

The Effect of Single and Multiple Tuned Mass Dampers on Settling Time of Steel Tall Buildings under Earthquake Motion

Alireza Ghasemi ¹ and Mahmoud Edalati ^{1,*}

1- Department of Civil Engineering, Ilam University, Ilam, Iran
E-mails: alirezaghasemi1994.agh@gmail.com ; m.edalati@ilam.ac.ir

* Corresponding Author

Abstract

Providing novel and effective devices in order to make structures stable under unpredicted natural loads has become a challenging issue for civil engineers. Tuned mass damper (TMD) is one of the effective methods to make structures resistant against the natural dynamic loads such as earthquake and wind. In this paper, the influence of single tuned mass damper (STMD) and multiple tuned mass dampers (MTMDs) on the settling time of tall steel building under seismic loads was evaluated. For this aim, one lumped-mass structure with 20 stories was modelled. The mass ratio, damping ratio and the stiffness of dampers were the variables considered in this study. To model the structure, SAP2000 software was employed. Then, time history analysis scheme was carried out to assess the performance of structure. The obtained outcomes indicated that the displacement of structure strongly depends on the earthquake record. Moreover, the displacement was substantially reduced by using an appropriate TMDs distribution. Generally, TMD has activated after a first maximum applied load amplitude and will become able to reduce subsequent amplitudes. So, it should be stated that the structural responses of the building could be considerably reduced by providing the effective MTMDs in different stories and regulate the characteristics of dampers based on the structural parameters of tall buildings.

Keywords

Single Tuned Mass Damper, Multiple Tuned Mass Dampers, Settling Time, Steel Tall Building.

اثر میراگرهای جرمی تنظیم شونده‌ی منفرد و چندگانه بر زمان آرامش ساختمان‌های بلند فولادی تحت جنبش زلزله

علیرضا قاسمی^۱ و محمود عدالتی^۱

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

ایمیل نویسندگان: alirezaghasemi1994.agh@gmail.com ; m.edalati@ilam.ac.ir

چکیده

از چالش‌ها و دغدغه‌های تأثیرگذار در مهندسی عمران، کشف ابزاری نوین و مؤثر به منظور پایداری و محافظت از سازه‌ها و تجهیزات در مقابل اثرات مخرب نیروهای طبیعی وارد می‌باشد. بهره‌گیری از سیستم میراگر جرم تنظیم شونده از روش‌های مؤثر موجود برای مقابله با پاسخ‌های شدید سازه در برابر تحریکات دینامیکی ناشی از باد و زلزله است. در این مقاله از میراگرهای جرمی تنظیم شونده منفرد و چندگانه به منظور بررسی اثر آنها بر زمان آرامش ساختمان بلند فولادی تحت تحریک‌های لرزه‌ای استفاده شده است. یک مدل سازه‌ای به صورت جرم فضایی ۲۰ طبقه فولادی مدل‌سازی شده است. پارامترهای میراگرهای جرم تنظیم شونده، شامل نسبت جرمی، نسبت میرایی و سختی هستند که در سازه‌ی ۲۰ طبقه در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شده‌اند. سپس تحلیل تاریخچه زمانی بر روی سازه برای بررسی عملکرد آن انجام گرفته است. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که تغییر مکان سیستم تا حد زیادی به شکل رکورد زلزله ورودی وابسته است. با پراکنش (آرایش) مناسب میراگرهای جرم تنظیم شونده در طبقات مختلف ساختمان؛ تغییر مکان سازه به نحوه مطلوبی کاهش می‌یابد. در اصل میراگر جرمی تنظیم شده پس از وقوع اولین بیشینه بار ورودی (شتاب) فعال شده و توان فرو نشانیدن بیشینه‌های بعدی را دارا است. در صورت مکان‌یابی مناسب میراگرهای تنظیم شونده در طبقات مختلف ساختمان و همچنین تنظیم بهینه پارامترهای مکانیکی میراگرهای الحاق شده به سازه می‌توان پاسخ‌های آن را به نحو رضایت‌بخشی کاهش داد.

کلمات کلیدی: میراگر جرم تنظیم شونده منفرد، میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه، زمان آرامش، ساختمان بلند فولادی.

نام نویسنده مسئول: محمود عدالتی

ایمیل نویسنده مسئول: m.edalati@ilam.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴

۱- مقدمه

هیبریدی و نیمه فعال دارند. میراگرهای جرم تنظیم شونده (TMDs) یکی از انواع میراگرهای غیرفعال است که کاربرد آن در ساختمان‌های بلند روز به روز بیشتر می‌گردد [3,4].

رشد روز افزون ساختمان‌های بلند و اهمیت بسیار زیاد حفظ و نگهداری این نوع سازه‌ها در هنگام رخداد زلزله سبب شده است تا مطالعه و پژوهش در زمینه‌ی روش‌های پایداری آنها زیر اثر بارهای لرزه‌ای به امری ضروری تبدیل گردد. حفظ پایداری سازه‌های بلند رابطه‌ی مستقیمی با جابه‌جایی سازه دارد و یکی از مرسوم‌ترین روش‌های کنترل جابه‌جایی در این سازه‌ها، استفاده از میراگرهای جرم تنظیم شونده است. هرچند پژوهش‌ها و مطالعاتی در رابطه با میراگرهای جرمی در سراسر دنیا و همچنین در کشور انجام شده است، اما به مسئله تأثیرگذاری پراکنش جرم میراگرها در ارتفاع سازه بر زمان آرامش پرداخته نشده است.

استفاده از سیستم‌های میراگر جرم تنظیم شونده (TMD) یکی از روش‌های مؤثر موجود برای کنترل پاسخ‌های شدید سازه در مقابل تحریکات دینامیکی است. با به دست آوردن الگویی مناسب و کاربردی در به‌کارگیری TMDها، می‌توان پاسخ سازه‌ها را در برابر نیروهای لرزه‌ای کاهش داد. در واقع هدف از به‌کارگیری این نوع سیستم غیرفعال، کاهش تقاضای اتلاف انرژی سازه در اثر تحریکات نیروهای خارجی از جمله باد و زلزله است. به طور معمول کاهش تقاضا توسط انتقال بخشی از انرژی سازه به میراگر جرمی تنظیم شونده صورت می‌گیرد [5].

روند کنونی در صنعت ساخت و ساز، تقاضای ساختمان‌های بلندتر و مقاوم‌تر را طلب می‌نماید. این ساختمان‌ها بایستی دارای انعطاف‌پذیری بیشتر و میرایی کمتر باشند. در سال‌های اخیر احداث ساختمان‌های بلند به ویژه در شهرهای بزرگ، که با مشکل کمبود فضای لازم برای ساخت مسکن مواجه‌اند، مورد توجه دولت‌ها و مراجع ذی ربط قرار گرفته است. توجه به این نکته حائز اهمیت است که اغلب در این ساختمان‌ها از مواد و مصالحی استفاده می‌شود که سبک بوده و از قابلیت انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار باشند [1]. کمبود نسبت میرایی و میزان جذب انرژی این سازه‌ها منجر به ایجاد دامنه ارتعاشات بزرگ حتی در زلزله‌هایی با سطح متوسط می‌گردد. سرمایه‌گذاری بالا در ساخت این نوع سازه‌ها سبب شده است تا با پرداخت هزینه‌ای نه چندان قابل توجه، استفاده از سیستم‌های کنترل لرزه‌ای را توجیه کند.

فراگیرترین کنترل ارتعاشی استفاده شده در مهندسی عمران، دستگاه میراگر جرم تنظیم شده (TMD) است. بر اساس جزئیات جرم-میراگر- فنر، TMD سختی و میرایی سازه‌ها را افزایش می‌دهد تا برخی از نامطلوب‌ترین ارتعاشات آنها که ناشی از فرکانس تشدید اصلی است را کاهش دهد [2].

در طراحی ساختمان‌های بلند، کنترل پاسخ دینامیکی سازه یا به عبارتی کنترل جابه‌جایی انتهایی سازه از اهمیت بالایی برخوردار است که برای کنترل آن از میراگرها استفاده می‌شود. میراگرها انواع مختلفی مانند فعال، غیرفعال،

ساختمان فلزی، یکی با اسکلت قاب خمشی و با در نظر گرفتن صلبیت کف و دیگری ساختمان متکی بر اسکلت با اتصالات مفصلی به همراه بادبندهای ضربدری در وضعیت‌های مختلف بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، میراگر جرمی بعد از اولین شتاب بیشینه‌ی ورودی فعال شده و توان فرونشاندن بیشینه‌ی مقادیر ورودی و خروجی را دارا است [12].

ماتا^{۱۰} و دی‌استفانو^{۱۱} (۲۰۰۹) در مقاله‌ی خود با عنوان کارایی لرزه‌ای، مفهوم TMD باغ سقف را معرفی کرده‌اند. این سیستم یک جاذب ارتعاش انفعالی نوآورانه برای سازه‌های ساختمانی تلقی می‌گردد که ترکیب قابلیت‌های کاهش واکنش دینامیک TMDها با مزایای محیطی باغ‌های سقفی سنتی مورد نظر باشد. به منظور محدود کردن اثر تنظیم نامناسب و اتلاف کنترل به دلیل تغییرپذیری درونی جرم آن، TMD سقف باغ از نوع آونگ غلتان بوده و با پیوند طبیعی مستقل از جرم توصیه می‌شود. آنها در مطالعه‌ی خود از آونگ غلتان برای پیکربندی سیستم استفاده نمودند تا در مواجهه با شدت لرزه‌ای، غیر حساس بوده و رفتار آن نیز تا حدودی خطی باشد [13]. یک رویکرد جدید و دقیق مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای محاسبه پارامترهای بهینه میراگر جرم متوازن برای کنترل جابجایی‌های سیستم‌های تک درجه آزادی (SDOF) و قاب‌های ساختمانی چند طبقه که در معرض رکوردهای واقعی حرکت زمین قرار دارند، توسط بشارتیان و همکاران پیشنهاد شده است [14]. در سال ۲۰۱۴ جبرایل بکداس^{۱۲} و سینان ملیح^{۱۳}، در پژوهشی فرایند بهینه‌سازی تمام پارامترهای TMD از جمله جرم، سختی و عامل میرایی را بررسی کردند. آنها با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی و تحلیل دینامیکی سازه با حل زوج معادلات حرکت به این نتیجه رسیدند که روش جستجوی هارمونی و همچنین کاهش پارامترهای کوچک‌تر TMD به ویژه میرایی در کاهش جابه‌جایی نسبت به روش‌های دیگر مؤثرتر است [15]. در سال ۲۰۱۵ لونگ لین^{۱۴} و همکاران، در مقاله‌ای بیان داشتند که استفاده از سیستم TMD غیرخطی، عملکرد کنترلی بهتری در سازه‌ها دارد و نسبت به سیستم‌های TMD خطی مناسب‌تر است [16].

گروکو^{۱۵} و همکاران در سال ۲۰۱۶، در مقاله‌ای با عنوان بهینه‌سازی چند معیاره میراگرهای جرمی تنظیم شونده منفرد با هدف کنترل ارتعاشات سازه‌ها ناشی از زمین لرزه‌های با شدت کم و متوسط بیان کردند که با تغییر نسبت جرم در مجموعه، پاسخ بهینه رخ خواهد داد. اگر این پارامتر افزایش یابد، بازده پاسخ سازه در اثر نیروهای وارده نیز به طور قابل توجهی بهبود خواهد یافت. همچنین گزارش کردند که بهترین و مطلوب‌ترین عملکرد TMD هنگامی حاصل می‌شود که فرکانس سازه اصلی در نقطه ورودی (شتاب) یا در منطقه رزونانس یا تشدید باشد. در نهایت عنوان شد که تغییر نسبت میرایی سازه موجب تغییرات مطلوب در کارایی TMD حاصل از بهینه‌سازی شده است. آنها دریافتند که استراتژی TMD برای سازه‌هایی که دارای میرایی کم هستند، کارآمدتر است [17]. در سال ۲۰۱۷ گیل^{۱۶} و همکاران، به بررسی چند شیوه‌ای کنترل با استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شونده (TMDs) برای تحریک‌های لرزه‌ای سازه‌ها پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که پراکنش میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (D-MTMDs) به دلیل نصب آسان و قرارگیری در طبقات مختلف ساختمان، نسبت به میراگرهای جرمی تنظیم شونده منفرد (S-TMD) و میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه‌ی (MTMDs) نصب شده در بام

باید توجه داشت که ساختار و مشخصات فیزیکی میراگرها و مکان قرارگیری آنها در سازه حائز اهمیت بوده و بایستی به طرحی بهینه، جامع و توجیه کننده‌ای در این زمینه دست یافت. پارامترهای میراگر TMD شامل میرایی، جرم و سختی هستند که عواملی کنترل کننده در طراحی به شمار می‌آیند. چنانچه مقادیر مناسبی برای آنها به دست آید، بهره‌وری بالایی در کاهش پاسخ‌های سازه خواهند داشت. محل قرارگیری میراگر نیز عاملی مهم در دریافت پاسخ سازه‌های بلند در برابر نیروهای دینامیکی است که می‌توان با تعبیه مناسب آنها، پاسخ سازه را تا حدودی بهینه نمود.

در سال ۱۹۹۵ کاریم^۱ و کلین^۲، با بررسی‌هایی که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که کارکرد میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMDs) به مقدار جرم، تعداد TMDها، دامنه‌ی فرکانس طراحی و نحوه‌ی توزیع آنها بستگی دارد [6]. در همان سال فنگ^۳ و میتا^۴ عنوان کردند که برای سازه‌های بلند مرتبه، سختی بالای اجزای سازه‌ای و عملکرد خمشی غالب، مانع از استفاده از سایر انواع میراگرها می‌شود. آنها یک سیستم ابتکاری را برای کنترل ارتعاشات چنین سازه‌هایی پیشنهاد دادند. سیستم پیشنهادی آنها از زیر سازه‌هایی که متشکل از کف چند طبقه بوده و به طور توأم در اتلاف انرژی بدون اضافه‌کردن جرم اضافی مشارکت می‌کنند، تشکیل یافته بود. این پژوهشگران از این شیوه برای بررسی رفتار لرزه‌ای یک سازه ساختمان بلند با ارتفاع ۲۰۰ متر و نسبت میرایی ۰/۰۲ استفاده کردند [7].

سادک^۵ و همکاران در سال ۱۹۹۷، به بررسی و مطالعه‌ی استفاده از TMD برای کاربردهای لرزه‌ای پرداختند. آنها با ارائه‌ی نسبت‌های میرایی مساوی و تحلیل سازه‌های مختلف با حالت ترکیب مدهای ارتعاشی، روش‌هایی را برای انتخاب مناسب پارامترهای TMD پیشنهاد کردند. نتیجه‌ی این کار منجر به کاهش قابل توجهی در پاسخ سازه‌ها به نیروی زلزله بوده است [8]. در سال ۱۹۹۸ هادی^۶ و آرفیادی^۷، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای میراگر جرمی را برای سه نوع سازه مختلف بهینه نمودند. این پژوهشگران شیوه‌های پیشنهادی که تا آن سال مطرح شده بود را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج بررسی به برتری روش الگوریتم ژنتیک نسبت به روش‌های دیگر منجر شد [9]. در سال ۱۹۹۹ چانگ^۸، با مطالعه بر روی سه نوع از میراگرهای جرمی تنظیم شونده (TMDs) به بررسی کاهش لرزش بیش از حد سازه‌ها پرداخت. این پژوهشگر نتایج پژوهش‌های خود را با عنوان میراگر جرمی تنظیم شونده و طرح‌های مطلوب آن برای ساختار کنترل لرزه‌ای ارائه نمود [10].

لی^۹ در سال ۲۰۰۰، عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMDs) را برای کاهش نوسانات نامطلوب تحت شتاب زمین مورد بررسی قرار داد. طی پژوهش‌های انجام شده به این نتایج دست یافت که به طور متوسط نسبت میرایی بهینه‌ی میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه با افزایش تعداد کلی این نوع میراگرها کاهش یافته و با افزایش نسبت جرم افزایش می‌یابد. وی همچنین دریافت که فاصله‌ی مقادیر فرکانس بهینه‌ی میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه با افزایش هر دو عامل نسبت میرایی و تعداد میراگرها افزایش می‌یابد. در نهایت گزارش گردید که MTMDs، اغلب برای کاهش نامطلوب سازه‌ها تحت شتاب زمین مناسب هستند [11].

در سال ۲۰۰۸ زهرایی و هاشمی، در پژوهشی به بررسی کنترل ارتعاشات لرزه‌ای قاب‌های فولادی متعارف به کمک میراگر جرمی پرداختند. در این پژوهش دو

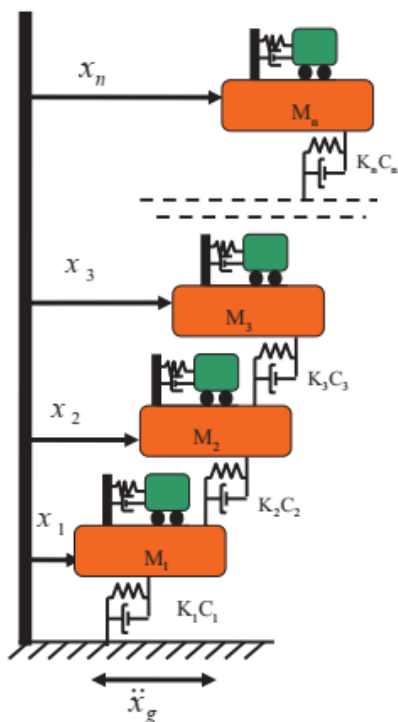
⁹ Li, C¹⁰ Matta, E¹¹ De Stefano, A¹² Bekdas, G¹³ Melih, S¹⁴ Long Lin, G¹⁵ Greco, R¹⁶ Gill, D¹ Kareem, A² Klein, S³ Feng, M. Q⁴ Mita, A⁵ F, Sadek⁶ Hadi, MNS⁷ Arfiadi, Y⁸ Chang, C. C

زمان آرامش ساختمان بلند فولادی تحت تحریک‌های لرزه‌ای، مدت زمان انجام تحلیل تاریخچه زمانی به طور تقریب دو تا سه برابر مدت زمان مؤثر زلزله در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که بعد از اتمام زلزله، پاسخ‌های سازه برای حالت ارتعاش آزادی که پس از اتمام رکورد زلزله رخ می‌دهد، تا هنگامی که سازه به حالت سکون تقریبی خود می‌رسد، ادامه می‌یابد.

۲- میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه^{۱۹}

با توجه به عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی زلزله و همچنین مشخصات دینامیکی سازه مثل فرکانس‌های طبیعی و نسبت استهلاک موده‌های مختلف ارتعاشی، مفیدتر آن است که از تعداد میراگرهای بیشتر استفاده شود. بایستی این میراگرها به نحوی طراحی شوند که دارای فرکانس ارتعاشی نزدیک به هم باشند تا بتوان محدودی بیشتری از فرکانس‌ها را پوشش داد. به این گونه سیستم‌ها، میراگرهای تنظیم شونده چندگانه یا MTMDs گفته می‌شود. در این حالت حساسیت سیستم کنترلی به پارامترهایی مثل تحریک ورودی کاهش می‌یابد. به منظور بهبود عملکرد TMD، می‌توان از مواد کشسان لزج در اتصال جرم آن به سازه بهره برد تا پاسخ لرزه‌ای از طریق استهلاک انرژی به روش‌های دیگر نیز صورت گیرد [21].

میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه به دو صورت در سازه پراکنش می‌یابند. دسته‌ی نخست آن، میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه در یک طبقه (به ویژه در بام ساختمان) هستند. دسته‌ی دیگر میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه در ارتفاع هستند که در طبقات ساختمان توزیع می‌شوند. در شکل ۱ نمونه‌ای از این میراگرها به نمایش در آمده است [22]. بررسی نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که به طور معمول میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه در ارتفاع کارایی بهتری نسبت به میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه در تراز یک طبقه را دارند. از سوی دیگر میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه‌ی توزیع شده در یک طبقه از نظر مکان‌یابی هندسی وضعیت بهتری نسبت به میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه توزیع شده در ارتفاع سازه را دارند.



شکل ۱ میراگر جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMD) [22]

ساختمان، عملکرد بهتری دارند. آنها همچنین دریافته‌اند که قابلیت اطمینان در حفظ استحکام سازه در حالت سیستم D-MTMDs برای کنترل پاسخ و تغییرمکان متوسط و قابلیت اطمینان آنها در حالت کنترل پاسخ تغییرمکان نسبی طبقات در هنگام عدم اطمینان از سختی سازه‌ی اصلی، مطلوب گزارش شده است. این در حالی است که سیستم S-TMD در تغییرمکان نسبی طبقات و کنترل پاسخ شتاب، بیشترین قابلیت اطمینان را دارا است [18].

بیات و همکاران در سال ۲۰۱۸، در پژوهشی کارایی میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMDs) را به منظور کاهش ارتعاش لرزه‌ای سازه‌ها با در نظر گرفتن تاریخچه زمانی واقعی بررسی نمودند. آنها به منظور مطالعه مقایسه‌ای، یک میراگر جرمی منفرد تنظیم شونده (S-TMD) را در بالای سازه‌های مشابه نصب کردند. در این مطالعه مشاهده شد که بیشینه‌ی جابه‌جایی با در نظر گرفتن شرایط یکسان برای MTMDs در مقایسه با S-TMD برای همه زلزله‌های واقعی کمتر است. همچنین میزان کاهش برش پایه و تغییرمکان جانبی نسبی طبقات با استفاده از پیکربندی مناسب MTMDs در تمامی حالت‌های زلزله واقعی بهتر از حالت منفرد است. بر اساس مطالعات صورت گرفته می‌توان دریافت که اثربخشی و کارایی MTMDs در مقایسه با S-TMD، بهتر و مناسب‌تر گزارش شده است [19].

سورش^{۱۷} و مینی^{۱۸} (۲۰۱۹) در پژوهشی اثر بخشی میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMDs) را برای کنترل لرزه‌ای سازه‌های بلند بررسی کردند. آنها گزارش دادند که افزایش تعداد میراگرهای جرمی تنظیم شونده (تنظیم شده با فرکانس‌های طبیعی بالاتر)، کاهش پاسخ‌های بیشینه (مقادیر اوج) را نشان داده و انتخاب محل قرار گیری TMDها (تنظیم شده با فرکانس‌های طبیعی بالاتر)، تحت تأثیر دامنه شکل مودی متناظر با فرکانس تنظیم TMD است. همچنین آنها دریافته‌اند که چیدمان قرارگیری TMDها، در صورت قرار دادن در کف طبقات با بیشینه دامنه‌ی شکل مودی، بیشترین کاهش در پاسخ مقادیر اوج را نشان می‌دهد [20].

هر چند پژوهش‌های انجام شده توسط پژوهشگران حاکی از گستردگی کارهای انجام گرفته بر روی میراگرهای جرمی تنظیم شونده دارد، اما تاکنون دستورالعمل جامع و یا آئین‌نامه‌ای مدون و مورد پذیرش جامعه‌ی مهندسی برای بکارگیری میراگرها در ساختمان‌ها تدوین نشده است. مشخصات فیزیکی میراگرهای جرمی تنظیم شونده و به طور خاص بحث پراکنش و توزیع این نوع میراگرها در طبقات مختلف ساختمان، نحوه قرارگیری و میزان تأثیر میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه به نسبت میراگرهای جرمی تنظیم شونده منفرد در کاهش پاسخ جابه‌جایی، حالت‌های مختلفی را برای بررسی آنها به وجود آورده است. تاکنون در مطالعات انجام شده در یک مدل به تمامی پارامترهای مؤثر در کارایی میراگرها و پاسخ‌های سازه پرداخته نشده است. سه خصوصیت فیزیکی مهم میراگر شامل جرم، میرایی و سختی، در بازده میراگر نقش اساسی ایفا می‌کنند. با توجه به نوع، شدت و همچنین محدوده‌ی فرکانس زمین‌لرزه‌ها این عوامل تأثیرات متفاوتی بر رفتار سازه‌ها دارند. رشد روزافزون ساختمان‌های بلند و اهمیت بسیار زیاد حفظ و نگهداری این نوع سازه‌ها در هنگام رخداد زلزله، مطالعه و پژوهش در زمینه‌ی روش‌های پایداری و کنترل آنها در مقابل بارهای جانبی زلزله و باد را به امری ضروری تبدیل نموده است. استفاده از مستهلک کننده‌های انرژی و میراگرها نیاز به مطالعه و بررسی تمامی عوامل تأثیرگذار بر عملکرد آنها در سازه‌های بلند مرتبه را می‌طلبد.

در این مقاله تأثیر پراکنش (آرایش) ارتفاعی میراگرهای جرمی تنظیم شونده بر رفتار تغییرمکان یک ساختمان بلند ۲۰ طبقه فولادی تحت تحریک‌های لرزه‌ای مختلف بررسی شده است. در ادامه برای تعیین تأثیر آرایش این میراگرها بر

¹⁹ Multiple Tuned Mass Dampers

¹⁷ Suresh, L

¹⁸ Mini, M

M_s ، C_s و K_s به ترتیب در روابط (۲)، (۳) و (۴) بیانگر ماتریس های جرم، میرایی و سختی سازه (بدون اثر TMD) هستند. از سوی دیگر، در این روابط ماتریس های M_d ، C_d و K_d مربوط به ماتریس های جرم، میرایی و سختی TMD می باشند.

۴- معیارهای آسایش و آرامش

در مراحل طراحی، حرکت انتقالی یک سازه را می توان از طریق آنالیز دینامیکی تخمین زد. در حالتی که سازه غیر متعارف و یا نمادی و سمبولیک باشد، ممکن است لازم شود که بر روی مدل آئروالاستیک آزمایشاتی همچون تحریک لرزه ای با استفاده از میز آزمایش لرزان و همچنین آزمایش تونل باد انجام پذیرد. نتایج حاصل در گام بعدی باید با حرکات سازه ساخته شده هماهنگ و اصلاح گردد. در این بین بایستی میزان احتمال بروز مشکلات در شرایط بهره برداری نیز پیش بینی شود. با مقایسه ی شتاب ها و پرریودهای به دست آمده برای سازه با منحنی ها و محدوده های محسوسات می توان مسائل احتمالی را مشخص نمود. چنانچه حرکات در محدوده غیر قابل قبول باشند، روش های متفاوت و با درجه پیچیدگی مختلف را می توان به کار گرفت. اگر چه تغییر مکان های استاتیکی را می توان با افزایش سختی کاهش داد، ولی این افزایش سختی مؤثر، نقش مهمی بر کاهش شتاب ها نخواهد داشت. این مسئله را می توان با در نظر گرفتن معادله عمومی حرکت یک سازه به خوبی نشان داد [27,28]:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x = P(t) + F(t) \quad (5)$$

از این رابطه می توان دریافت که شتاب متناسب با $\omega^2 x_{\max}$ است. دانستن است که x_{\max} تغییر مکان اوج و ω فرکانس دورانی حرکت می باشند. افزایش سختی با ضریب λ باعث کاهش x_{\max} با همان ضریب می شود. در نتیجه حاصل ضرب $\omega^2 x_{\max}$ و شتاب اوج بدون تغییر می ماند. رابطه (۵) بیانگر آن است که افزایش جرم موجب کاهش شتاب می گردد. ولی باید توجه داشت که کنترل شتاب ها توسط افزایش وزن ساختمان، راه حلی پر هزینه و غیر عملی است. به ویژه هنگامی که این روش اثرات نامطلوبی نظیر افزایش بار پی ها در سازه را به همراه داشته باشد. یک روش کنترل مناسب شتاب، افزایش میرایی است.

حرکت ناشی از زلزله، از نقطه نظر واکنش انسان ها به آن متفاوت با حرکات ناشی از نیروهای باد است. بنابراین افزون بر ایمنی، آسایش ساکنان در هنگام وقوع زلزله از اهمیت بالایی برخوردار است.

۴-۱- دیدگاه افراد از حرکت ساختمان

معمولترین عوامل ارتعاش سازه ها عبارتند از: باد، زلزله، ماشین آلات، کارخانجات نزدیک و انواع وسایل حمل و نقل. حرکات ناشی از این عوامل دارای شدت و مدت متفاوتی هستند. مکانیزم های متعددی برای تشدید آنها نیز وجود دارد. دریافت حرکات ساختمان تا اندازه زیادی به حساسیت سیستم عصبی بستگی دارد. اجزای تعادلی به ویژه گوش داخلی نقش ویژه ای در دریافت و حس شتاب های خطی و زاویه ای دارند. پاسخ انسان به ارتعاش ساختمان تابع عوامل بسیاری، نظیر حرکت اجسام معلق و صدای ناشی از باد و برخورد اجزای ساختمان به یکدیگر می باشد [29,30].

۵- زمان آرامش

به طور معمول مشخصات عملکردی سیستم های کنترل بر حسب پاسخ گذرا به ورودی پله ی واحد بیان می شود [31]. سبب بکارگیری ورودی پله برای تعیین مشخصات عملکردی سیستم های کنترل در پاسخ گذرا، آن است که به سادگی می توان این ورودی و تابع تبدیل مربوطه را ساخت و برای شبیه سازی اثرگذاری های شدید نیز از آن استفاده نمود. چنانچه پاسخ پله مشخص گردد، از نظر ریاضی می توان پاسخ سازه به هر ورودی دیگر را محاسبه کرد [32].

پاسخ گذرای سیستم به ورودی پله ی واحد به شرایط اولیه بستگی دارد. در تعیین مشخصات پاسخ گذرای یک سیستم کنترل به ورودی پله ای بایستی موارد زیر مشخص شود [32]:

زمان آرامش یک ویژگی بسیار مهم برای ارزیابی رفتار لرزه ای سازه ها است. این ویژگی به صورت زمان شروع زلزله تا توقف ارتعاش سازه تعریف می شود. به عبارت دیگر این خاصیت شامل کل مدت زمان نوسان سازه تحت ارتعاش اجباری و آزاد است [23].

در این پژوهش به سبب آن که پراکنش میراگرها بر زمان آرامش بررسی می گردد، بیشتر به کارایی سازه های آنها در کاهش تغییر مکان جانبی طبقات توجه می شود. چرا که کاهش دادن زمان آرامش سازه به طور مستقیم به تغییر مکان جانبی وابسته است. هر چه تغییر مکان جانبی طبقات سازه در زمان کمتری، کاهش بیشتری را از خود نشان دهند و مقدار این جابجایی به سمت صفر میل نماید، زمان آرامش سازه کمتر شده و ساکنین احساس آرامش بیشتری در حین وقوع زلزله و پس از آن می نمایند. به طور مسلم زمان آرامش کمتر در سازه های مجهز به میراگرهای جرم تنظیم شونده چندگانه توزیع شده در ارتفاع (طبقات) سازه بر حفظ آرامش افراد ساکن در تمامی طبقات مؤثر است. گاهی اوقات بکارگیری این میراگرها به صورت توزیع شده در یک طبقه (به ویژه بام ساختمان)، تنها معیارهای آسایش ساکنین را در بخشی از سازه بلند مرتبه تأمین می نماید و سبب عدم اقبال عمومی به استفاده از این ساختمان ها می گردد. امید است در آینده بتوان زمان آرامش را به عنوان یک معیار مکمل در کنار شتاب و دیگر معیارهای آسایش ساکنین در آئین نامه های طراحی سازه ها لحاظ نمود.

به طور معمول برای دستیابی به مؤثرترین سیستم MTMD، پارامترهای زیر تعیین می گردند:

- تعداد بهینه TMDها
- توزیع محدوده فرکانسی TMDها
- ضرایب میرایی TMDها

میراگرهای جرمی چندگانه در کاهش پاسخ های سازه از میراگر جرمی منفرد مؤثرتر هستند. زیرا با استفاده از میراگرهای جرمی چندگانه می توان گستره ی وسیع تری از حوزه ی فرکانسی را پوشش داد. افزون بر آن، چون مشخصات دینامیکی سازه تحت زلزله تغییر می کند، بنابراین کارایی میراگر جرمی غیرفعال منفرد با تغییر در نسبت فرکانس و میرایی بهینه کاهش می یابد. در نتیجه میراگرهای منفرد نسبت به میراگرهای جرمی چندگانه کارایی بالایی ندارند [24].

سیستم های کنترل فعال به طور عمده برای افزایش میرایی مؤثر سازه طراحی شده اند، بدون اینکه تأثیر عمده ای در سختی مؤثر سازه داشته باشند. حسگرهای آنها را می توان در موقعیت های مختلف سازه قرار داد تا تحریکات خارجی را بر حسب متغیرهای پاسخ سیستم میراگر جرمی توزیع شده (یعنی سرعت ها، جابجایی ها، شتاب ها و نیروهای کنترلی) اندازه گیری کند [25].

۳- معادلات حاکم بر MTMDs

معادله ی دینامیکی حرکت سازه ی شکل ۱ برای یک ساختمان n طبقه با در نظر گرفتن تعداد n_d میراگر جرمی تنظیم شونده که در طبقات مختلف ساختمان توزیع شده اند را می توان به صورت زیر بیان کرد [26]:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x = F \quad (1)$$

در این رابطه بردار F بیانگر بردار نیروی وارد بر تراز طبقات سازه، بردارهای x و \dot{x} نیز به ترتیب نشانگر بردارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب در ترازهای مختلف سازه می باشند. همچنین در رابطه (۱)، ماتریس های M ، C و K به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی کل سازه با تأثیر TMD هستند. این ماتریس ها را می توان به صورت کلی زیر تعریف نمود:

$$M = M_s + M_d \quad (2)$$

$$C = C_s + C_d \quad (3)$$

$$K = K_s + K_d \quad (4)$$

برای مدل سازی TMD در SAP2000 پارامترهای اصلی طراحی TMD عبارتند از:

- جرم میراگر
- فرکانس میراگر
- ضریب (نسبت) میرایی میراگر

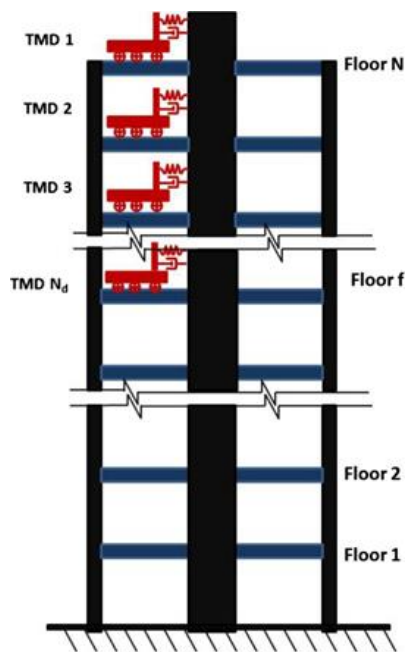
در مدل های سازه ای، مد غالب، اغلب مد اول می باشد. بنابراین مشخصات میراگرهای جرمی تنظیم شونده برای این مد تنظیم می گردد. شمای کلی مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شونده و پراکنش آن در طبقات در شکل ۲ نشان داده شده است [33].

برای مدل سازی میراگر در نرم افزار SAP2000 [34] ابتدا مشخصات المان Link در نرم افزار تعریف می شود. برای این کار به ترتیب به منوی زیر مراجعه می شود: Define > Section Properties > Link/Support Properties سپس add new properties را انتخاب کرده و مشخصات المان Link را در درجه آزادی U2 وارد می نمایند.

در قسمت Directional Properties با انتخاب گزینه Modify/Show for all در پنجره Linear Link/Support Directional Properties شده و سختی و میرایی میراگر را وارد می شود. به منظور تخصیص دادن جرم میراگر از منوی زیر اقدام می گردد:

Assign > Joint > Masses > Translation1

همچنین تمام درجات آزادی جرمها اعم از جرم سازه و میراگر بجز جهت Translation1 بایستی بسته باشند.



شکل ۲ شمای کلی پراکنش میراگر جرمی تنظیم شونده [33]

- i. زمان تأخیر t_d (Time delay): زمانی است که طول می کشد تا پاسخ برای بار اول به نصف مقدار نهایی اش برسد.
- ii. زمان صعود t_r (Rise time): زمانی است که طول می کشد تا پاسخ از ۱۰٪ به ۹۰٪، یا از ۵٪ به ۹۵٪، یا از ۰٪ به ۱۰۰٪ مقدار نهایی اش برسد. برای سیستم های مرتبه دوم فرومیرا (زیر بحرانی) به طور معمول زمان صعود ۰٪ تا ۱۰۰٪ ملاک عمل قرار می گیرد. در سیستم های فرامیرا (فوق بحرانی) به طور معمول زمان صعود ۱۰ تا ۹۰ درصد به کار می رود.

- iii. زمان اوج t_p (Peak time): زمان لازم برای رسیدن به اولین اوج فراجش است.

- iv. بیشینهی فراجش M_p (Maximum Overshoot): بیشینهی فراجش مقدار اوج فراجش است که نسبت به مقدار مبنا (صفر یا یک) اندازه گیری می شود. در سیستم های سازه ای مبنا صفر و در سیستم های الکتریکی مبنا عدد یک است. در مواردی که مقدار حالت ماندگار پاسخ یک نیست، به طور معمول درصد فراجش به کار برده می شود. این مقدار به صورت زیر تعریف می شود:

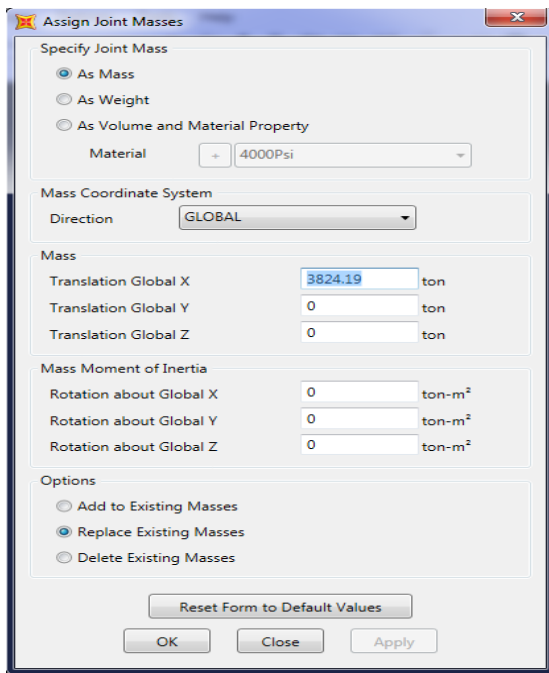
$$C(t_p) - C(\infty) = \frac{C(t_p) - C(\infty)}{C(\infty)} \times 100 \quad (۶)$$

که در آن $C(t)$ پاسخ زمانی کمیت مورد نظر (مانند تغییر مکان یا سرعت یا ...) است. $C(\infty)$ را به طور معمول مقدار بسیار کوچکی اختیار می نمایند.

- v. زمان آرامش (نشست) t_s (Settling time): زمانی است که طول می کشد تا منحنی پاسخ به گستره ی معینی حول مقدار نهایی اش برسد و در آن گستره بماند. این گستره به طور معمول بر حسب درصد مطلق از مقدار نهایی آن (بین ۲٪ تا ۵٪) بیان می شود.

اکثر سیستم های کنترل به ویژه سیستم های کنترل سازه ای، سیستم های حوزه ی زمان هستند. به سخن دیگر باید پاسخ زمانی قابل قبولی داشته باشند. یعنی سیستم کنترل را باید آنقدر تنظیم کرد که پاسخ گذرای آن رضایتبخش شود.

در بررسی پاسخ های سازه، معیارهای مختلفی وجود دارد. یکی از معیارها، بررسی مدت زمانی است که ارتعاش سازه به طول می انجامد. به طور معمول این زمان برابر است با بازه ی زمانی شروع وقوع زلزله (شروع ارتعاش سازه) تا زمان توقف ارتعاش سازه [3,4]. به عبارت دیگر این بررسی شامل مجموع مدت زمان نوسان سازه تحت ارتعاش اجباری و آزاد است. به طور معمول در طی وقوع زلزله سازه دچار نوسان می شود. این نوسان در دو مرحله ادامه پیدا می کند. مرحله اول مربوط به زمانی است که زلزله در حال وقوع می باشد که به آن ارتعاش اجباری می گویند. مرحله ی دوم زمانی است که زلزله باز ایستاده ولی سازه همچنان نوسان می کند. این مرحله به ارتعاش آزاد معروف است. به سخن دیگر، زمان آرامش بیانگر مدت زمانی است که طول می کشد تا سازه بعد از زمان وقوع زلزله به آرامش و سکون برسد. هر عاملی که باعث شود در عین حفظ شکل پذیری و مقاومت سازه، این زمان را کاهش دهد می تواند باعث بهبود رفتار سازه هنگام وقوع زلزله شود [3]. با توجه به توضیحات فوق می توان ارتعاش سازه را در دو مرحله ی ارتعاش آزاد و اجباری به دست آورد. در بررسی ارتعاش آزاد شرایط مرزی در لحظه حذف بار را به عنوان شرایط ابتدایی ارتعاش آزاد در نظر می گیرند. سپس با استفاده از روش های مختلف از جمله روش انتگرال دوهمامل یا دیگر روش های مرسوم، پاسخ های سیستم را بعد از حذف بار تا اتمام کامل نوسانات سازه ای محاسبه می نمایند.

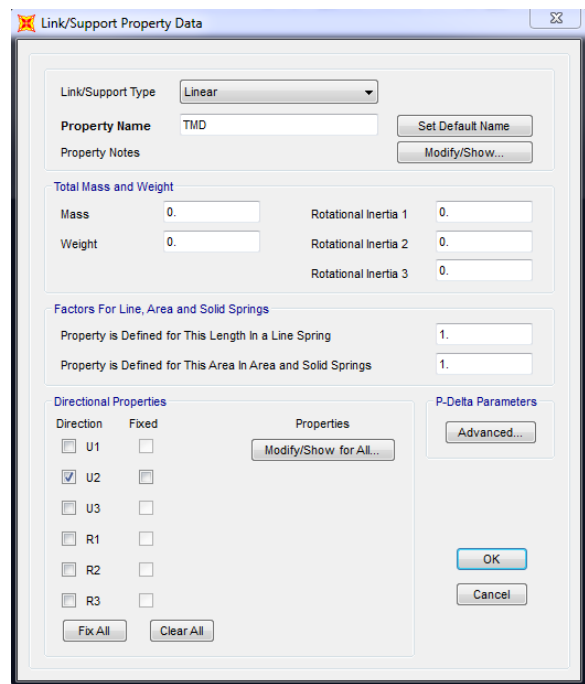


شکل ۵ تعریف جرم TMD در نرم افزار SAP2000

برای این منظور، سه زوج شتاب‌نگاشت از زلزله بم در سال ۲۰۰۳ انتخاب شده است [35]. شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم [36] به مقیاس در آمده‌اند. برای بررسی اثر پراکنش میراگرهای جرم تنظیم شونده (منفرد و چندگانه) بر زمان آرامش ساختمان‌های بلند فولادی زیر اثر تحریک‌های لرزه‌ای، مدت زمان انجام تحلیل تاریخیچه زمانی دو برابر مدت زمان مؤثر زلزله در نظر گرفته شده است. به سخن دیگر، بعد از اتمام زلزله، تحلیل ارتعاش آزاد همچنان ادامه داشته و پاسخ‌های سازه ثبت می‌گردد.

مشخصات سازه بیست طبقه در جدول ۱ درج شده است [21]. در این جدول، جرم طبقات مختلف ساختمان (به کیلوگرم) و سختی هر طبقه (بر حسب نیوتن بر متر) به ترتیب در ستون‌های ۲ و ۳ جدول ارائه شده است. برای بررسی مدت زمان آرامش ساختمان ۲۰ طبقه مورد مطالعه در این مقاله، برای هر تحلیل، مدت زمانی برابر با ۲ برابر مدت زمان زلزله تداوم زلزله در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال برای زلزله ایستگاه Golbaf که مدت زمانی برابر ۶۳.۹۹ ثانیه دارد، مدت زمان تحلیل برابر ۱۲۷.۹۸ ثانیه در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ مقادیر زمان تحلیل تاریخیچه زمانی با توجه به مدت شتاب‌نگاشت‌های زلزله آورده شده است. در این جدول، مقادیر زمانی برای تحلیل تاریخیچه زمانی معادل دو برابر مدت زمان شتاب‌نگاشت زلزله فرض شده است.

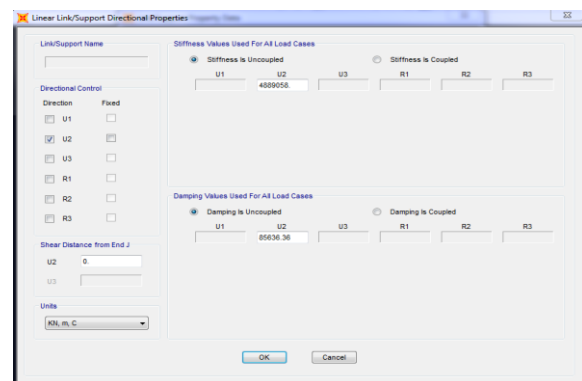
مدت زمان آرامش به صورت فاصله زمانی بین شروع زلزله (آغاز ارتعاش اجباری) تا پایان ارتعاش آزاد سازه (خاتمه‌ی ارتعاش سازه پس از پایان تحریکات زلزله) محاسبه می‌گردد. نتایج بررسی و مقایسه‌ی مدت زمان آرامش سازه‌ی ۲۰ طبقه تحت زلزله‌های مختلف با استفاده از مطلوب‌ترین مشخصات پراکنش مختلف میراگر (حالت پنجم یا (MTMD-C5) (ببینید جدول پیوست و همچنین مرجع [26])، حالت میراگر جرم تنظیم شونده منفرد (STMD) و بدون وجود میراگر جرم تنظیم شونده (Non TMD) در جدول ۳ آورده شده است. نسبت جرمی میراگر به جرم سازه (۵ درصد) و نسبت میرایی میراگر (۱۰ درصد) فرض شده‌اند. نتایج مربوط به سازه‌ی ۲۰ طبقه در جدول مذکور و شکل‌های ۶ تا ۱۱ آورده شده است. از نتایج ارائه شده در جدول ۳ آشکار است که میزان زمان تحریک سازه در زلزله گلباف (بم) در حالت بدون میراگر برابر ۲۴/۵۰ ثانیه، در حالت استفاده از یک میراگر در طبقه فوقانی سازه، زمان تحریک برابر ۸/۲۰



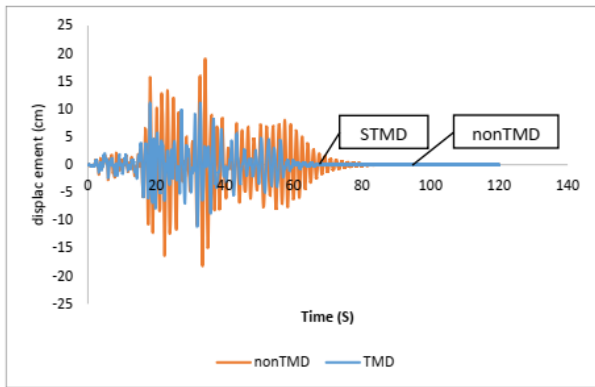
شکل ۳ تعریف مشخصات Link در نرم افزار SAP2000

۷- مطالعه عددی

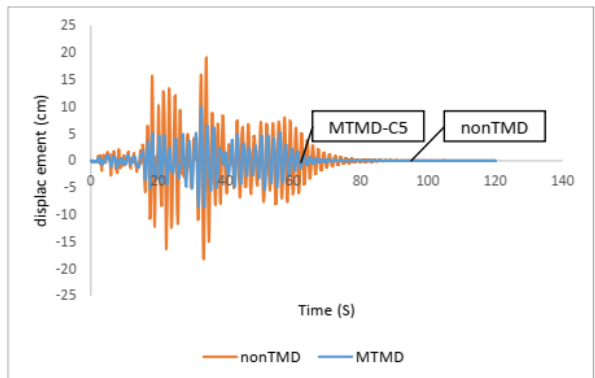
در بررسی پاسخ‌های سازه، معیارهای مختلفی وجود دارد. یکی از معیارها، بررسی مدت زمانی است که ارتعاش سازه به طول می‌انجامد. به طور معمول این زمان برابر است با بازه‌ی زمانی شروع وقوع زلزله (شروع ارتعاش سازه) تا زمان توقف ارتعاش سازه. به عبارت دیگر این بررسی شامل مجموع مدت زمان نوسان سازه تحت ارتعاش اجباری و آزاد است. به سخن دیگر، زمان آرامش بیانگر مدت زمانی است که طول می‌کشد تا سازه بعد از زمان وقوع زلزله به آرامش و سکون تقریبی بر اساس معیار تعریف شده برسد. هر عاملی که باعث شود در عین حفظ شکل‌پذیری و مقاومت سازه، این زمان را کاهش دهد می‌تواند باعث بهبود رفتار سازه هنگام وقوع زلزله شود.



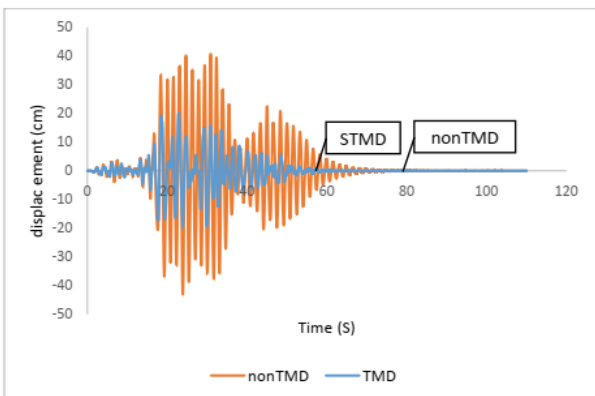
شکل ۴ تعریف مشخصات سختی و میرایی TMD در نرم افزار SAP2000



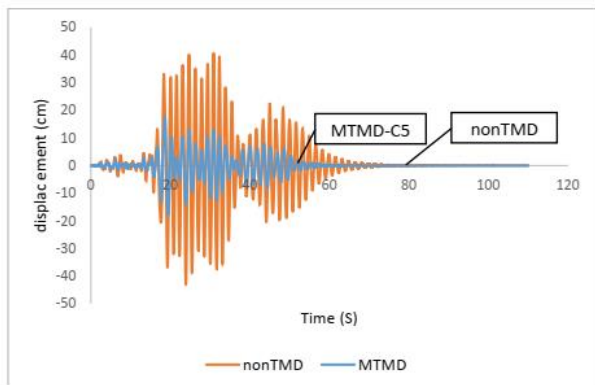
شکل ۶ مقایسه زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه با و بدون میراگر منفرد تحت زلزله Golbaf



شکل ۷ مقایسه زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه با میراگر چندگانه و بدون میراگر تحت زلزله Golbaf



شکل ۸ مقایسه زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه با و بدون میراگر منفرد تحت زلزله Kerman



شکل ۹ مقایسه زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه با میراگر چندگانه و بدون میراگر تحت زلزله Kerman

ثانیه و در حالت آرایش مطلوب برای میراگرهای چند گانه، این کمیت به ۵/۱۰ ثانیه کاهش می‌یابد که به طور قطع از نگرانی ساکنین سازه به مقدار قابل ملاحظه‌ای چه در هنگام وقوع زلزله و چه پس از آن کاسته می‌شود. کاهش زمان تحریک سازه در دو زلزله دیگر نیز مشابه زلزله گلباف می‌باشد. بنابراین جدول ۳ بکارگیری میراگرها و از آن مهم‌تر چینش آنها بر زمان آرامش سازه را به خوبی نشان می‌دهد. چینش میراگرها در طبقات مختلف سازه در جدول پیوست آمده است.

جدول ۱ مشخصات سازه بیست طبقه* [21]

طبقه	جرم (کیلوگرم)	سختی (نیوتن بر متر)
۱	2.82E+05	430820723
۲	2.76E+05	1147963450
۳	2.76E+05	1147963450
۴	2.76E+05	1147963450
۵	2.76E+05	737959948.4
۶	2.76E+05	737959948.4
۷	2.76E+05	737959948.4
۸	2.76E+05	737959948.4
۹	2.76E+05	737959948.4
۱۰	2.76E+05	737959948.4
۱۱	2.76E+05	603996113.6
۱۲	2.76E+05	603996113.6
۱۳	2.76E+05	603996113.6
۱۴	2.76E+05	603996113.6
۱۵	2.76E+05	603996113.6
۱۶	2.76E+05	603996113.6
۱۷	2.76E+05	341399184.7
۱۸	2.76E+05	341399184.7
۱۹	2.76E+05	228642427.5
۲۰	2.92E+05	228642427.5

* میرایی سازه ۲۰ طبقه برابر ۱ درصد فرض شده است.

جدول ۲ مقادیر زمان تحلیل تاریخیچه زمانی با توجه به مدت شتاب‌نگاشت‌های زلزله

نام ایستگاه	مدت زمان زلزله (sec)	مدت زمان تاریخیچه زمانی (sec)
BAM, 2003, Golbaf	63.99	127.98
BAM, 2003, Kerman	55.03	110.06
BAM, 2003, Zarand	42.23	84.46

جدول ۳ مدت زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله‌های BAM, 2003 (ثانیه)

نام ایستگاه	Non TMD	STMD	MTMD-C5
BAM, 2003, Golbaf	24.5	8.2	5.1
BAM, 2003, Kerman	21.8	6.4	5.8
BAM, 2003, Zarand	18.2	11.1	7.9

کاهش می‌یابد، در حالی که این کاهش در میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در مقایسه با حالت بدون میراگر به ۵۶.۶۰ درصد می‌رسد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله از میراگرهای جرمی تنظیم شده برای بررسی اثر پراکنش میراگرهای جرم تنظیم شونده بر زمان آرامش ساختمان بلند فولادی ۲۰ طبقه تحت تحریک‌های لرزه‌ای مختلف استفاده شده است. نخست مدل سازه‌ی ۲۰ طبقه فولادی مدل‌سازی شده است. پارامترهای میراگرهای جرم تنظیم شونده، شامل نسبت جرمی، نسبت میرایی و سختی، در سازه‌ی ۲۰ طبقه در نرم‌افزار SAP2000 اعمال شده‌اند. سپس تحلیل تاریخچه زمانی بر روی مدل مربوطه انجام گرفته است. برای این منظور، سه جفت رکورد از زلزله بم در سال ۲۰۰۳ انتخاب شدند. با هدف بررسی اثر پراکنش میراگرهای جرم تنظیم شونده بر زمان آرامش ساختمان بلند فولادی تحت تحریک‌های لرزه‌ای، مدت زمان انجام تحلیل تاریخچه زمانی به طور تقریب دو تا سه برابر مدت مؤثر زلزله در نظر گرفته می‌شود (بعد از اتمام زلزله، تحلیل همچنان ادامه یافته و پاسخ‌های سازه ثبت می‌گردد). در ادامه مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش ذکر می‌شوند.

پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) تحت اثر فقط یک زلزله نمی‌تواند قابل اطمینان باشد و ممکن است پاسخ‌های حاصل از سازه مجهز به یک TMD تحت اثر برخی زلزله‌های دیگر نسبت به سازه کنترل نشده افزایش یابد.

مقایسه پراکنش میراگرها بر جابه‌جایی سازه بین دو حالت ۲ و حالت ۳، در سازه ۲۰ طبقه، از میان سه رکورد زلزله موجود، حالت ۲ بیشینه مقدار جابه‌جایی سازه را ۵۳.۱۲ درصد کاهش داده است در حالی که حالت ۳ بیشینه مقدار جابه‌جایی سازه را ۵۴.۲۴ درصد کاهش می‌دهد.

مقایسه پراکنش میراگرها بر جابه‌جایی سازه بین دو حالت ۲ و حالت ۴، در سازه ۲۰ طبقه، از میان سه رکورد زلزله موجود، حالت ۲ بیشینه مقدار جابه‌جایی سازه را ۵۳.۱۲ درصد کاهش داده است در حالی که حالت ۴ بیشینه مقدار جابه‌جایی سازه را ۵۴.۲۴ درصد کاهش می‌دهد.

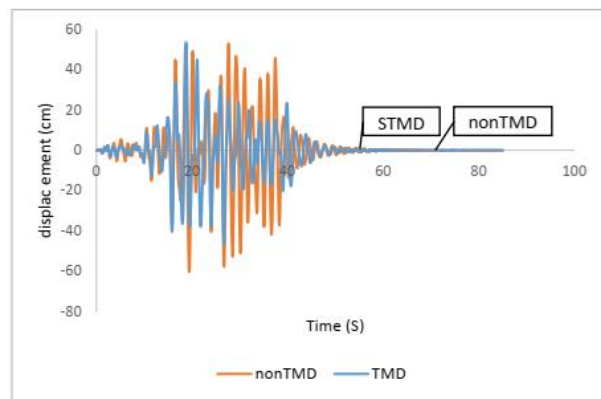
مقایسه پراکنش میراگرها بر جابه‌جایی سازه بین دو حالت ۲ و حالت ۵، در سازه ۲۰ طبقه، از میان سه رکورد زلزله موجود، حالت ۲ بیشینه مقدار جابه‌جایی سازه را ۵۳.۱۲ درصد کاهش داده است در حالی که حالت ۵ بیشینه مقدار جابه‌جایی سازه را ۵۸.۹۵ درصد کاهش می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که مناسب‌ترین حالت پراکنش، پراکنش در تمام طبقات است.

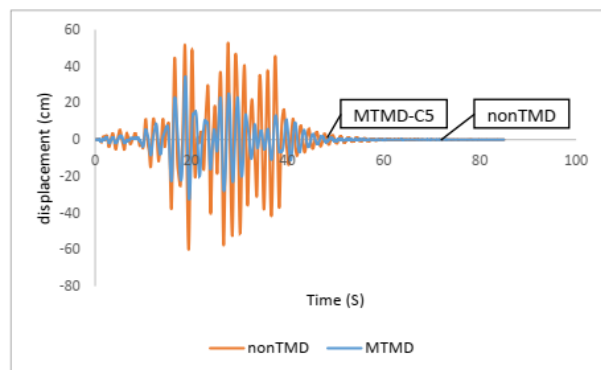
با بررسی مدت زمان آرامش سازه‌ی بیست طبقه تحت زلزله‌های مختلف می‌توان دریافت که مدت زمان آرامش با پراکنش میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD) رابطه مستقیمی دارد. پراکنش این میراگرها در تمامی طبقات، موجب کاهش بهتر پاسخ دینامیکی سازه شده و ساختمان در زمان کمتری به آرامش و سکون باز می‌گردد.

۹- مراجع

- [۱] بارانی، مهدی، بررسی پراکنش میراگرهای جرم متوازن (TMDs) بر پاسخ سازه‌های شبکه قطری ساختمان‌های بلند فولادی با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی، استاد راهنما: محمود عدالتی، کرمانشاه: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه، ۱۳۹۴.
- [2] López-Romero, M. A., Peñas, M. S., "A Positive Position Feedback controller for vibration control of wind turbines," Energy Reports, 9, 1342–1353, 2023.
- [۳] داورپناه، سعید، بررسی زمان آرامش ساختمان‌های فولادی سه بعدی مجهز به PTMD با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی، استاد راهنما: محمود عدالتی، قزوین: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، ۱۳۹۶.



شکل ۱۰ مقایسه زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه با و بدون میراگر منفرد تحت زلزله Zand



شکل ۱۱ مقایسه زمان آرامش سازه ۲۰ طبقه با میراگر چندگانه و بدون میراگر تحت زلزله Zand

از بررسی نتایج شکل‌های ۶ تا ۱۱ می‌توان دریافت که:

همان‌طور که در نمودارها مشخص است، تغییر مکان سیستم تا حد زیادی به شکل رکورد زلزله ورودی وابسته است. در صورت الحاق میراگر به سازه، میراگر می‌تواند تغییر مکان سازه را به نحو مطلوبی کاهش دهد. به طور معمول میراگر جرمی تنظیم شده بعد از وقوع اولین بیشینه بار ورودی (شتاب) فعال شده و توان فرونشاندن بیشینه‌های بعدی را داراست.

با بررسی مدت زمان آرامش سازه‌ی بیست طبقه تحت زلزله‌های مختلف می‌توان دریافت که مدت زمان آرامش با پراکنش میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD) رابطه مستقیمی دارد. پراکنش این میراگرها در تمامی طبقات، موجب کاهش پاسخ دینامیکی سازه شده و ساختمان در زمان کمتری به آرامش و سکون باز می‌گردد. با مقایسه‌ی عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده و پراکنش آن می‌توان دریافت که با بکارگیری این نوع سیستم، سازه از پایداری مطلوبی پس از وقوع زلزله برخوردار شده و تأثیر آن بر زمان ارتعاش سازه و در نهایت آرامش ساکنان مثبت ارزیابی می‌گردد.

مدت زمان آرامش در سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله Golbaf، تجهیز شده با میراگرهای جرمی تنظیم شده در مقایسه با حالت بدون میراگر ۶۶.۵۳ درصد کاهش می‌یابد، در حالی که این کاهش در میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در مقایسه با حالت بدون میراگر به ۷۹.۱۸ درصد می‌رسد.

مدت زمان آرامش در سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله Kerman، تجهیز شده با میراگرهای جرمی تنظیم شده در مقایسه با حالت بدون میراگر ۷۰.۶۴ درصد کاهش می‌یابد، در حالی که این کاهش در میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در مقایسه با حالت بدون میراگر به ۷۳.۳۹ درصد می‌رسد.

مدت زمان آرامش در سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله Zand، تجهیز شده با میراگرهای جرمی تنظیم شده در مقایسه با حالت بدون میراگر ۳۹.۰۱ درصد

- [25] Koutsoloukas, L., Nikitas, N., and Aristidou, P., "Passive, semi-active, active and hybrid mass dampers: A literature review with associated applications on building-like structures," *Developments in the Built Environment*, 12, 100094, 2022.
- [۲۶] قاسمی، علیرضا، اثر پراکنش میراگرهای جرم متوازن بر زمان آرامش ساختمان‌های بلند فولادی تحت تحریک‌های لرزه‌ای، استاد راهنما: محمود عدالتی، ایلام: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ایلام، ۱۳۹۸.
- [۲۷] آقاجانین، سعید، مهندسی کنترل ارتعاشات سازه، اصفهان: انتشارات ارکان دانش، ۱۳۹۷.
- [28] Connor, J., Laflamme, S., *Structural Motion Engineering*, Springer International Publishing, Switzerland, 2014.
- [29] Smith, B. S., and Coull, A., *Tall Building Structures: Analysis and Design*, New York: Wiley, 1991.
- [۳۰] حاجی کاظمی، حسن، آنالیز و طراحی سازه‌های بلند، مشهد: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۶.
- [31] Ogata, Katsuhiko, *Modern Control Engineering*, London: Pearson, 5th ed., 2010.
- [۳۲] محمود، دیانی، مهندسی کنترل، تهران: انتشارات نص، ۱۳۹۵.
- [33] Sakr, T. A., "Vibration control of building by using partial floor loads as multiple tuned mass dampers," *HBRC Journal (Housing and Building National Research Center)*, vol. 13, no. 2, pp. 133-144, 2017.
- [۳۴] افضلی، محمد، و سروش نیا، سهیل، کامل‌ترین مرجع کاربردی طراحی سازه با SAP2000 (سازه‌های فولادی)، تهران: انتشارات نگارنده دانش، ۱۳۹۵.
- [35] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), Ground Motion Database, <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases>.
- [۳۶] کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، چاپ چهارم، فروردین ۱۳۹۴.
- [۴] رستمی، سارا، بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی میراگرهای جرم متوازن پاندولی (PTMDs) بر زمان آرامش قاب‌های خمشی فولادی با استفاده از تحلیل تاریخیچه زمانی، استاد راهنما: محمود عدالتی، کرمانشاه: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۳۹۵.
- [۵] مرادنژاد، بابک، بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکان‌یابی هندسی مناسب توزیع جرم TMD بر پاسخ ساختمان‌های بلند فولادی با استفاده از تحلیل تاریخیچه زمانی، استاد راهنما: محمود عدالتی، ملایر: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ملایر، ۱۳۹۵.
- [6] Kareem, A. and Klein, S., "performance of multiple tuned mass dampers under random loadings," *Journal of structural engineering*, vol. 121, no. 2, pp. 348-361, 1995.
- [7] Feng, M. Q. and Mita, A., "Vibration control tall building using mega sub-configuration," *J. eng. Mech., ASCE*, vol. 121, pp. 1082-1088, 1995.
- [8] Sadek, F., Mohrez, B., Taylor A. W., and Chung, R. M., "A Method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications," *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, vol. 26, pp. 617-635, 1997.
- [9] Hadi, M. N. S., and Arfiadi, Y., "Optimal design of absorber for MDOF structures," *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, pp. 1272-1280, 1998.
- [10] Chang, C. C., "Mass dampers and their optimal designs for building vibration control," *Engineering Structures*, vol. 21, pp. 454-463, 1999.
- [11] Li, C., "Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration," *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, vol. 29, pp. 1405-1421, 2000.
- [۱۲] زهرابی، س. م، هاشمی، س. ف، "کنترل ارتعاشات لرزه‌ای قاب‌های فولادی متعارف به کمک میراگر جرمی"، نشریه بین‌المللی علوم مهندسی، دانشگاه علم و صنعت ایران، جلد ۱۹، شماره ۲، ۱۳۸۷.
- [13] Matta, E., and DeStefano, A., "Seismic performance of pendulum and translational roof-garden TMDs," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, pp. 908-921, 2009.
- [14] Besharatian, B., Riahi, H. T., Garcia, R., and Hajirasouliha, I., "Particle swarm optimization of friction tuned mass dampers subjected to ground motion records," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 172, 107995, 2023.
- [15] Bekdas, G., and Melih, S., Nigdeli, "Mass ratio factor for optimum tuned mass damper strategies," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 71, pp. 68-84, 2014.
- [16] Long Lin, G., Chang Lin, C., Cheng Chen, B., and Teh Soong, T., "Vibration control performance of tuned mass dampers with resettable variable stiffness," *Engineering Structures*, vol. 83, pp. 187-197, 2015.
- [17] Greco, R., Carlo Marano, G., and Fiore, A., "Performance-cost optimization of tuned mass damper under low-moderate seismic actions," *The Structural Design of Tall Building and Special Buildin*, 2016.
- [18] Gill, D., Elias, s., Steinbrecher, A., Schröder, C., Matsagar, V., "Robustness of multi-mode control using tuned mass dampers for seismically excited structures," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 15, pp. 5579-5603, 2017.
- [19] Bayat, A., Beiranvand, P., and Ashrafi, H., "Vibration Control of Structures By Multiple Mass Dampers," *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 12, no. 3, 2018.
- [20] Suresh, L., and Mini, K. M., "Effect of Multiple Tuned Mass Dampers for Vibration Control in High-Rise Buildings," *Practice Periodical on Structural, Design and Construction, ASCE*, 2019.
- [۲۱] کامرانی‌مقدم، ب، کنترل سازه‌ها با رفتار خطی و غیرخطی توسط میراگر جرمی تنظیم شده تحت اثر زلزله، تهران: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، گروه مهندسی عمران، ۱۳۸۶.
- [22] Debbarma, R. and Das, D., "Vibration control of building using multiple tuned mass dampers considering real earthquake time history," *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 10, no. 6, pp. 696-704, 2016.
- [23] Ebrahimi, A., Edalati, M., Valizadeh M., and Karimipour, A., "Increase the effectiveness of AMTMDs and PMTMDs on the seismic behaviour of structures case study: Ten-stories short period concrete building," *Engineering Structures*, 237, 112122, 2021.
- [24] Fredy Picaulya, Hrc. Priyosulistiyob, Bambang Suhendrob; Andreas Triwiyonob, "Tuned Mass Damper On Reinforced Concrete Slab With Additional X-Shaped Metal Absorber," *Procedia Engineering*, vol. 95, pp. 204-212, 2014.

جدول پیوست: حالت های پراکنش مختلف میراگرها در سازه ی ۲۰ طبقه

طبقات		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
حالت *۱	M_d (kg.m/s ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	K_d (N/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C_d (N.s/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
حالت **۲	M_d (kg.m/s ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	K_d (N/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C_d (N.s/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
حالت †۳	M_d (kg.m/s ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	K_d (N/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C_d (N.s/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
حالت ††۴	M_d (kg.m/s ²)	-	2825.8	-	2825.8	-	2825.8	-	2825.8	-	2825.8
	K_d (N/m)	-	399842.8	-	399842.8	-	399842.8	-	399842.8	-	399842.8
	C_d (N.s/m)	-	21052.0	-	21052.0	-	21052.0	-	21052.0	-	21052.0
حالت ‡۵	M_d (kg.m/s ²)	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9
	K_d (N/m)	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4
	C_d (N.s/m)	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0
ادامه طبقات		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
حالت *۱	M_d (kg.m/s ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	K_d (N/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C_d (N.s/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
حالت **۲	M_d (kg.m/s ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28258.2
	K_d (N/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3998427.8
	C_d (N.s/m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	210519.8
حالت †۳	M_d (kg.m/s ²)	-	-	-	-	-	-	-	9419.4	9419.4	9419.4
	K_d (N/m)	-	-	-	-	-	-	-	1332809.3	1332809.3	1332809.3
	C_d (N.s/m)	-	-	-	-	-	-	-	70173.3	70173.3	70173.3
حالت ††۴	M_d (kg.m/s ²)	-	2825.8	-	2825.8	-	2825.8	-	2825.8	-	2825.8
	K_d (N/m)	-	399842.8	-	399842.8	-	399842.8	-	399842.8	-	399842.8
	C_d (N.s/m)	-	21052.0	-	21052.0	-	21052.0	-	21052.0	-	21052.0
حالت ‡۵	M_d (kg.m/s ²)	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9	1412.9
	K_d (N/m)	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4	199921.4
	C_d (N.s/m)	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0	10526.0

* سازه ی بدون میراگر، ** سازه ی با یک میراگر در طبقه بیستم، † سازه ی با سه میراگر در طبقه های هجدهم، نوزدهم و بیستم، †† سازه ی با ۱۰ میراگر در طبقه های زوج و ‡ سازه ی با ۲۰ میراگر در تمام طبقه های سازه ی ۲۰ طبقه