۲٫۰ تا ۰/۷ متر در ارتفاع متغیر و ضخامت دیوارهای برشی فرعی نیز بین ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر است. دیوارهای اصلی دارای چهار ردیف بازشو است که به‌صورت یک در میان در طبقات قرار گرفته‌اند. همه‌ی دیوارهای برشی فرعی نیز در مجاورت دیوار اصلی، بازشو دارند[۲].

۳- بارهای وارده بر ساختمان

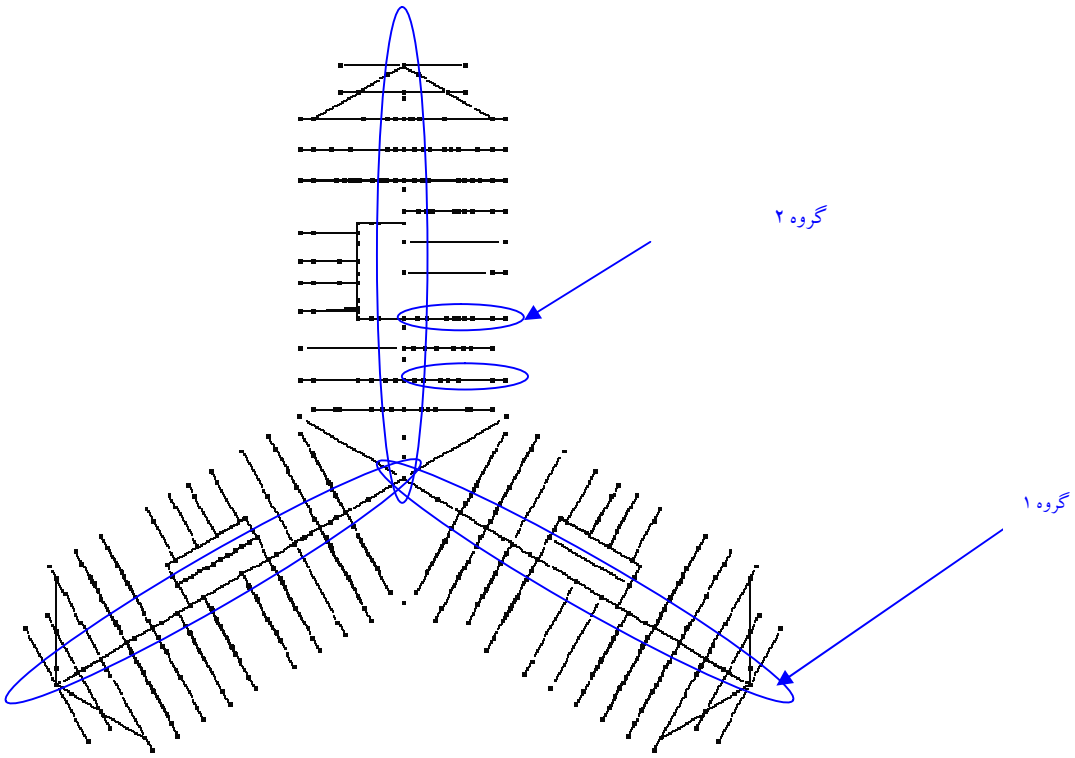
بارهایی که در محاسبات سازه منظور می‌شوند دو گروه بارهای دائمی و فوق‌العاده تقسیم هستند. بارهای دائمی شامل بارهای مرده (وزن سازه)، سربارهای مرده (وزن کفسازی‌ها، تأسیسات، پارتیشن‌ها و غیره) و بارهای زنده است. مقادیر این بارها را با استفاده از روش‌های آماری، با دقت قابل قبولی تعیین کرد.

مقادیر بارهای فوق‌العاده که شامل بارهای حاصل، از زلزله، طوفان‌های شدید، انفجار و غیره است، بسیار نامشخص بوده و تنها از نظر مطالعات آماری قابل تخمین است. به‌دلیل همین نبود اطمینان در تخمین مقادیر این بارها، معمولاً برای آن‌ها حواشی امنیت بزرگ‌تری نسبت به بارهای دائمی در نظر گرفته می‌شود[۲].

زلزله، عمده‌ترین و متداول‌ترین بار فوق‌العاده در ایران است. شناخت دقیق از شرایط محلی، تکتونیک ساختگاهی و تاریخ زلزله‌خیزی منطقه، می‌تواند تا حدود زیادی به

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-23]

تخمین درستتر سازوکار اثر زلزله بر ساختمان کمک کند. برای پروژه موردنظر به‌خاطر اهمیت آن، پیش‌تر به‌وسیله‌ی متخصصان تحلیل خطر زلزله، زوج شتاب‌نگاشت متعامد مناسبی بر اساس آیین‌نامه‌های مربوط به‌دست آمده است [٢]. علاوه بر شتاب‌نگاشت‌های ذکر شده، از سه شتاب‌نگاشت طبیعی نیز در تحلیل استفاده شده است اما در این مقاله به‌خاطر رعایت اختصار، تنها به ذکر نتایج حاصل از تحلیل با یکی از این شتاب‌نگاشت‌ها می‌پردازیم با این توضیح که سایر نتایج نیز روند تقریباً مشابهی با نتایج مطرح شده دارند. برای مشابهت با بیشینه‌ی شتاب قابل وقوع زمین در محل ساختگاه این پروژه، بیشینه‌ی شتاب مؤلفه بزرگ‌تر زوج شتاب‌نگاشت‌های مذکور ٠/٣٥g مقیاس شده و سپس مؤلفه کوچک‌تر در همان ضریب مقیاس ضرب شده است[٣]. سایر مشخصات شتاب‌نگاشت طبیعی مورد استفاده در جدول ١ گرداوری شده است. در این جدول، مقصود از نوع خاک محل ثبت شتاب‌نگاشت، طبقه‌بندی انواع خاک طبق آیین‌نامه UBC است. در شکل ٣، طیف پاسخ شتاب این شتاب‌نگاشت برای ضریب میرایی ٥ درصد رسم شده است.

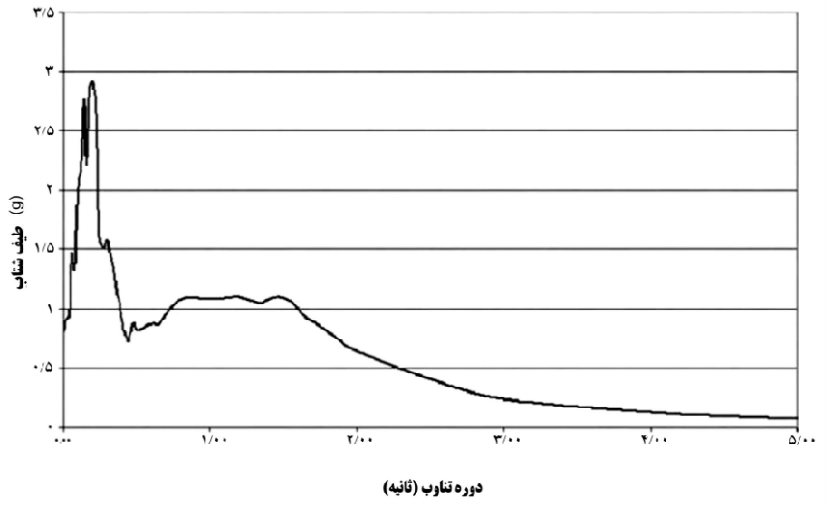


شکل (٢) نمایش دیوارهای اصلی و فرعی سازه برج، [برگرفته از قالیبافان،١٣٨٤]

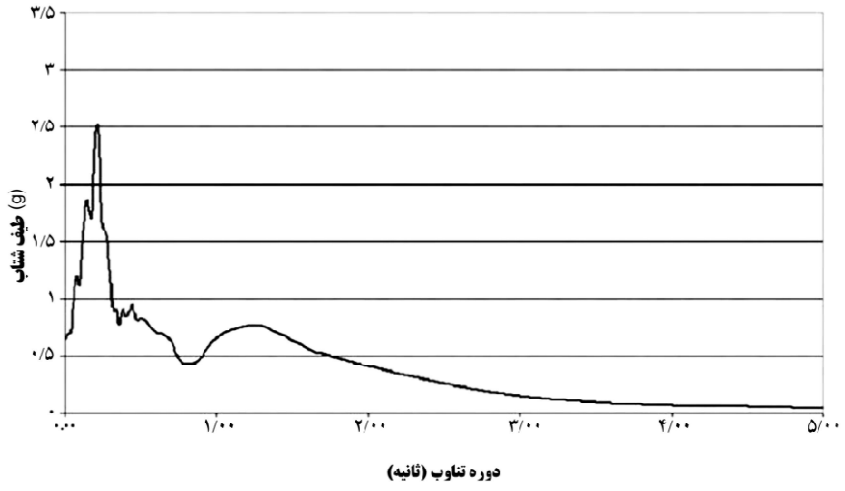
جدول (١) مشخصات شتاب‌نگاشت‌های طبیعی مورد استفاده

نام شتاب‌نگاشت	بزرگی (M_b)	فاصله از کانون (km)	نوع خاک محل ثبت رکورد	مدت زمان مؤلفه بزرگ‌تر (sec)
بم (٢٠٠٣)	٦/٧	١/١	II	٦٦/٥٤

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-23]



(الف)



(ب)

شکل (۳) طیف پاسخ شتاب زلزله بم برای ضریب میرایی ۵٪ (الف) مؤلفه طولی (ب) مؤلفه عرضی

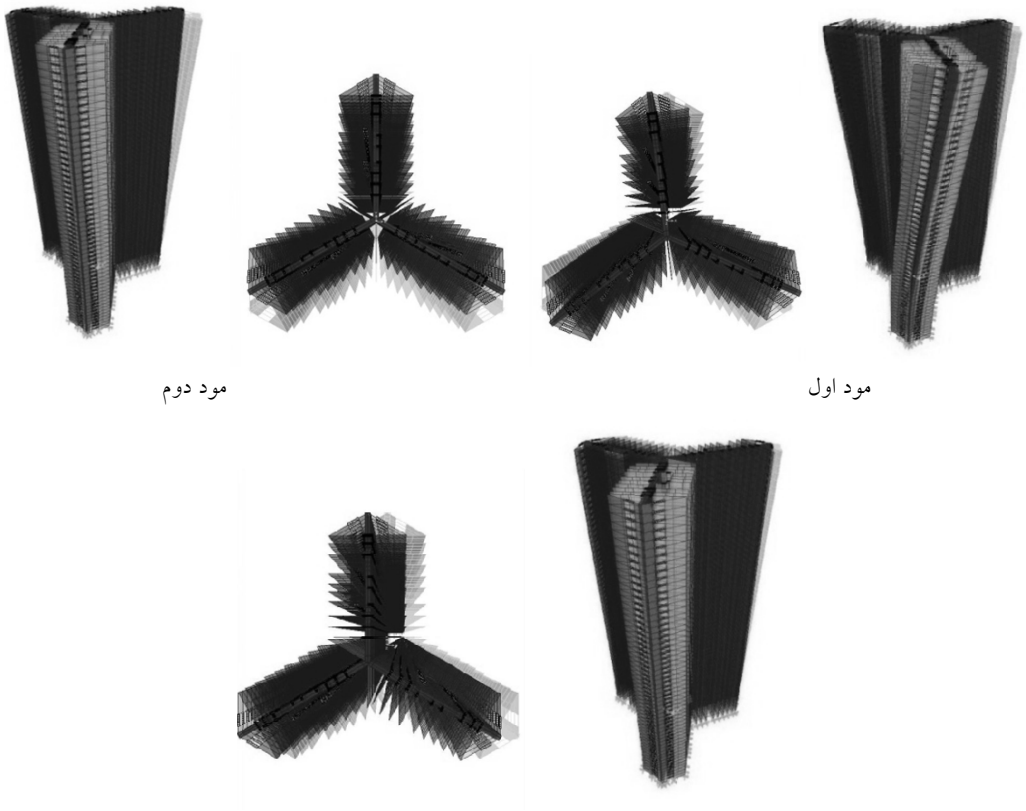
۴- اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی و اطمینان از درست بودن مدل، مودهای اصلی سازه و دوره‌های نظیر آن در جدول ۲، با نتایجی که از مطالعات قبلی به‌دست آمده [۲] مقایسه و تصویر آن‌ها در شکل ٤ نشان داده شده است. با توجه به این جدول، به نظر می‌رسد که دقت مدل، سازی و توانایی آن در بیان رفتار کلی، به اندازه کافی بالا است.

جدول (۲) مقایسه سه مود اصلی و دوره نظیر آن‌ها در مدل‌های ساخته شده در نرم افزارهای مختلف، [برگرفته از نگارندگان]

نام نرم افزار	مود ۱ (ثانیه)	مود ۲ (ثانیه)	مود ۳ (ثانیه)
PERFORM 3D	۳٫۷٦ پیچشی	۱٫۳۳ انتقالی	۱٫۳۰ انتقالی
ETABS	۳٫٤۳ پیچشی	۱٫۲۰ انتقالی	۱٫۱۸ انتقالی
SAP	۳٫٤۷ پیچشی	۱٫٤۰ انتقالی	۱٫٤۰ انتقالی

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-23]



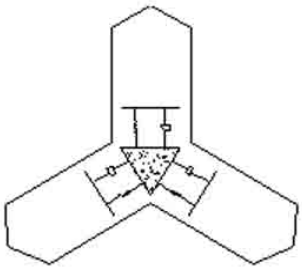
مود اول مود دوم

مود سوم

شکل (٤) تصویر ایزوپارامتریک و پلان از سه مود اصلی در مدل SAP

۵- تأثیر عملکرد جرم میراگر متوازن در پاسخ ساختمان

از آن‌جاکه با توجه به نسبت‌های جرم مشارکت مودی، مودهای دوم وسوم بیش‌ترین نقش را در پاسخ انتقالی سازه دارند، از دوره این مودها برای تنظیم جرم میراگر متوازن استفاده شده است. محل قرارگیری آن، همان‌طورکه در شکل ۵ نمایش داده شده، در محل تلاقی سه بال فرض می‌شود. سیستم جرم میراگر متوازن می‌تواند از یک بلوک بتنی، فولادی و یا سربی تشکیل شده باشد که سه عدد فنر و کمک فنر، آن را در امتداد هریک از بال‌ها احاطه کرده‌اند. می‌توان نشان داد که اگر سختی هریک از این فنرها که با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته‌اند یکسان و برابر k باشد، سختی مجموعه آن‌ها در هر امتدادی برابر $3k/2$ خواهد بود[٤]. این مسئله درباره میرایی مجموعه کمک فنرها نیز درست است [۵].

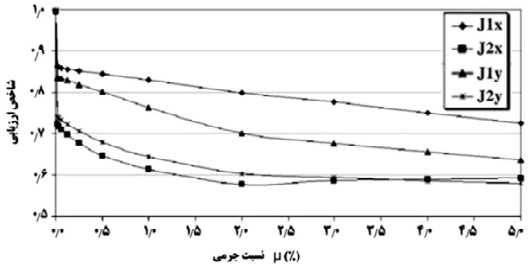


شکل (۵) تصویر شماتیک نحوه قرارگیری TMD مفروض

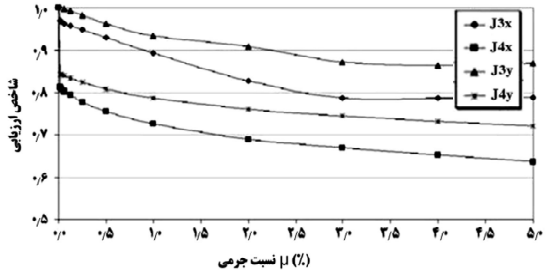
در مطالعات اولیه مشاهده شد که بهترین کاهش پاسخ سازه، زمانی رخ داده است که جرم میراگر روی بالاترین

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-23]

طبقه قرار گرفته است[٦]. بنابراین محل قرارگیری جرم میراگر روی بام ساختمان در نظر گرفته می‌شود که به لحاظ فضای گسترده‌تر نصب کردن و بهره‌برداری از آن نیز آسان‌تر است[٧].

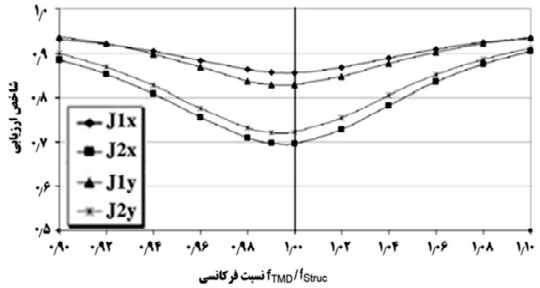


(الف) شاخص‌های ارزیابی پاسخ تغییرمکان

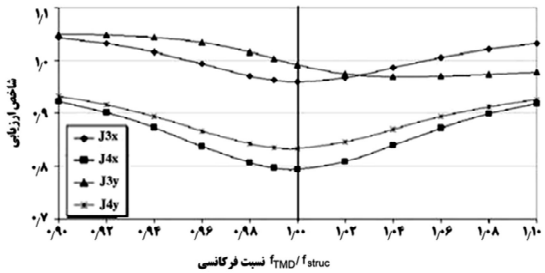


(ب) شاخص‌های ارزیابی پاسخ شتاب

شکل (٦) تأثیر تغییر نسبت جرمی TMD بر پاسخ سازه؛ شتاب‌نگاشت بم



(الف) شاخص‌های ارزیابی پاسخ تغییرمکان



(ب) شاخص‌های ارزیابی پاسخ شتاب

شکل (٧) تأثیر میزان تنظیم‌شدگی TMD بر پاسخ سازه؛ شتاب‌نگاشت بم

۶- نتایج عددی مطالعات پارامتری

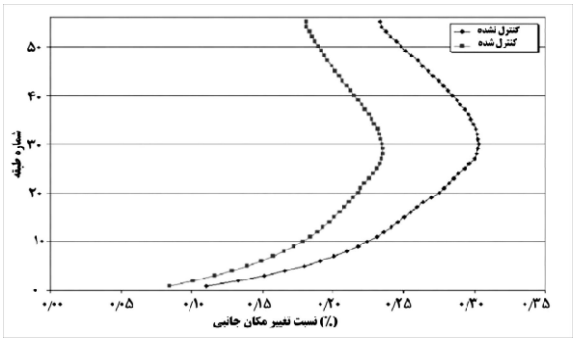
برای یافتن پارامترهای بهینه سیستم کنترلی، بررسی‌هایی انجام شده است. در این بررسی‌ها، ابتدا نسبت جرمی جرم میراگر متوازن از صفر (بدون وجود TMD) تا ۵ درصد تغییر یافته است و میزان کاهش پاسخ ساختمان به ازای این تغییرات، تحت تحریک پایه هر یک از شتاب‌نگاشت‌ها در شکل ٦ نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش نسبت جرمی، پاسخ ساختمان بیش‌تر کاهش می‌یابد. البته در این مطالعات، همزمان با تغییر جرم، سختی فنرها نیز به گونه‌ای تغییر کرده است که نسبت فرکانس تنظیمی جرم میراگر مزبور به فرکانس طبیعی سازه ($f_{TMD}/f_{Structure}$)، برابر با یک باقی بماند. سپس تأثیر مقدار تفاوت از حالت تنظیم شدن کامل جرم میراگرمتوازن، با در نظر گرفتن جرم میراگری مشابه آن‌چه بیان شد، بررسی شده است؛ بدین ترتیب که نسبت فرکانس تنظیمی جرم میراگر مزبور به فرکانس طبیعی سازه، از ۰/۹ تا ۱/۱ تغییر یافته که منجر به تغییر در مقدار سختی فنرها و میرایی کمک‌فنرها شده؛ میزان تأثیر آن در کاهش پاسخ سازه، در شکل ۷ نمایش داده شده است که حساسیت عملکرد جرم میراگر نسبت به فرکانس تنظیمی، در این نمودارها به‌خوبی مشخص است. در نهایت، در شکل ۸ تأثیر استفاده از جرم میراگر در کاهش نسبت تغییرمکان جانبی طبقات ارائه شده است. ضمناً شایان ذکر است که بیشینه‌ی جابه‌جایی برای جرم میراگر متوازنی به جرم ٤۰۰ تن و نسبت میرایی ۷ درصد تحت تحریک شتاب‌نگاشت‌های بم، برابر ۰/۹۸ متر است.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد سیستم جرم میراگر متوازن تحت تحریک زمین لرزه، برای یک سازه بلند خاص که به‌دلیل سیستم سازه‌ای به‌کار رفته در آن، از شکل‌پذیری چندانی

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-23]

برخوردار نیست، مطالعه شده است. با توجه به داده‌های به‌دست آمده، نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:



شکل (٨) نسبت تغییرمکان جانبی طبقات در حالت‌های کنترل‌شده و کنترل‌نشده؛ شتاب‌نگاشت بم

١- اگرچه نتایج حاصل تا حد زیادی به ویژگی‌های هر شتاب‌نگاشت وابسته است ولی به‌طورکلی می‌توان دریافت که حتی جرمی در حدود ٩٠ تن نیز که در مقایسه با جرم خود سازه کوچک است، می‌تواند پاسخ تغییرمکان و شتاب سازه را به ترتیب در حدود ٢٥٪ و ١٥٪ کاهش دهد. ضمناً از آن‌جاکه دیوارهای برشی بتنی ساختمان برای افزایش سختی جانبی آن در نظر گرفته شده است، کاهش پاسخ ساختمان با استفاده از سیستم کنترلی، می‌تواند به طراحی عناصر سازه‌ای سبک‌تری منجر شود. البته براورد مصالح مصرفی در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده و مقایسه آن‌ها از لحاظ اقتصادی، باید با طراحی دوباره کل ساختمان، با در نظر گرفتن جرم TMD انجام شود.

٢- افزایش نسبت جرمی TMD سبب کاهش بیش‌تری در پاسخ ساختمان می‌شود، هرچند نسبت‌های جرمی بزرگ‌تر از ١ درصد تأثیر کم‌تری در کاهش پاسخ سازه دارند.

٣- سیستم جرم میراگر نسبت به مقدار فرکانس تنظیمی خود بسیار حساس است. در این پژوهش، بهترین نتایج زمانی به‌دست آمده‌اند که جرم میراگر متوازن دقیقاً با فرکانس دوم و سوم سازه و یا قدری کم‌تر از آن‌ها تنظیم شده باشد. برای رفع این اشکال می‌توان از جرم میراگر متوازن چندگانه یا MTMD استفاده کرد که البته به‌کارگیری MTMD ممکن است از لحاظ اقتصادی به صرفه نباشد و یا با توجه به معیارهای معماری و اجرایی امکان پذیر نباشد که باید این نکات در پژوهش‌های بعدی بررسی شود.

٨- منابع

[1] Mcnamara, R.J., Tuned mass dampers for building, Journal of the Structural Divisions, ASCE, 1977, 103 (ST9), 1785-1798

[٢] قالیبافان، م.، طاهری بهبهانی، ع.ا.، وهدانی، ش.، میرقادری، ر.، گزارش ارزیابی ایمنی لرزه‌ای برج ٥٦ طبقه تهران، دانشگاه تهران، ١٣٨٤.

[3] Wilson, E.L., Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structure, Computers and Structures, Inc. 2002

[4] Ohtori, Y., Christenson, R.E, Spencer, B.F., Dyke S.J., Benchmark Control problems for seismically excited nonlinear buildings, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2004, 130(4), 366-385

[5] Ankireddi, S., Yang, H.T.Y., Directional mass dampers for building under wind or seismic loads, Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 85, 119-144

[٦] خداپرست رسولی،ش.، بررسی سیستم‌های میراگر جرمی در ساختمان‌های بلند، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ١٣٧٨.

[٧] جوادیان، ش.، مدل‌سازی سه بعدی ساختمان‌های دارای جرم میراگر متوازن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ١٣٨٤.

[8] SAP2000 Integrated Software for structural Analysis and Design, Software Verification examples, Computers and Structures, Inc, 2003

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-23]