

طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD) در نرم افزار SAP2000

محسن کرامتی^۱ و محمود نیکخواه شه‌میرزادی^۲ و محمدعلی قنادیان^{۳*} و نغمه ناجی^۴

- ۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
 - ۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
 - ۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
 - ۴- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
- * سمنان، ۳۵۱۹۸۱۸۶۹۴، (M_ali_ghanadian@yahoo.com)

چکیده

یکی از ایده های جدید برای مقابله با محركات ناشی از باد یا زلزله، ایده کنترل سازه هاست. از کاربردی ترین و موثرترین روشهای کنترل نیروهای وارد شده و افزایش اتلاف انرژی ناشی از آن، کاربرد میراگرها در مقاوم سازی سازه ها می باشد، میراگرها با توجه به پیرو سازه، نوع ساختگاه، جنس سازه، نوع سیستم مهاربندی، نیروی جانبی سازه و موقعیت مکانی و جغرافیایی سازه، فاصله آن از گسل یا مرکز زلزله و سایر عوامل تاثیر گذار انتخاب می شوند. عملکرد سیستم میراگر جرمی تنظیم شده به طور اساسی بر مبنای استهلاک انرژی به صورت حرکت نوسانی جرم میراگر و ایجاد نیروی اینرسی جرم در فاز مخالف نیروی وارد به سازه می باشد.

کلیدواژگان

میراگر جرمی تنظیم شده (TMD)، طراحی میراگر جرمی تنظیم شده، بارگذاری های لرزه ای، SAP2000

Design of tuned mass dampers (TMDs) by SAP2000 software

Mohsen keramati¹, mahmod nickhah shahmirzadi², mohammad ali ghanadian^{*3}

- 1- Associate professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering shahroud University- shahroud -Iran
 - 2- Associate professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University azad Islamic of semnan-Iran
 - 3- MA Civil geotechnic, Department of Civil Engineering, Islamic Azad semnan-Iran
 - 4- MA Civil Structures, Department of Civil Engineering, Islamic Azad shahroud -Iran
- * P.O.B. 3519818694 Semnan, Iran • (M_ali_ghanadian@yahoo.com)

Abstract

One of the new ideas to deal with the irritation caused by wind or earthquake is the idea of controlling structures. The use of dampers in retrofitting structures is one of the most applicable and effective approach to control the imposed force and its induced energy dissipation increase. Dampers can be selected based on the period of structure, type of site, material of structure, type of bracing system, lateral force of structure, site and geographical position of structure, distance of structure from the fault or epicenter and other effective factors. The performance of tuned mass damper is basically according to dampers mass vacillation energy dissipation and developing mass inertia force in opposite phase of the imposed load on structure.

Keywords

Tuned mass damper (TMD), design of tuned mass damper, seismic loading, SAP2000

۱-مقدمه

برای کاهش اثرات ناشی از زلزله بر سازه راهبردهای فنی و متعددی بسیار زیادی وجود دارد که به دو بخش کلی افزایش ظرفیت و کاهش نیاز سازه تقسیم شده که عبارتند از :

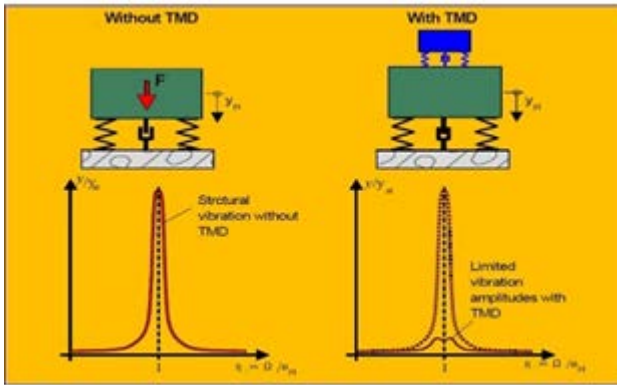
- ۱- اصلاح موضعی اجزاء
 - ۲- حذف یا کاهش نامنظمی در سازه
 - ۳- افزایش مقاومت سازه
 - ۴- افزایش سختی جانبی سازه
 - ۵- افزایش شکل پذیری سازه
 - ۶- کاهش نیاز سازه
- راهبردهای کاهش نیاز ساختمان عبارتند از :
- ۱- کاهش جرم ساختمان
 - ۲- سیستم جداساز لرزه ای
 - ۳- سیستم غیر فعال اتلاف انرژی (میراگرها).

سیستم های میراگرها را می توان به دو گروه سیستم های غیرفعال و سیستم های فعال تقسیم بندی کرد. ابزار کنترل غیر فعال سیستم هایی هستند که نیاز به منبع انرژی خارجی ندارند. این ابزار از نیروهایی که در پاسخ به حرکت سازه در داخل آنها ایجاد می شود بهره میگیرند. جدا نمودن پایه ای و میراگر جرمی تنظیم شده از این گروهند.

هدف اصلی از به کار بردن سیستم جداساز در پایه کاهش حرکت افقی زلزله ورودی به سازه است که می تواند در ترکیب با سیستم میراگر جرمی تنظیم شده عملکرد خوبی را برای حفاظت و ایمنی سازه فراهم آورد. اجرای عملی میراگر جرمی تنظیم شده در یک ساختمان جداسازی شده از پایه آشکارا شامل ملاحظات تکمیلی، مانند محدودیت فضا برای تغییر مکان میراگر جرمی و هزینه اجرا و ... می باشد.

امروزه فارغ از دیدگاه طراحی سازه ها، ضرورت استفاده از تکنولوژی های پیشرفته با توجه به ملاحظات اقتصادی، نیاز به کاهش زمان اجرای طرح های مقاوم سازی و بهبود عملکرد سازه های مختلف در سطح خطر انتخابی و اجرای آسان آن در مواردی که محدودیت اجرا وجود دارد و یا نیاز به استفاده بی وقفه از سازه مورد نظر باشد، بیشتر احساس می شود. طراحی مطمئن یک سازه زمانی تضمین می شود که سه شرط اساسی مورد نیاز سازه برآورده شود:

- ۱- در دست داشتن اطلاعات واقعی از نیروهای وارده به سازه
- ۲- در دست داشتن اطلاعات واقعی و درست از رفتار و مقاومت مصالح ساختمانی
- ۳- اتخاذ روش های مناسب جهت تحلیل سازه



شکل ۱ کاربرد میراگر جرمی در کاهش ارتعاشات وارد بر سازه

میراگر های جرمی اولیه دارای معایبی هستند که عبارتند از:

- ۱- مکانیسم های پیچیده ای برای غلنت و اجزای میراگر داشتند.
- ۲- دارای جرمهای زیادی بودند.
- ۳- فضای زیادی اشغال میکردند.
- ۴- کاملاً گران بودند.

۲- تاریخچه مطالعات انجام شده

ایده میراگر جرمی تنظیم شده اولین بار توسط فرام در سال ۱۹۰۹ مطرح گردید. پس از آن در سال ۱۹۲۸، دن هارتوگ و اورماندروید برای اولین بار نظریه لرزش گیره های بدون میرایی و با میرایی را برای سازه بدون میرایی مطالعه و اصول مقدماتی انتخاب مناسب پارامترهای این لرزش گیره را ارائه کرده اند. آنها در مطالعات خود به این نتیجه رسیده اند که اضافه کردن میرایی به میراگر جرمی تنظیم شده، باعث افزایش بازده آن می شود. نظریه میراگر جرمی متوازن شده بعدها در سال ۱۹۴۶ توسط آقای براک که با مطالعه کارهای دن هارتوگ به این بحث علاقه مند شده بود. مطالعه و روش بهینه انتخاب میرایی میراگر جرمی متوازن شده همانند سختی آن توسط این شخص ابداع گردید و بدین ترتیب میراگر جرمی تنظیم شده به صورت امروزی در آمد که برای مهندسی و محققین آشنا است. مجموعه ای از چندین جرم و فنر و میراگر به نام MTMD است. که به صورت موازی به یکدیگر متصل شده اند و هر قسمت دارای جرم، فرکانس و میرایی مخصوص به خود است. سیستم های MTMD با گسترش یکنواخت فرکانس طبیعی برای اولین بار توسط ژو و ایگیوسا در سال ۱۹۹۲ مورد مطالعه قرار گرفته است و در سال های بعد محققان متعدد دیگری در این زمینه مطالعاتی را انجام داده اند [۶].

در راستای بهبود پاسخ های لرزه ای سازه های غیر تنظیم با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده نیز مطالعاتی توسط چی چانگ لین و همکاران انجام گرفته است [۴]. کارائی این میراگر ها در کاهش میزان خرابی ها توسط تی پینکاو و همکاران در سال ۲۰۰۲ مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که اگر چه این میراگرها پاسخ تغییر مکانی حداکثر سازه را به مقدار قابل توجهی بهبود نمی بخشد ولی با استفاده از این نوع میراگرها درجه مشخصی از مقاومت در برابر خرابی برای سازه قابل دست یابی است [۵]. اهلاوات و راماسواری چیدمان جدیدی از چهار میراگر جرمی تنظیم شده را به

در کنترل فعال، پاسخهای سازه توسط انرژی خارجی وارده بر سازه کاهش می یابد. این سیستمها دستگاههای قابل کنترلی هستند که توسط ابزار کمکی همواره در حال وارد کردن نیروهای کنترلی به ساختمان هستند. به عنوان مثال کابلی به ساختمان وصل می شود و در جهت خلاف نیروهای برشی وارده زلزله به ساختمان نیرو وارد میکند. سیستم های فعال از غیر فعال موثرتر هستند، اما علیرغم عملکرد عالی، مشکل بزرگ هزینه های اجرایی و نگهداری را دارند. نمونه این گونه سیستمها میراگرهای جرمی فعال می باشد. بنابراین در حالت کلی سیستم های فعال از سیستم های غیر فعال موثرتر هستند. هرچند از لحاظ اقتصادی و قابلیت اطمینان، سیستم های غیر فعال بیشتر از سیستم های فعال در سازه های بلند استفاده می شود.

۲- میراگرهای جرمی تنظیم شده

کنترل فعال سازه ها در دو دهه اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده است. در سیستم های کنترل فعال بر خلاف سیستم های غیر فعال فرض بر استفاده از یک منبع انرژی خارجی برای افزایش راندمان کنترل و کاهش ارتعاشات سازه می باشد. زمینه اصلی تحقیقاتی سیستم های کنترل فعال شامل دو بخش الگوریتم های محاسبه نیروی کنترل مورد نیاز و مکانیزم های اعمال نیروی کنترل بر سازه می باشد.

حاصل تحقیقات به عمل آمده، ارائه الگوریتم های متعددی برای محاسبه نیروی کنترل و نیز روشهای مختلفی TMD برای اعمال این نیروها بر سازه می باشد. اساس کار این میراگر بر مبنای استهلاک انرژی وارده به سازه توسط یک مجموعه جرم و فنر در طبقات بالایی سازه می باشد. در این سیستم برای کنترل ارتعاش سازه از نیروی اینرسی ناشی از جرم اضافی استفاده شده و جرم هر طبقه در ارتفاع سقف بطور متمرکز وارد می شود و این جرم دارای تغییر مکان افقی بدون دوران می باشد.

میراگر TMD خود می تواند به دو صورت فعال و غیر فعال در سازه به کار برده شود که نوع غیر فعال آن به دلیل امکان بهره برداری همیشگی، عدم نیاز به تعمیر و نگهداری ویژه و عدم نیاز به منبع انرژی خارجی کاربرد وسیعی دارد. برای این منظور تا حد امکان باید فرکانس جرم افزوده را نزدیک به فرکانس ارتعاشی سازه تنظیم کرد تا اگر سازه با این فرکانس تحریک شد، میراگر با سازه ی اصلی در فاز مقابل ارتعاشی قرار بگیرد و بخش بزرگی از انرژی ورودی با نیروی اینرسی میراگر مستهلک شود. میراگر جرمی تنظیم شده، ابزاری است که به سازه متصل می شود و تحت اثر حرکات جانبی سازه شروع به ارتعاش مینماید. فرکانس میراگر بگونه ای تنظیم میشود که در فاز مخالف با فرکانس ارتعاشی سازه باشد. نیروی اینرسی میراگر باعث از بین رفتن انرژی ارتعاشی سازه می شود. یک نمونه از میراگر جرمی در شکل زیر نشان داده شده است. میراگرهای جرمی تنظیم شده به علت عدم نیاز به تعمیر و نگهداری ویژه، عدم نیاز به منبع انرژی خارجی و قابلیت بهره برداری دایمی، کاربرد وسیعی در کاهش پاسخ لرزه ای سازه های بلند مرتبه در مقابل اثر باد و زلزله دارند.

در معادلات بالا n شماره مود مورد نظر است.

۵- مدلسازی میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) در نرم افزار SAP2000

امروزه استفاده از نرم افزارهای مهندسی به عنوان یک ابزار قدرتمند و سریع جهت تحلیل سازه ها به طور گسترده ای توسط مهندسان طراح و مشاور متداول می باشد. نرم افزار SAP2000 شرکت CSI، از قویترین نرم افزارها در زمینه مدل سازی تحلیل و طراحی سازه های مهندسی عمران هستند.

از نرم افزار SAP2000 می توان برای تحلیل و طراحی انواع سازه های مهندسی استفاده کرد. به عنوان نمونه از

قابلیت های نرم افزار SAP2000 می توان به تحلیل و طراحی پلها، سازه های ساحلی، ساختمان های معمولی، پوسته ها، سدها و... اشاره کرد. این نرم افزار بدین جهت مقبولیت لازم جهت استفاده عملی را کسب کرده است که قابلیت مدل سازی هر نوع شرایطی را داشته و با ارائه یک تحلیل مناسب پاسخ های مفید و موثری را نتیجه می دهد و در این بین راحتی مدل سازی و سادگی کار با نرم افزار نیز از اهمیت خاصی برخوردار است.

نرم افزار SAP2000 در ویرایش چهاردهم آن تحول عمده ای را طی کرده و به طور همزمان قابلیت های گرافیکی و تحلیلی آن به طور قابل توجهی ارتقا پیدا کرده است. بسیاری از دستورات ویرایش قبلی تکمیل و دستورات جدیدی جهت تکمیل قابلیت های نرم افزار به آن اضافه شد.

امکانات نسخه پیشرفته SAP:

الف- تحلیل غیرخطی و ساده

در این نسخه یک المان غیرخطی، پوشش لایه لایه با استفاده از یک مدل جهت دار متریال برای تحلیل ساده ساختارهای دیوار برشی و برنامه های مشابه به برنامه افزوده شده است.

۱- ایجاد مدل سازی ساده قسمت های محکم بتنی

نمایش سطوح PMM مدل فیبری

خواص مواد پیش فرض برای بتن سازی در جهت ارتقاء رفتار یکپارچه بهبود یافته است.

۴- عناصر پیوند چندخطی به منظور ارتقاء میزان یکپارچگی آنها تغییر کرده است.

ب- ویژگی های پویا

۱- در این برنامه میراشدگی (مستهلك شدن) مبتنی بر مواد به منظور تحلیل خطی و غیرخطی یکپارچگی مستقیم برای مهندسان قابل دسترس است.

۲- میراشدگی مبتنی بر مواد به منظور آنالیز PSD و وضعیت ثابت در دسترس کاربران قرار دارد.

۳- واکنش های پایه برای آنالیز مدل Response-Spectrum و مدل Time-History برای حفاظت از اتصال عناصر پیوندی متصل به فنر و زمین به منظور دسترسی بهتر به اثرات از بین بردن توده بهبود یافته است.

برای مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شده از المان Link استفاده شده است (شکل ۲). به دلیل موازی عمل کردن فنر و میراگر، المان لینک استفاده شده از نوع Linear است (شکل ۲). سختی و میرایی در جهات مختلف به صورت Coupled است. به علت اینکه TMD مورد نظر تنها در دو جهت افقی عمل می کند لازم است TMD را در جهات ۲U و ۳U تعریف و درجات آزادی دیگر را ببندیم. لینک خطی مورد نظر از یک طرف به یک جرم متمرکز و انتقالی و از طرف دیگر به سازه متصل شده است.

منظور کنترل مود چرخشی سازه علاوه بر مود انتقالی آن معرفی کرده اند [۳].

در تمامی مطالعات انجام گرفته شده، میراگرهای جرمی تنظیم شده با در نظر گیری مشخصات دینامیکی مودهای انتقالی سعی بر آن بوده است تا مشخصات دینامیکی و محل قرار گیری آنها در پلان سازه به گونه ای تنظیم و انتخاب شوند که بتوانند پاسخ های انتقالی و چرخشی سازه را به طور همزمان کنترل نمایند [۱].

در سازه های با خروج از مرکزیت هنگامی که سازه تحت اثر زلزله قرار می گیرد، پاسخ نهایی سازه از جمع تغییر مکان های ناشی از حرکت انتقالی سازه و چرخش طبقات حاصل می شود. با افزایش خروج از مرکزیت، سهم تغییر مکان ناشی از چرخش افزایش می یابد که این امر به دلیل افزایش لنگر چرخش در بین مودهای اولیه ارتعاش سیستم است. سهم چرخش در پاسخ نهایی افزایش می یابد. با توجه به این امر، در سازه هایی با مشخصات فوق، کنترل چرخش طبقات می تواند پاسخ نهایی سازه را به طور موثری کاهش دهد [۲].

۴- طراحی میراگر جرمی تنظیم شده

برای طراحی میراگر جرمی تنظیم شده نیز ابتدا باید جرم، فرکانس و ضرایب میرایی آن را در نظر گرفت. فرکانس حرکت میراگر باید نزدیک به فرکانسی باشد که سازه برای آن طراحی می شود. انتخاب ضریب میرایی و نسبت فرکانس دلخواه است و سایر مقادیر مورد نیاز طراحی با استفاده از فرمول های زیر بدست می آیند. مهمترین پارامتر در طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شده مقدار جرم اضافه شده به سازه میباشد. در مدل های سازه های مد غالب مد اول میباشد پس مشخصات میراگرهای جرمی تنظیم شده بر روی این مد تنظیم شده است.

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \cdot \sqrt{\frac{2-\mu}{2}} \quad (1)$$

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

$$M_n^* = \frac{(\sum m_i \phi_{i,n})^2}{\sum m_i \phi_{i,n}^2} \quad (3)$$

$$M_{TMD} = \mu \times M_n^* \quad (4)$$

$$C_{TMD} = 2 \times \xi_{TMD} \times m_{TMD} \times \omega_{TMD} \quad (5)$$

$$K_{TMD} = m_{TMD} \times \omega_{TMD}^2 \quad (6)$$

$$\omega_{TMD} = \gamma_f \times \omega_n \quad (7)$$

$$M_{TMD} = \mu \times M_n^* \quad (8)$$

$$C_{TMD} = 2 \times \xi_{TMD} \times m_{TMD} \times \omega_{TMD} \quad (9)$$

$$K_{TMD} = m_{TMD} \times \omega_{TMD}^2 \quad (10)$$

$$\omega_{TMD} = \gamma_f \times \omega_n \quad (11)$$

۶- نتیجه گیری

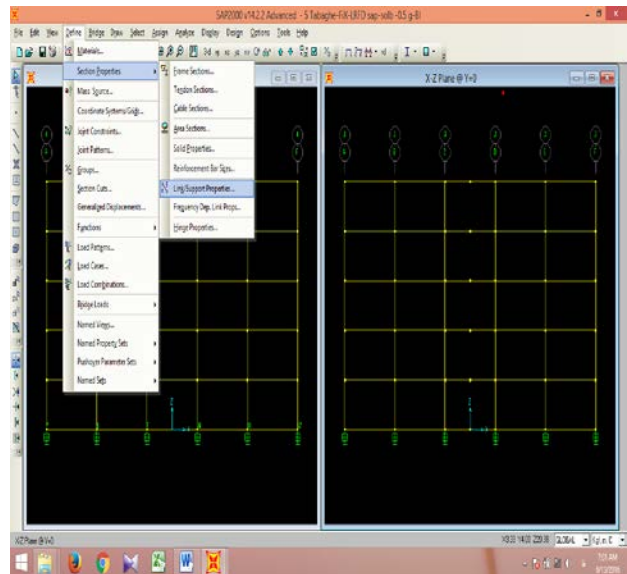
میراگرهای جرمی تنظیم شده با سازه ی اصلی در فاز مقابل ارتعاشی قرار می گیرند و بخش بزرگی از انرژی ورودی با نیروی اینرسی میراگر مستهلک می شود و به علت عدم نیاز به تعمیر و نگهداری ویژه، عدم نیاز به منبع انرژی خارجی و قابلیت بهره برداری دائمی، کاربرد وسیعی در کاهش پاسخ لرزه ای سازه های بلند مرتبه در مقابل اثر باد و زلزله دارند.

۷- مراجع

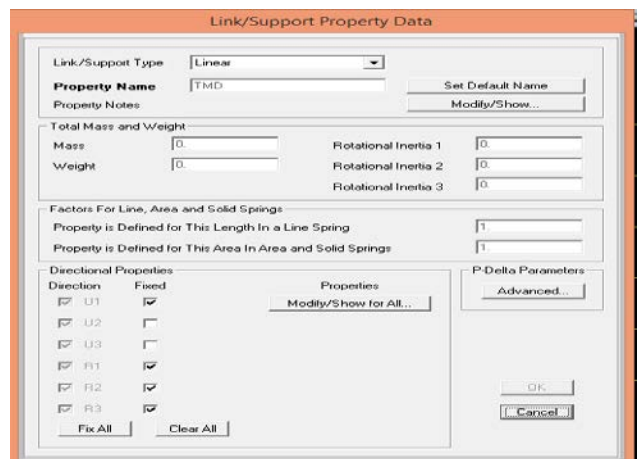
[۱]. ارزاقی، ش (۱۳۸۴)، "ارزیابی عملکرد جرم میراگر تنظیم شده در کنترل رفتار لرزه ای مدل های سازه ای سه بعدی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

[۲]. کنارنگی، ه (۱۳۸۸)، "بررسی عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده در کنترل رفتار غیرخطی مدل های سازه اس سه بعدی با در نظر گیری اثر اندرکنش خاک و سازه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

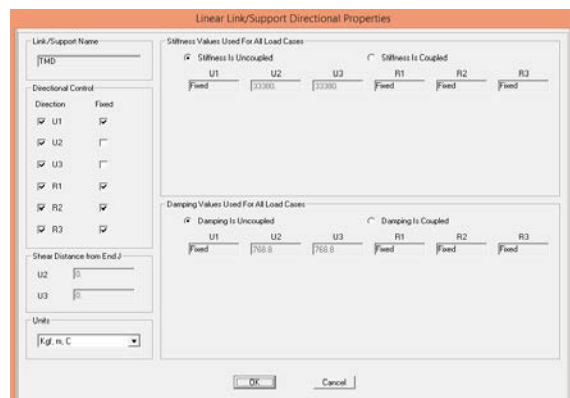
- [3] Ahlwat, A.S., (2003), "Multiobjective Optimal Absorber for Torsionally Coupled Seismically Excited Structures", *Engineering Structures Elsevier*, Vol 25, Issue 7, PP. 941-95
- [4]. Lin, C.C., and Ueng, J.M., (1999), "Seismic Response Reduction of Irregular Building Using Passive Tuned Mass Dampers", *Engineering Structures* (22) Elsevier, 513-524
- [5]. Pinkaew, T., and Lukkunaprasit, P., and Chatupote, P., (2003), "Seismic Effectiveness of Tuned Mass Dampers for Damage Reduction of Structures", *Engineering Structures*, Vol. 25, NO. 1, PP.46-39(8)
- [6]. Wang, J.F., (2005), "Seismic Performance of Multiple Tuned Mass Dampers for Soil-Irregular Building Interaction System ", *Int. J. Solids and Structures*, Vol.42, PP.5554-5536



شکل ۲ مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شده در نرم افزار SAP



شکل ۳ نحوه تعیین آزادی حرکت TMD در نرم افزار SAP



شکل ۴ محل درج سختی و میرایی TMD در نرم افزار SAP