



دانشگاه صنعتی امیر کبیر

(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۱۱۷ تا ۱۳۱  
Vol. 46, No. 2, Winter 2014, pp. 117- 131



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)

Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)  
(AJSR - CEE)

## کنترل ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌های غیرخطی با استفاده از مکانیزم میراگر جرمی هماهنگ شده نیمه فعال

محتشم محبی<sup>۱\*</sup>، حامد رسولی دباغ<sup>۲</sup>، سولماز مرادپور<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

(دریافت ۱۳۹۱/۳/۱۶، پذیرش ۱۳۹۲/۸/۲۷)

### چکیده

در این مقاله به طراحی مکانیزم میراگر جرمی هماهنگ شده ی نیمه فعال با میرایی متغیر برای کاهش پاسخ سازه های غیرخطی تحت اثر زلزله پرداخته شده است. برای تعیین دستوره‌های مناسب برای انتخاب میرایی در هر لحظه، الگوریتم کنترل نیمه فعالی برای سازه‌های غیرخطی بر مبنای الگوریتم بهینه ی آنی غیرخطی و قانون کنترل برشی تهیه شده است که برای طراحی بهینه ی سیستم کنترل، پارامترهای طراحی از حل یک مسأله ی بهینه‌سازی با تابع هدف کمینه کردن ماکزیمم پاسخ سازه با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین شده است. برای تحلیل عددی و ارزیابی روش پیشنهادی، قاب ۸ طبقه برشی دو بعدی، با رفتار غیرخطی هیستریسیس تحت اثر اغتشاش سفید در نظر گرفته شده و به طراحی این مکانیزم پرداخته شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهاد شده کارایی مناسب برای طراحی سیستم میراگر جرمی با میرایی متغیر برای سازه های غیرخطی دارد همچنین مقایسه‌ی عملکرد این مکانیزم با میراگر جرمی هماهنگ شده غیر فعال و فعال نشان می‌دهد که عملکرد سیستم نیمه فعال در کاهش پاسخ‌های سازه‌های غیرخطی بهتر از عملکرد سیستم میراگر جرمی هماهنگ شده غیرفعال بوده اما در مقایسه با مکانیزم میراگر جرمی فعال عملکرد ضعیف تری داشته است.

### کلمات کلیدی

میراگر جرمی هماهنگ شده ی نیمه فعال، سازه‌های غیرخطی، کنترل نیمه فعال، کنترل بهینه ی آنی، قانون کنترل برشی.

\* نویسنده مسؤل و عهده دار مکاتبات Email: mohebbi@uma.ac.ir

## ۱- مقدمه

کنترل پاسخ سازه‌ها در مقابل تحریکات لرزه‌ای همواره یکی از چالش‌های مهندسی عمران بوده است بنابراین یافتن شیوه‌های جدید برای حفظ ایمنی و قابلیت اعتماد سازه‌ها تحت اثر این قبیل نیروها از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. بر همین مبنای طی سالیان اخیر، کاهش پاسخ سازه‌ای ناشی از اثرات نیروهای دینامیکی با استفاده از سامانه‌های کنترل سازه‌ها، توجه محققان بسیاری را به خود جلب کرده و تحقیقات گسترده و رو به رشدی را به دنبال داشته است [۳].

روش‌های کنترل اعمال شده در ساختمان‌ها به گروه‌های غیرفعال، فعال، نیمه‌فعال و هیبریدی تقسیم بندی می‌شوند. در این بین، ابزارهای کنترل نیمه‌فعال، ویژگی‌های کنترل فعال و کنترل غیرفعال را برای کاهش پاسخ سازه‌ها در برابر بارهای گوناگون دینامیکی، مانند ارتعاش حاصل از زلزله، ترکیب می‌کنند. به دلیل عملکرد نسبتاً بهتر ابزار کنترل نیمه‌فعال و همچنین نیاز به انرژی پایین در مقایسه با سیستم کنترل فعال، در سال‌های اخیر توجه‌ها بیشتر به این شاخه معطوف شده و تحقیقات و مطالعات زیادی برای توسعه مکانیزم‌های مختلف کنترل نیمه‌فعال صورت گرفته است. تحقیقات انجام شده در زمینه کنترل نیمه‌فعال شامل بررسی عملکرد مکانیزم‌های مختلف و توسعه الگوریتم‌های کنترلی، بیشتر به سازه‌های با رفتار خطی محدود شده است [۶]. از طرف دیگر تحت اثر تحریکات لرزه‌ای قوی، سازه‌ها عموماً وارد ناحیه غیرخطی خواهند شد. بنابراین برای بررسی کامل‌تر و کاربردی‌تر موضوع، باید کاربرد سیستم کنترل نیمه‌فعال، با فرض رفتار غیر خطی سازه‌ها انجام پذیرد که در این پژوهش به این مسأله پرداخته شده است.

میراگر جرمی هماهنگ شده ۱ به عنوان یکی از مکانیزم‌های غیرفعال کنترل ارتعاشات در سالهای اخیر برای کاهش پاسخ سازه‌های مختلف تحت اثر نیروهای دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است [۹]. اکثر مطالعات انجام شده بر روی میراگرهای جرمی هماهنگ شده غیرفعال در زمینه تعیین مقادیر بهینه پارامترهای آن نظیر سختی و میرایی بوده و معیارهای مختلفی در این رابطه بیشتر برای سازه‌های با رفتار خطی پیشنهاد شده است [۱۲]. با این وجود، این نوع مکانیزم نسبت به مقادیر فرکانس‌های تنظیمی، حتی در مواقعی که به صورت بهینه طراحی شوند، حساس بوده و عملکرد آن به علت عوامل‌های ثابت و غیرقابل تغییر میراگر محدود است [۱۳]. در رابطه با کاربرد TMD در سازه‌های با رفتار غیرخطی نیز مطالعاتی صورت گرفته است [۱۴] برای سازه‌های تحت اثر زلزله‌های متوسط و شدید که

رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهند، تغییرات در سختی و یا عدم قطعیت در تخمین پارامترهای TMD نظیر سختی و میرایی ممکن است باعث شود TMD از حالت تنظیم شده (بهینه) خارج شده و اصطلاحاً نامیزان شود که باعث کاهش کارایی آن خواهد شد. لذا قطعیت مؤثر بودن استفاده از TMD در برابر هر ثبت ارتعاش در سازه‌های غیرخطی جود نداشته و عملکرد TMD وابسته به مشخصات ارتعاش خارجی ورودی (حداکثر شتاب، محتوای فرکانس و غیره) می‌باشد.

بنابراین با توجه به محدودیت‌های میراگر جرمی هماهنگ شده غیر فعال نظیر دامنه فرکانسی محدود و مشکلات در ارتباط با نامیزان شدن، در سال‌های اخیر، تمایل به استفاده از روشهای کنترل فعال یا نیمه‌فعال برای بهبود عملکرد این سیستم افزایش یافته است. در همین راستا، میراگرهای جرمی فعال ۲ که ترکیب میراگر جرمی هماهنگ شده با یک سیستم کنترل فعال هستند نیز توسعه یافته و به طور وسیعی برای کنترل فعال ساختمان‌ها و پل‌ها به کار رفته‌اند [۲۱]. میراگرهای جرمی فعال نسبت به حالت غیرفعال، مزیت‌های قابل توجهی از قبیل استفاده بهینه از این مکانیزم برای دامنه‌های فرکانسی بیشتر و قابلیت عملکرد مناسب حتی در صورت عدم تنظیم مناسب پارامترها دارند. با این حال، این سیستم‌ها نیز به علت نیاز به یک منبع بزرگ تولید کننده انرژی خارجی که ممکن است به هنگام خطرات طبیعی از جمله زلزله در دسترس نباشند محدودیت‌هایی را دارد. به همین دلیل مکانیزم میراگر جرمی هماهنگ شده نیمه‌فعال ۳ که در آن از ابزارهایی با میرایی یا سختی قابل کنترل استفاده می‌شود پیشنهاد شده و عملکرد آن عمدتاً بر روی سازه‌های با رفتار خطی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۲۷]. در این نوع مکانیزم به جای اعمال مستقیم نیرو مثل حالت کنترل فعال، نیروی کنترل بوسیله تغییر در سختی یا میرایی سیستم کنترل ایجاد می‌شود. اکثر مطالعات تاثیرات مثبت میراگر جرمی هماهنگ شده نیمه‌فعال در سازه‌های خطی را تایید کرده و نشان داده‌اند که عملکرد میراگر جرمی هماهنگ شده با نیمه‌فعال ساختن آن بهبود می‌یابد [۲۵]. با این وجود، تحقیقات در زمینه کارایی و شیوه طراحی این مکانیزم کنترلی در سازه‌ها با رفتار غیرخطی بسیار محدود می‌باشد.

از طرف دیگر، استفاده موفق از راه حل کنترل نیمه‌فعال نیازمند آن است که وسیله قابل تنظیم مشخصات مورد نیاز را داشته و همچنین الگوریتم کنترلی مناسبی استفاده شود و فناوری‌های مورد نیاز تامین گردد. الگوریتم‌ها و روش‌های متعددی در ادبیات فنی برای کنترل نیمه‌فعال پیشنهاد شده

میرایی بهینه، یک مسأله بهینه‌سازی بر مبنای کمینه‌سازی ماکزیمم پاسخ سازه تعریف شده است. با توجه به پیچیدگی حل مسأله بهینه‌سازی با روش‌های معمولی بهینه‌سازی، از الگوریتم ژنتیک ۵ برای حل آن استفاده شده است.

در بخش‌های بعد ابتدا به بررسی مکانیزم SATMD با استفاده از میرایی متغیر پرداخته شده و معادلات ارتعاش سازه غیرخطی مجهز به SATMD در طبقه آخر، تحت اثر زلزله بیان می‌شود. سپس الگوریتم نیمه‌فعال پیشنهادی برای طراحی SATMD برای سازه‌های با رفتار غیرخطی بر مبنای کنترل بهینه‌ی آنی و قانون کنترل برشی و نحوه‌ی بهینه‌سازی پارامترهای سیستم کنترل ارائه می‌گردد. در نهایت تحلیل‌های عددی بر روی سازه ۸ طبقه برشی غیرخطی انجام گرفته و نتایج گزارش شده است.

## ۲- مکانیزم SATMD با میرایی متغیر

برای رسیدن به مکانیزم SATMD باید از یک ابزار کنترل نیمه فعال (چه ابزار با سختی متغیر و یا چه ابزار با میرایی متغیر) استفاده شود. از آنجایی که کنترل میرایی راحت‌تر از کنترل سختی و یا جرم قابل اجرا می‌باشد [۳۲]، در اکثر سیستم‌های SATMD از کنترل میرایی استفاده شده است. همچنین الگوریتم‌های کنترل نیمه فعال بر مبنای کنترل میرایی بطور گسترده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند [۳۵]. در این مقاله نیز، مکانیزم SATMD از طریق استفاده از یک ابزار با میرایی متغیر مدل‌سازی می‌شود.

در این روش، میراگر غیرفعال سیستم TMD با یک میراگر با مشخصات قابل تنظیم نظیر میراگرهای اریفیس متغیر، میراگرهای اصطکاک‌ی و یا میراگرهای مایع مغناطیسی یا الکتریکی جایگزین می‌شود که امکان تغییر ضریب میرایی در هر لحظه برای سیستم را فراهم می‌سازد.

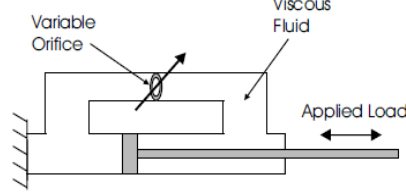
سیستم اریفیس-متغیر در عین سادگی معادلات دامنه خوبی را برای نیروهای میرایی فراهم می‌سازد. این میراگر قبلاً در سازه‌های واقعی عمرانی به کار گرفته شده و در عمل با مقیاس واقعی برای استفاده موجود است [۳۹]. همچنین مشخصات خطی این میراگر هیدرولیکی برخلاف میراگرهای مایع مغناطیسی یا الکتریکی که مشخصات غیرخطی دارند باعث عدم پیچیدگی در معادلات می‌شود. با توجه به این موارد در این مقاله از میراگر اریفیس متغیر با سیال ویسکوز به عنوان ابزار میرایی متغیر برای مکانیزم SATMD استفاده می‌شود که در شکل (۱) به صورت

است که برخی از آنها از تغییر و اقتباس قوانین و الگوریتم‌های کنترل فعال بدست آمده‌اند و برخی دیگر بطور مستقیم از-ملاحظات فیزیکی سیستم نشأت می‌گیرند. اکثر الگوریتم‌های پیشنهادی برای استفاده در مکانیزم SATMD با میرایی متغیر بوده و برای سازه‌ها با رفتار خطی توسعه یافته است [۲۵]. تئوریهای کنترل برای سازه‌های با رفتار غیرخطی و غیرالاستیک محدود هستند. با توجه به اینکه این مطالعه بر روی سازه‌های با رفتار غیرخطی صورت می‌گیرد بنابراین باید الگوریتم نیمه فعال مناسب برای این گونه از سازه‌ها استفاده گردد. در میان الگوریتم‌های مختلف برای کنترل نیمه فعال، الگوریتم بهینه برشی ۴ پیشنهاد شده توسط هروات [۲۲] برای استفاده در SATMD و توصیه شده توسط دایک [۲۸] برای کاربرد در میراگرهای متغیر، گزینه مناسبی می‌باشد که کارایی این الگوریتم در طراحی SATMD در مطالعات پینکاو و فوجینو [۱۳] و جی و همکاران [۲۹] نیز نشان داده شده است.

همانطوریکه اشاره شد تحقیقات انجام شده در زمینه کنترل نیمه‌فعال شامل بررسی عملکرد مکانیزم‌های مختلف و توسعه الگوریتم‌های کنترلی، بیشتر به سازه‌ها با رفتار خطی محدود بوده است. در واقع، ویژگی بارز و متمایزکننده این تحقیق از مطالعات قبلی در آن است که در این مقاله به بررسی نحوه طراحی و ارزیابی کارایی استفاده از مکانیزم میراگر جرمی نیمه فعال در سازه‌های غیرخطی پرداخته شده است. این امر با توجه به محدود بودن بررسی‌ها در خصوص کاربرد این مکانیزم در سازه‌های غیرخطی و با توجه به رفتار واقعی سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های شدید که عموماً وارد ناحیه غیرخطی می‌شوند و همچنین در نظر گرفتن قابلیت موجود در مکانیزم SATMD به لحاظ کاربردی، می‌تواند با اهمیت باشد. در این مطالعه همچنین، برای طراحی SATMD، الگوریتم کنترل نیمه فعال جدیدی بر مبنای قانون کنترل برشی پیشنهاد شده است که از دو مرحله تشکیل می‌شود. در بخش اول، با فرض اینکه یک مکانیزم کنترل فعال ایده‌آل برای کنترل وجود دارد، از الگوریتم بهینه آنی با استفاده از روش عددی نیومارک معرفی شده توسط چانگ و یانگ [۳۰] و توسعه یافته توسط جغتایی و محبی [۳۱] برای سازه‌های با رفتار غیرخطی و هیسترسیس با پسخور تغییر مکان، سرعت و شتاب برای تعیین نیروهای کنترلی مناسب استفاده شده است. در گام بعدی نیز مقادیر مناسب ضرایب میرایی سیستم کنترلی در هر لحظه با استفاده از قانون کنترل برشی انتخاب می‌شود. برای تمام موارد بهینه‌سازی سیستم کنترل نیمه فعال و تعیین پارامتر

شماتیک نشان داده شده است. این مکانیزم در واقع از یک پیستون-سیلندر که توسط یک مجرای کنترلی، کنترل می‌گردد، تشکیل می‌شود که در حالت غیرفعال شیر کنترلی ثابت و نسبتاً باز می‌باشد که با میرایی غیرفعال سیستم مطابقت دارد. در حالت نیمه فعال سیگنال‌های الکتریکی از طریق رایانه کنترلی محرک دریچه کنترل را راه اندازی می‌کند که باعث حرکت شیر کنترلی به سمت بالا یا پایین شده و در نتیجه موجب تغییر میرایی سیستم می‌گردد.

شکل (۱): ساختار میراگر اریفیس متغیر [۳۹]



شکل (۱): ساختار میراگر اریفیس متغیر [۳۹]

بنابراین با فرض رفتار خطی برای میراگر، نیروی میرایی متغیر میراگر در هر لحظه عبارت است از:

$$f(t) = c(t) \cdot \dot{x}_{tmd}(t) \quad (1)$$

که در آن  $c(t)$  ضریب میرایی وابسته به زمان بوده که با توجه به بسته یا باز بودن دریچه کنترلی بین دو مقدار حداقل و حداکثر تغییر می‌کند:

$$c_{min} \leq c(t) \leq c_{max} \quad (2)$$

$\dot{x}_{tmd}(t)$  سرعت نسبی کلاهک پیستون (یا همان سرعت نسبی میراگر جرمی نسبت به طبقه آخر) می‌باشد. برای تعیین  $c(t)$  در هر گام زمانی از الگوریتم کنترل نیمه فعال استفاده می‌شود.

### ۳- معادلات حرکت سازه غیرخطی مجهز به SATMD

سازه  $n$  درجه آزادی با رفتار غیرخطی و از نوع قاب برشی که مکانیزم SATMD با میرایی متغیر در طبقه آخر به آن اضافه شده است را در نظر بگیرید. در صورتی که سازه تحت ارتعاش پایه  $\ddot{X}_g$  قرار داشته باشد معادله حرکت سیستم غیرخطی می‌تواند به صورت رابطه (۳) نوشته شود:

$$M\ddot{X}(t) + F_D(\dot{X}(t)) + F_S(X(t)) = Df_d(t) + Me\ddot{X}_g \quad (3)$$

به ترتیب بردارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب سازه،  $f_d(t)$  نیروی کنترل میراگر نیمه فعال SATMD بوده که برابر است با:

$$f_d(t) = c(t)(\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n) \quad (4)$$

که در آن  $c(t)$  ضریب میرایی متغیر می‌باشد،

$$D^T = [0, 0, \dots, 1, -1]_{1 \times (n+1)}$$

$$e^T = [-1, -1, \dots, -1]_{1 \times (n+1)}$$

بردار انتقال شتاب پایه می‌باشند. همچنین ماتریس جرم سیستم سازه - SATMD بصورت (۵) می‌باشد:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_n & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & m_d \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \quad (5)$$

که در آن  $m_d$  جرم میراگر می‌باشد.

$F_D(\dot{X}(t))$  و  $F_S(X(t))$  و نیز بردارهای مربوط به نیروهای میرایی و نیروی مقاوم داخلی بوده که به ترتیب بصورت تابعی از سرعت و تغییر مکان سازه می‌باشند.

### ۴- توسعه الگوریتم کنترل نیمه فعال برای طراحی SATMD

در این مقاله با توجه به مفهوم قانون کنترل برشی، الگوریتم کنترلی نیمه فعال برای مکانیزم SATMD با میرایی متغیر برای کنترل نیمه فعال سازه‌های غیرخطی پیشنهاد داده شده است. در این نوع الگوریتم، قانون کنترل از دو مرحله تشکیل شده و طراحی کنترل‌گر در دو بخش صورت می‌گیرد. گام اول شامل طراحی و توسعه یک الگوریتم کنترل فعال می‌باشد با فرض اینکه یک وسیله‌ی کنترل فعال ایده‌آل برای کنترل وجود دارد. گام بعدی نیز شامل طراحی یک کنترل‌گر برشی می‌باشد که به میراگر نیمه فعال این اجازه را می‌دهد تا با ایجاد تغییر در مشخصات مکانیکی ابزار کنترلی نیمه فعال، نیروهای کنترلی که در حالت کنترل فعال بایستی به سازه وارد شوند را تولید نماید. در این مطالعه در گام اول از الگوریتم فعال توسعه یافته برای سازه‌های غیرخطی برمبنای کنترل بهینه ی آنی با استفاده از روش عددی نیومارک که کارایی آن در سازه‌های با رفتار غیر خطی نشان داده شده است [۳۱] برای تعیین نیروی کنترل فعال استفاده می‌شود.

#### ۴-۱- تعیین نیروی کنترل

نیروی میرایی  $f_d(t)$  که میراگر نیمه فعال مکانیزم SATMD در هر گام زمانی تولید می‌کند برابر است با:

$$f_d(t) = c(t)\dot{x}_{tmd} \quad , \quad \dot{x}_{tmd} = \dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n \quad (6)$$

که در آن  $\dot{x}_{tmd}$  سرعت نسبی TMD نسبت به طبقه آخر و  $c(t)$ ، ضریب میرایی متغیر است.

در معادله (۳) نیروی  $f_d(t)$  تولید شده توسط SATMD با

### ۳-۴- تابع عملکرد سیستم کنترل فعال

ایده اصلی استخراج الگوریتم کنترل بهینه آنی مبتنی بر تعریف یک تابع عملکرد می باشد که ترکیبات مختلف پاسخ (تغییر مکان، سرعت و شتاب) و همچنین نیروی کنترل را در بر می‌گیرد [۳۱]. در این مقاله حالت پسخور کامل<sup>۶</sup> در نظر گرفته شده است. در این حالت، تابع عملکرد سیستم کنترل فعال در هر گام زمانی  $k$  بصورت معادله تعریف می‌شود که شامل عبارت های مربوط به تغییر مکان، سرعت، شتاب و همچنین نیروی کنترل می‌باشد. ماتریس‌های  $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \mathbf{Q}_3$  ماتریس‌های  $(n+1) \times (n+1)$  نیمه مثبت معین مربوط به جریمه پاسخ سازه و  $\mathbf{R}_{m \times m}$  ماتریس مثبت معین مربوط به جریمه نیروی کنترل می باشد که  $m$  نشان‌دهنده تعداد کنترل‌گر می‌باشد. از آنجایی که فقط یک مکانیزم SATMD در طبقه آخر استفاده شده بنابراین ماتریس  $\mathbf{R}$  یک عامل خواهد بود:

$$J_k = \frac{1}{2} (\mathbf{X}_k^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{X}_k + \dot{\mathbf{X}}_k^T \mathbf{Q}_2 \dot{\mathbf{X}}_k + \ddot{\mathbf{X}}_k^T \mathbf{Q}_3 \ddot{\mathbf{X}}_k + \mathbf{u}_k^T \mathbf{R} \mathbf{u}_k) \quad (12)$$

نیروی کنترل از کمینه سازی تابع عملکرد فوق تعیین می‌شود. برای اینکار معادله هامیلتون در هر گام زمانی تشکیل شده و از کمینه‌سازی آن، نیروی کنترل بصورت (۱۳) تعیین می‌شود:

$$H_k = \frac{1}{2} (\mathbf{X}_k^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{X}_k + \dot{\mathbf{X}}_k^T \mathbf{Q}_2 \dot{\mathbf{X}}_k + \ddot{\mathbf{X}}_k^T \mathbf{Q}_3 \ddot{\mathbf{X}}_k + \mathbf{u}_k^T \mathbf{R} \mathbf{u}_k) + \lambda_1^T (\mathbf{X}_k - \mathbf{X}_{k-1} - \Delta \mathbf{X}_k) + \lambda_2^T [\dot{\mathbf{X}}_k - (1-a_5)\dot{\mathbf{X}}_{k-1} + a_6\ddot{\mathbf{X}}_{k-1} - a_4\Delta \mathbf{X}_k] + \lambda_3^T [\ddot{\mathbf{X}}_k - (1-a_3)\ddot{\mathbf{X}}_{k-1} + a_2\dot{\mathbf{X}}_{k-1} - a_1\Delta \mathbf{X}_k] \quad (13)$$

که در آن  $\lambda_i$  ضرایب لاگرانژ است شرط لازم برای جایگزینی تمام موارد کمینه سازی تابع عملکرد  $J_k$  عبارت است از:

$$\frac{\partial H_k}{\partial \mathbf{X}_k^T} = \frac{\partial H_k}{\partial \dot{\mathbf{X}}_k^T} = \frac{\partial H_k}{\partial \ddot{\mathbf{X}}_k^T} = \frac{\partial H_k}{\partial \mathbf{u}_k^T} = \frac{\partial H_k}{\partial \lambda_1^T} = \frac{\partial H_k}{\partial \lambda_2^T} = \frac{\partial H_k}{\partial \lambda_3^T} = 0 \quad (14)$$

با جایگذاری معادله (۱۳) در معادله و ساده سازی در نهایت نیروی کنترل در هر لحظه به شکل معادله بدست می‌آید:

$$\mathbf{u}_k = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{K}_{n_k}^{*-T} (\mathbf{Q}_1 \mathbf{X}_k + a_4 \mathbf{Q}_2 \dot{\mathbf{X}}_k + a_1 \mathbf{Q}_3 \ddot{\mathbf{X}}_k) \quad (15)$$

که در آن اندیس  $-T$  به معنای ترانهاده معکوس یک ماتریس می‌باشد. در استفاده از معادله فوق برای تعیین  $\mathbf{u}_k$ ، باید مقدار نیروی کنترل کمتر از ظرفیت محرک باشد. همچنین ماتریس  $\mathbf{K}_{n_k}^{*-T}$  تعریف شده در معادله (۹) که شامل ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی است، نیز معکوس پذیر باشد. لازم به ذکر است ماتریس فوق در سازه‌های برشی با توجه به مشخصات

نیروی کنترل فعال  $u(t)$  جایگزین شده و بدین ترتیب معادله (۳) به صورت (۷) بازنویسی می‌شود:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{F}_D(\dot{\mathbf{X}}(t)) + \mathbf{F}_S(\mathbf{X}(t)) = \mathbf{D}u(t) + \mathbf{M}e\ddot{\mathbf{X}}_g \quad (7)$$

که در آن  $u(t)$  نیروی کنترل می باشد.

### ۲-۴- روش عددی نیومارک

پاسخهای سازه که از حل معادله (۷) با روش عددی نیومارک بدست می‌آیند عبارتند از:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1} + \Delta \mathbf{X}_k \quad (8a)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_k = (1-a_5)\dot{\mathbf{X}}_{k-1} - a_6\ddot{\mathbf{X}}_{k-1} + a_4\Delta \mathbf{X}_k \quad (8b)$$

$$\ddot{\mathbf{X}}_k = (1-a_3)\ddot{\mathbf{X}}_{k-1} - a_2\dot{\mathbf{X}}_{k-1} + a_1\Delta \mathbf{X}_k \quad (8c)$$

$$\Delta \mathbf{X}_k = \mathbf{K}_{n_k}^{*-1} \Delta \mathbf{F}_k \quad (8d)$$

که در آن پارامترهای معادلات فوق از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\mathbf{K}_{n_k}^* = a_1 \mathbf{M} + a_4 \mathbf{C}_{k-1}^* + \mathbf{K}_{k-1}^* \quad (9)$$

$$\Delta \mathbf{F}_k = (\mathbf{P}_k - \mathbf{P}_{k-1}) + \mathbf{M}(a_2 \dot{\mathbf{X}}_{k-1} + a_3 \ddot{\mathbf{X}}_{k-1}) + \mathbf{C}_{k-1}^*(a_5 \dot{\mathbf{X}}_{k-1} + a_6 \ddot{\mathbf{X}}_{k-1}) \quad (10)$$

$$a_3 = \frac{1}{2\delta}; a_2 = \frac{1}{\delta\Delta t}; a_1 = \frac{1}{\delta(\Delta t)^2}; \quad (11, a, b, c)$$

$$a_5 = \frac{\gamma}{\delta}; a_4 = \frac{\gamma}{\delta\Delta t}; \quad (11, d, e, f)$$

$$a_6 = \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\delta} - 1 \right);$$

بدین ترتیب برای انجام تحلیل دینامیکی غیر خطی، از روش انتگرال گیری عددی نیومارک - بتا برای حل معادلات ارتعاش استفاده می‌شود.  $\gamma, \delta$  پارامترهای روش نیومارک می‌باشند که باید بصورت مناسبی انتخاب شوند تا پایداری در حل معادلات ارتعاش حاصل شود. در این مقاله، برای تحلیل غیرخطی سامانه به منظور اطمینان از پایداری روش انتگرال گیری عددی،  $\gamma = 0.5, \delta = 0.25$  زیرا انتخاب شده است. برای پارامترهای  $\delta, \gamma$  موجب می‌شود شیوه انتگرال گیری پایدار نامشروط شود [۴۰]. همچنین برای دقت بیشتر گام زمانی برای انتگرال گیری  $\Delta t = 0.002$  ثانیه در نظر گرفته شده است. برای این منظور داده های ارتعاش خارجی در هر گام زمانی به صورت خطی درون یابی شده‌اند. این موضوع باعث می‌شود تا خطاهایی که به واسطه عدم همگرایی عددی در محل‌های تغییر سختی اتفاق می‌افتد بسیار ناچیز بوده و قابل چشم پوشی باشند.

محبی [۳۱] تعیین گردیده است که در این روش پارامترهای فوق از بهینه سازی یک مسئله‌ی بهینه سازی، با تابع هدف مینیمم کردن ماکزیمم پاسخ سازه، تعیین می‌شوند.

مسئله بهینه سازی برای تعیین این پارامترها در حالتی که از SATMD با ابزار میرایی متغیر استفاده شود با در نظر گرفتن تابع هدف به صورت مینیمم سازی ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\text{Find } Q_1, Q_2, Q_3, R, c_{\min}, c_{\max} \quad (19a)$$

$$\text{Minimize } F(T) = Y_{\max} \quad (19b)$$

که در آن  $Y_{\max}$  حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی سازه می‌باشد.

برای حل مسئله بهینه سازی تعریف شده، از الگوریتم ژنتیک [۴۱] با توجه به قابلیت بالای آن در حل مسائل بهینه سازی غیر خطی و هم چنین توابع گسسته استفاده شده است که جزییات بیشتر در مرجع [۳۱] آمده است.

#### ۶- مطالعات عددی

برای انجام مطالعات عددی به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی برای طراحی SATMD و همچنین قابلیت‌های این مکانیزم در کنترل ارتعاشات و بهبود رفتار سازه‌های غیرخطی در برابر زلزله، قاب ۸ طبقه برشی مجهز به SATMD با میرایی متغیر در طبقه آخر، مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شده است. به منظور مدل سازی رفتار غیرخطی، سازه با رفتار الاستو-پلاستیک دو خطی با حلقه‌های هیسترسیس کامل مطابق آنچه در شکل (۴) نشان داده شده است، در نظر گرفته می‌شود. همان طوریکه برای یکی از حلقه‌ها (a-b-c-d-e-f) مشاهده می‌شود باربرداری با سختی اولیه (الاستیک) صورت می‌گیرد. در این شکل محور عمودی نیروی برشی (نیروی سختی، طبقه و محور افقی تغییر مکان جانبی نسبی بین طبقات<sup>v</sup> را نشان می‌دهد. جرم هر طبقه  $m$  برابر تن  $m = 345/6$  سختی الاستیک برابر  $K_1 = 3/404 \times 10^5 \text{ kN/m}$ ، سختی ثانویه بعد از تسلیم برابر  $K_2 = 3/404 \times 10^4 \text{ kN/m}$  و میرایی خطی هر طبقه برابر  $c = 734/3 \text{ kN.sec/m}$  می‌باشد. همچنین تسلیم در هر طبقه و تغییر مکان جانبی نسبی برابر  $Y_{\text{yielding}} = 2/4 \text{ cm}$  اتفاق می‌افتد. برای توضیحات تکمیلی در رابطه با مشخصات سازه می‌توان به مرجع [۴۲] مراجعه کرد.

ارتعاش اغتشاش سفید  $W(t)$  با حداکثر شتاب زمین  $0.4g$  مطابق شکل (۵) بعنوان ارتعاش خارجی برای طراحی سیستم کنترل در نظر گرفته شده است. این ارتعاش بعنوان نمونه برای

ماتریس‌های  $M, C$  و  $K$  که به صورت ماتریس‌های قطری متقارن با درایه‌های مثبت می‌باشند، همواره معکوس پذیر می‌باشد [۳۱].

#### ۴-۴- تعیین ضریب میرایی

بعد از تعیین نیروی کنترل نیاز به تعیین ضریب میرایی در هر لحظه است. مطابق الگوریتم پیشنهادی ضریب میرایی  $c(t)$  در هر لحظه طوری انتخاب می‌شود که حاصلضرب  $c(t)\dot{x}_{\text{tmd}}$  تقریباً برابر نیروهای کنترلی فعال معادل  $u(t)$  که در گام اول الگوریتم از معادله (Error! Reference source not found) محاسبه شده است، گردد. به عبارت دیگر ضریب میرایی  $c(t)$  در هر گام بصورت (۱۶) بدست می‌آید:

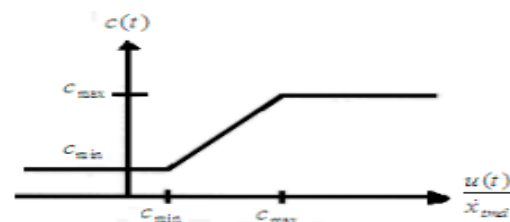
$$c(t) \cong \text{Sat} \left( \frac{u(t)}{\dot{x}_{\text{tmd}}} \right), \dot{x}_{\text{tmd}} \neq 0 \quad (16)$$

که در آن تابع  $\text{Sat}$  بین دو مقدار  $c_{\min}$  و  $c_{\max}$  اشباع می‌گردد. از طرفی برای میراگرهای نیمه فعال (مکانیزم اریفیس متغیر استفاده شده) ضریب میرایی در طول مدت پاسخ می‌تواند بین حدود بالا و پایین  $c_{\max}$  و  $c_{\min}$  تغییر کند:

$$c_{\min} \leq c(t) \leq c_{\max} \quad (17)$$

بنابراین با استفاده از شرط بالا ضریب میرایی در هر لحظه به صورت رابطه‌ی (۱۸) انتخاب می‌شود که در شکل (۲) نیز نشان داده شده است.

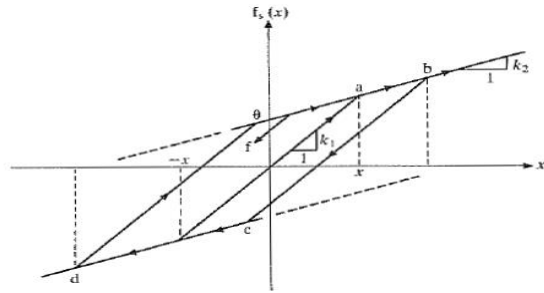
$$c(t) = \begin{cases} c_{\min} & c(t) \leq c_{\min} \\ c(t) = \frac{u(t)}{\dot{x}_{\text{tmd}}} & c_{\min} < c(t) < c_{\max} \\ c_{\max} & c(t) \geq c_{\max} \end{cases} \quad (18)$$



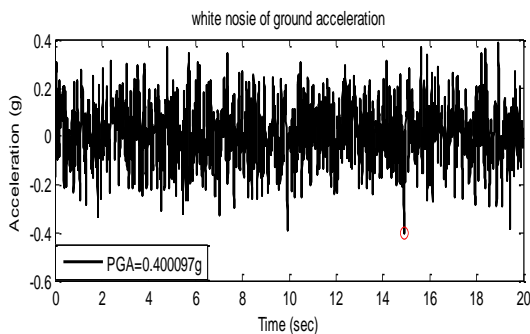
شکل (۲): نحوه تغییرات مقادیر ضریب میرایی

#### ۵- طراحی بهینه SATMD با استفاده از الگوریتم ژنتیک

برای طراحی بهینه مکانیزم SATMD لازم است پارامترهای سیستم کنترل نیمه فعال از قبیل ماتریس‌های وزنی  $Q$  و  $R$  مربوط به محاسبه نیروی کنترل و همچنین مقادیر حد ماکزیمم و مینیمم ضرایب میرایی  $(c_{\min}, c_{\max})$  به طور بهینه انتخاب شوند. در این مقاله برای افزایش کارایی سیستم کنترل نیمه فعال، ماتریس‌های  $R, Q_1, Q_2, Q_3$  و همچنین مقادیر حد ماکزیمم و مینیمم ضرایب میرایی بر اساس روش ارائه شده توسط جغتایی و



شکل (۴): مدل رفتاری الاستو- پلاستیک دو خطی [۳]



شکل (۵): شتاب ارتعاش اغتشاش سفید  $W(t)$  با  $PGA=0.4g$

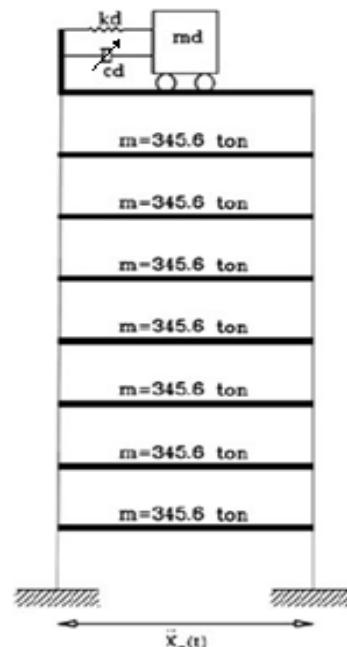
#### ۶-۱- کنترل نیمه فعال با استفاده از SATMD

در این بخش به طراحی و ارزیابی SATMD برای کاهش پاسخهای سازه غیرخطی ۸ طبقه مورد بررسی پرداخته می‌شود. با مشخصات تن  $m_d=13/8$  و  $k_d=445 \text{ kN/m}$  و دارای درصد جرمی با میرایی متغیر در نظر گرفته شده است که دارای درصد جرمی  $\mu=0.15\%$  می‌باشد. از آنجایی که هدف اصلی در این تحقیق بررسی کارایی مکانیزم SATMD می‌باشد، برای انجام تحلیل‌های عددی برای درصد جرمی مفروض، سختی TMD با استفاده از روش ارائه شده برای سازه‌های خطی در مرجع [۱۰] محاسبه شده است. بدیهی است با ورود سازه به ناحیه غیرخطی، TMD از حالت هماهنگ شده خارج خواهد شد و انتخاب هر مقداری برای TMD نمی‌تواند حالت بهینه داشته باشد. بنابراین مقادیر بعنوان نمونه برای توضیح روش انتخاب شده است. طراحی سیستم کنترل نیمه فعال با توجه به الگوریتم پیشنهادی در بخش قبل، در دو مرحله صورت می‌گیرد. بدین ترتیب در هر گام ابتدا نیروی کنترل مورد نیاز از رابطه (۱۵) محاسبه شده و با توجه به رابطه (۱۸) فرمان مناسب برای انتخاب ضریب میرایی کنترل‌گر، داده می‌شود. همچنین پارامترهای سیستم کنترل از جمله ماتریس‌های وزنی و حدود مقادیر ماکزیمم و مینیمم میرایی با توجه به مساله بهینه سازی تعریف شده در روابط (۱۹a) و (۱۹b) و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک انتخاب می‌شود.

طراحی انتخاب شده ولی در هر منطقه می‌توان تعداد مشخصی از زلزله‌های طراحی آن منطقه را، مطابق آئین‌نامه‌های طراحی بعنوان ارتعاش خارجی برای طراحی سیستم کنترل استفاده نمود.

همچنین با توجه به اینکه در کاربرد الگوریتم کنترل نیمه فعال، استفاده از نرم‌افزارهای آماده معمولاً ممکن نیست در این مقاله، در تمامی موارد مورد نیاز مانند تحلیل سازه‌های غیرخطی، الگوریتم کنترل فعال و نیمه فعال، حل مسائل بهینه سازی و الگوریتم ژنتیک از برنامه‌های رایانه‌ای نوشته شده در محیط نرم افزار متلب<sup>۱</sup> استفاده شده است.

ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی، تغییرمکان جانبی کل، شتاب و نیروی برشی طبقات مختلف تحت اثر ارتعاش  $W(t)$  برای سازه کنترل نشده در جدول (۱) داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که طبقات ۲ و ۳ دارای تغییر مکان جانبی نسبی بیشتر از تغییر مکان جانبی تسلیم بوده لذا این طبقات وارد ناحیه غیرخطی شده‌اند. همچنین حداکثر تغییرمکان نسبی جانبی تقریباً برابر  $Y_{max}=4/75 \text{ cm}$  بوده که حدود ۲۰٪ تغییر مکان جانبی نسبی تسلیم می‌باشد. نتایج بدست آمده از تحلیل غیر خطی سازه کنترل نشده انطباق مناسبی با نتایج مرجع-های [۳۱] و [۱۸] دارد که درستی مدل‌سازی و تحلیل‌های انجام شده را نشان می‌دهد



شکل (۳): قاب ۸ طبقه برشی مجهز به SATMD در طبقه آخر

$$Q_1 = \begin{bmatrix} q_1 [I]_{8 \times 8} & 0_{8 \times 1} \\ 0_{1 \times 8} & q_{1m} \end{bmatrix}_{9 \times 9} \quad (21a)$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} q_2 [I]_{8 \times 8} & 0_{8 \times 1} \\ 0_{1 \times 8} & q_{2m} \end{bmatrix}_{9 \times 9} \quad (21b)$$

$$Q_3 = \begin{bmatrix} q_3 [I]_{8 \times 8} & 0_{8 \times 1} \\ 0_{1 \times 8} & q_{3m} \end{bmatrix}_{9 \times 9} \quad (21c)$$

مسئله بهینه سازی تعریف شده در معادلات (19a) و (19b) دارای ۸ متغیر بوده که با حل مسأله بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقادیر بهینه تعیین شده است که در حالت بهینه حدود ماکزیمم و مینیمم میرایی سیستم کنترل SATMD بصورت زیر می باشد:

$$c_{min} = 3714/987N.sec/m, c_{max} = 10000/4776 N.sec/m$$

در کاربردهای عملی مقدار  $c_{min}, c_{max}$  باید بر اساس مشخصات فیزیکی میراگر جرمی و ظرفیت میراگر تعیین شود. در این مقاله که پژوهش اغلب تئوریک است مقدار  $c_{min}, c_{max}$  طوری انتخاب شده است که شامل حالت بهینه عملکرد SATMD باشد و همچنین در محدوده‌ی مقادیر موجود برای میراگرهای واقعی باشد. مقادیر ماکزیمم پاسخ‌های سازه کنترل شده با SATMD تحت اثر اغتشاش سفید  $W(t)$  در جدول (۱): گزارش شده است.

برای طراحی سیستم کنترل نیمه فعال، یک کنترل گر در نظر گرفته شده لذا ماتریس R بصورت اسکالر خواهد بود که به صورت رابطه‌ی (۲۰) در نظر گرفته شده است:

$$10^{-\gamma} \times 5 R = r = \quad (20)$$

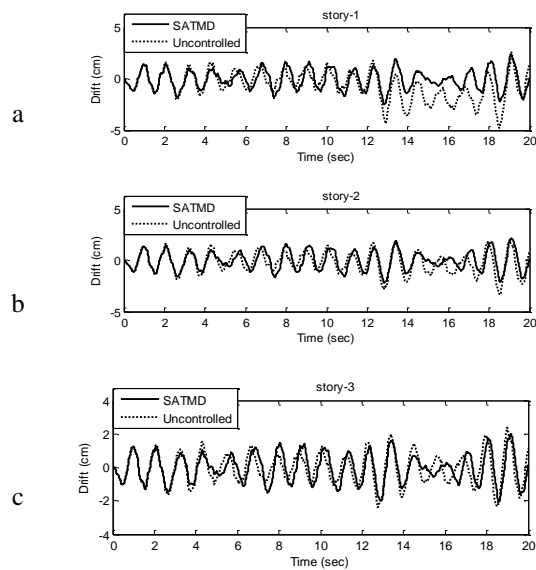
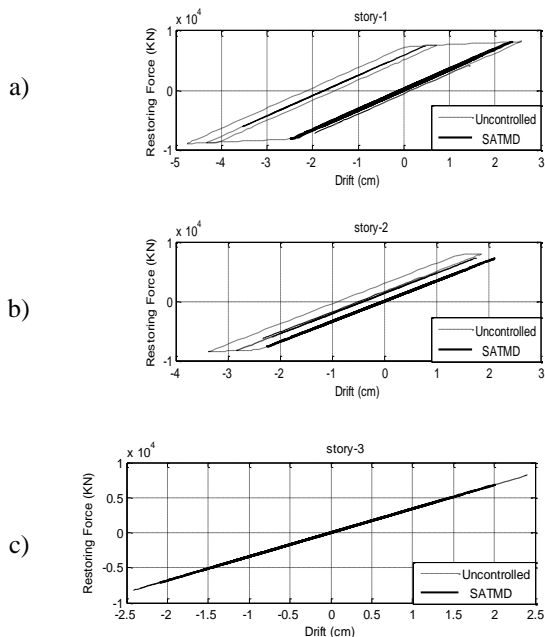
در اکثر تحقیقات قبلی به منظور کاهش تعداد مجهولات طراحی و افزایش سرعت محاسبات، محققین صورت‌های خاصی را برای ماتریسهای وزنی در نظر گرفته اند [۴۲،۳۱،۳۰]. در این مقاله برای سادگی محاسبات و با هدف تمرکز بیشتر روی موضوع اصلی مقاله یعنی توسعه الگوریتم نیمه فعال برای طراحی مکانیزم SATMD و بررسی کارایی آن در کاهش پاسخ سازه های غیر خطی، بدون ایجاد مشکل در کلیات مساله، ماتریس های وزنی به شکل ماتریس قطری با درایه های مساوی برای هر طبقه سازه و یک پارامتر مجزا برای جرم میراگر (مطابق آنچه در معادلات ۲۱ نشان داده شده است) در نظر گرفته شده است که همگی شرایط و ملزومات مربوط به ماتریس های وزنی از جمله ماتریس معین مثبت بودن را برآورده می سازند. تحقیقات قبلی در مورد استفاده از سایر آرایش ها برای ماتریس های وزنی در طراحی سیستم کنترل فعال نشان می دهند که استفاده از پیکربندی های دیگر برای ماتریس های وزنی زیاد در نتایج حاصله تغییر ایجاد نمی کند [۳۱].

جدول (۱): ماکزیمم پاسخ های سازه کنترل نشده و کنترل شده با SATMD تحت اثر ثابت اغتشاش سفید  $W(t)$

طبقه	سازه کنترل نشده				سازه کنترل شده با SATMD			
	جانبی نسبی تغییر مکان (cm)	جانبی کل تغییر مکان (cm)	ماکزیمم تغییر مکان (cm/s <sup>2</sup> )	ماکزیمم شتاب (cm/s <sup>2</sup> )	جانبی نسبی تغییر مکان (cm)	جانبی کل تغییر مکان (cm)	ماکزیمم تغییر مکان (cm/s <sup>2</sup> )	ماکزیمم شتاب (cm/s <sup>2</sup> )
۱	۴/۷۵	۴/۷۵	۶۳۲/۶	۸۹۷۰/۸	۲/۵۷	۲/۵۷	۶۱۳/۴	۸۲۲۸/۸
۲	۳/۵۲	۸/۲۲	۶۷۶/۱	۸۵۴۷/۹	۲/۲۸	۴/۸۱	۶۴۰/۷	۷۷۴۶/۹
۳	۲/۴۷	۱۰/۵۵	۶۷۸/۷	۸۱۹۲	۲/۲	۶/۷۸	۶۵۹/۴	۷۴۷۲/۵
۴	۲/۲۱	۱۲/۵۸	۶۸۲/۸	۷۵۱۵/۵	۲/۱۴	۸/۷۱	۶۶۶/۳	۷۲۸۹/۷
۵	۱/۷۸	۱۴/۲۹	۷۶۲/۱	۶۰۳۴/۹	۱/۸	۱۰/۴۳	۷۲۲/۱	۶۳۲۵/۸
۶	۱/۴۶	۱۵/۷۰	۸۳۸/۸	۴۹۵۵/۴	۱/۴۸	۱۱/۶۷	۶۷۶/۳	۵۰۲۲/۳
۷	۱/۱۲	۱۶/۷۲	۸۴۷/۹	۳۸۱۳/۴	۱/۱۰	۱۲/۴۵	۶۵۱/۷	۳۷۴۰/۴
۸	۰/۶۵	۱۷/۲۴	۸۰۷/۵	۲۲۰۰/۲	۰/۶۷	۱۲/۸۴	۷۳۱/۳	۲۲۸۰/۶



سازی را کاهش میزان انرژی هیستریسیس انباشته شده و یا حتی شتاب سازه در نظر گرفت و به طراحی سیستم کنترلی پرداخت.



شکل (۶): تاریخچه زمانی تغییر مکان جانبی نسبی ۳ طبقه اول سازه کنترل نشده و کنترل شده با SATMD. (a) طبقه اول؛ (b) طبقه دوم؛ (c) طبقه سوم.

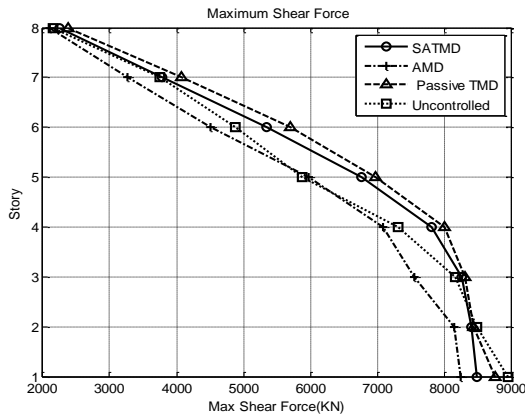
شکل (۷): منحنی هیستریسیس ۳ طبقه اول سازه کنترل نشده و کنترل شده با SATMD. (a) طبقه اول؛ (b) طبقه دوم؛ (c) طبقه سوم. ۶-۲- ارزیابی کارایی میراگر جرمی نیمه فعال، غیرفعال و فعال در کاهش پاسخ سازه‌های غیر خطی

در این بخش برای ارزیابی بهتر عملکرد مکانیزم SATMD در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های با رفتار غیرخطی، مکانیزم‌های میراگر جرمی غیرفعال و فعال نیز مورد بررسی قرار گرفته اند و نتایج بدست آمده مقایسه خواهند شد. TMD با مشخصات  $m_d=13/8$ ،  $c_d=14/4 \text{ kN}\cdot\text{sec}/\text{m}$  و  $k_d=527 \text{ kN}/\text{m}$  برای این منظور، در نظر گرفته شده است که دارای درصد جرمی  $\mu=0/5\%$  می‌باشد. گفتنی است که مقادیر فوق بعنوان نمونه برای پارامترهای TMD در نظر گرفته شده اند.

در شکل‌های (۸) تا (۱۱) به ترتیب ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی، تغییر مکان جانبی کل، ماکزیمم شتاب و ماکزیمم نیروی برشی طبقات مختلف تحت اثر ارتعاش  $W(t)$  در حالت‌های استفاده از مکانیزم‌های مختلف میراگر جرمی نشان داده شده‌اند. همچنین شکل (۱۲) نیز ضریب شکل پذیری مورد نیاز هر طبقه که به صورت نسبت ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی هر طبقه به تغییر مکان جانبی نسبی تسلیم تعریف می‌شود را برای مکانیزم‌های مختلف کنترلی نشان می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌شود، TMD غیر فعال در کاهش

در شکل‌های (۶) و (۷) نیز به ترتیب، تاریخچه زمانی تغییر مکان جانبی نسبی سه طبقه اول سازه و همچنین منحنی‌های هیستریسیس این طبقات در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده با SATMD مقایسه شده‌اند. قابل توجه است که عملکرد مکانیزم SATMD به پارامترهایی نظیر مشخصات TMD  $(m_d, k_d)$  و همچنین مقادیر ماکزیمم و مینیمم میرایی  $(C_{min}, C_{max})$  بستگی دارد و نتایج فوق برای پارامترهای در نظر گرفته شده ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهند SATMD با پارامترهای بهینه طراحی شده با روش پیشنهادی در کاهش تغییر مکان‌های جانبی نسبی سازه عملکرد خوبی داشته است. به طوریکه ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه نسبت به حالت کنترل نشده ۴۸ درصد کاهش داشته است. علاوه بر این با دقت در منحنی‌های هیستریسیس ۳ طبقه اول در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده با SATMD، (شکل (۷))، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که استفاده از مکانیزم SATMD باعث کاهش حلقه‌های هیستریسیس سازه و در نتیجه کاهش انرژی انباشته شده در سازه شده است که به کاهش خرابی سازه کمک می‌کند [۱۷ و ۱۳]. همچنین می‌توان گفت که برخلاف اینکه در طراحی SATMD کاهش ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی مد نظر بوده است ولی ماکزیمم شتاب سازه در حدود ۲۳ درصد و ماکزیمم نیروی برشی نیز ۸/۵ درصد کاهش یافته است. گفتنی است می‌توان هدف مساله بهینه



شکل (۱۱): مقایسه ماکزیمم نیروی برشی طبقات مختلف سازه کنترل نشده و کنترل شده در حالت‌های مختلف تحت اثر رکورد  $W(t)$  بر حسب  $kN$

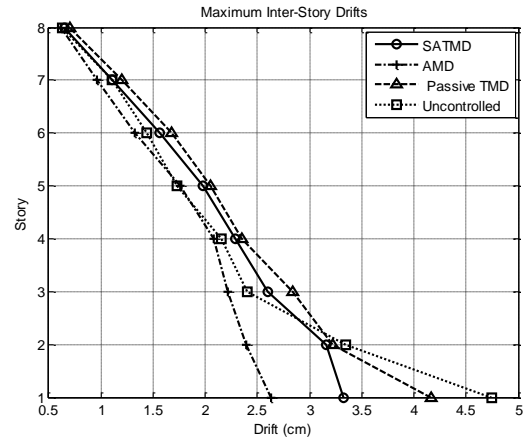
طراحی سیستم کنترل نیمه فعال بار دیگر با در نظر گرفتن پارامترهای جدید TMD و انتخاب ماتریس‌های  $R$  و  $Q_1, Q_2, Q_3$  مشابه قسمت قبل صورت گرفته و با حل مسأله بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پارامترهای سیستم کنترل SATMD مطابق جدول (۲) انتخاب شده است که در شکل‌های (۸) تا (۱۱) مقادیر ماکزیمم پاسخ‌های سازه کنترل شده با SATMD برای طبقات مختلف تحت اثر اغتشاش سفید  $W(t)$  نشان داده شده است. نتایج بدست آمده عملکرد مناسب مکانیزم SATMD با پارامترهای بهینه طراحی شده با روش پیشنهادی را در کاهش پاسخ‌های سازه غیرخطی نشان می دهد، به طوریکه ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی به حالت کنترل نشده ۳۰ درصد و نسبت به حالت TMD غیر فعال تا ۲۲ درصد و ماکزیمم شتاب سازه نیز در حدود ۱۰ درصد کاهش داشته است.

جدول (۲): پارامترهای بهینه سیستم کنترل SATMD برای

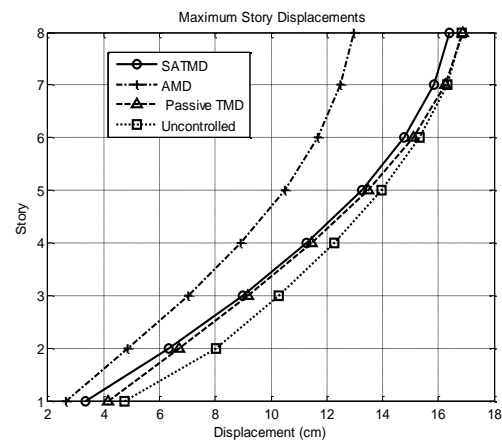
ارتعاش  $W(t)$

$q_1 = 264302861450584$	$q_{1m} =$	$16/7501400756328$
$98845/q_2 = 5137431146$	$q_{2m} =$	$256584/484168402$
$746501866/q_3 = 334811$	$q_{3m} =$	$0585740534/27285$
$c_{max} = 246124750$		
N.sec/m	$0605 / c_{min} =$	$2575$
		N.sec/m

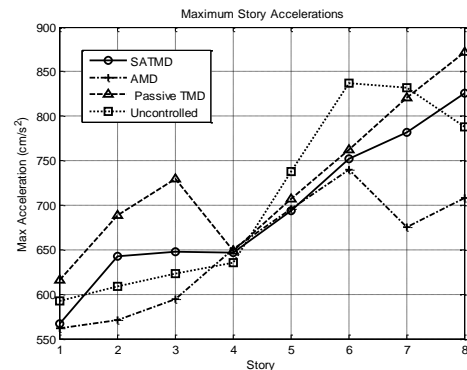
پاسخ‌های سازه زیاد موفق نبوده است به طوری که ماکزیمم تغییر مکان های جانبی نسبی سازه در این حالت ۱۰ درصد کاهش داشته در حالی که ماکزیمم تغییر مکان جانبی کل سازه تقریباً تغییر نکرده است.



شکل (۸): مقایسه ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی طبقات مختلف برای سازه کنترل نشده و کنترل شده در حالات مختلف در ثبت ارتعاش  $W(t)$ .

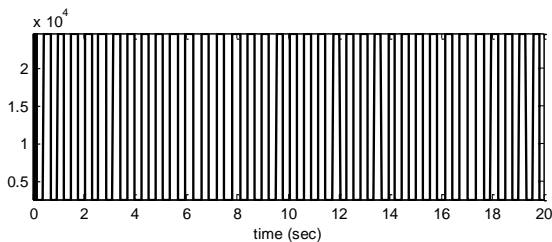


شکل (۹): مقایسه ماکزیمم تغییر مکان جانبی کل طبقات مختلف برای سازه کنترل نشده و کنترل شده در حالات مختلف با اعمال رکورد ارتعاش  $W(t)$ .



شکل (۱۰): مقایسه ماکزیمم شتاب طبقات مختلف سازه کنترل نشده و کنترل شده در حالت‌های مختلف تحت اثر رکورد  $W(t)$  بر حسب  $cm/s^2$

نتایج نشان می‌دهند که با نیمه فعال کردن مکانیزم غیرفعال TMD کارایی آن در سازه‌های غیر خطی بهتر می‌شود. برای مثال در صورتی که از TMD غیر فعال با ضریب میرایی ثابت  $c_d = c_{max}$  استفاده شود کاهش زیادی در پاسخ‌ها اتفاق نمی‌افتد (۱۴ درصد) اما مشخصه قابل تغییر بودن SATMD باعث می‌شود تا پاسخ‌ها تا ۳۰ درصد کاهش یابند. بدین ترتیب می‌توان گفت که در سازه‌های غیرخطی که امکان دارد TMD غیر فعال بواسطه نامیزان شدن، عملکرد خوبی نداشته باشد مکانیزم SATMD می‌تواند جایگزین مناسبی برای آن باشد.



شکل (۱۳): منحنی تغییرات ضریب میرایی در هر لحظه

#### ۶-۲-۲- مقایسه عملکرد SATMD با AMD

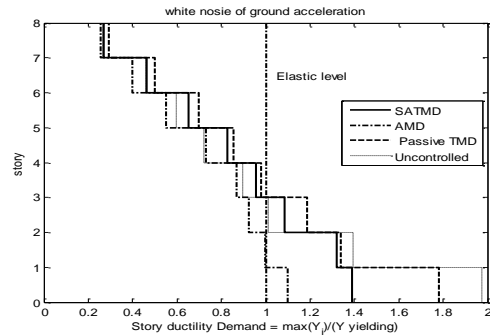
در این قسمت از نظر مقایسه بین عملکرد سیستم کنترل میراگر جرمی فعال و مکانیزم کنترل نیمه‌فعال SATMD در کاهش پاسخ سازه‌های غیرخطی، به طراحی مکانیزم پرداخته شده است. در طراحی سیستم کنترل فعال، برخی مسائل عملی مانند محدودیت در مقدار ماکزیمم نیروی کنترل و تغییر مکان جانبی AMD، در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال با در نظر گرفتن ماکزیمم نیروی کنترل  $u_{max} = 250 \text{ kN}$  و ماکزیمم تغییر مکان جانبی AMD برابر با ۱۵۰ سانتی متر، طراحی سیستم کنترل فعال با استفاده از الگوریتم کنترل بهینه ی آنی و روش عددی نیومارک، انجام شده است.

برای طراحی مکانیزم AMD بهینه، ماتریس‌های وزنی R و  $Q_1, Q_2, Q_3$  مشابه سیستم SATMD بر اساس معادلات (۲۰) و (۲۱a) تا (۲۱c) در نظر گرفته شده است. برای پارامترهای TMD در نظر گرفته شده برای SATMD، پس از حل مساله بهینه‌سازی جواب‌های نهایی زیر بدست آمده است:

$$Y_{max} = 2/63 \text{ cm}, \quad u_{max} = 245 \text{ kN}$$

در شکل‌های (۸) تا (۱۱) ماکزیمم پاسخ‌های سازه کنترل شده با AMD نیز آورده شده است. شکل (۱۴): تاریخچه زمانی نیروی کنترل مورد نیاز سیستم AMD را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که مکانیزم AMD با ظرفیت محرک  $u_{max} = 250 \text{ kN}$  در کاهش پاسخ‌های



شکل (۱۲): مقایسه منحنی ضریب شکل پذیری کل طبقات برای سازه کنترل نشده و کنترل شده در حالات مختلف تحت رکورد ارتعاش  $W(t)$ .

#### ۶-۲-۱- مقایسه عملکرد SATMD با TMD

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۸) تا (۱۱) ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه در حالت استفاده از SATMD به جای TMD، ۲۲ درصد کاهش یافته است که این نشانگر عملکرد بهتر SATMD در سازه‌های غیرخطی است همچنین ماکزیمم شتاب طبقات نیز در حالت استفاده از SATMD کمتر از حالت TMD بوده است. با توجه به مشخصات ثابت TMDهای غیر فعال، استفاده از SATMD به دلیل مشخصات تغییر پذیر این سیستم می‌تواند دامنه فرکانسی بیشتری را پوشش دهد. در شکل (۱۳) مقادیر متغیر ضریب میرایی در هر لحظه نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر، ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه با استفاده از SATMD و TMD با مقادیر مختلف برای میرایی، تحت اثر ثبت  $W(t)$  بررسی شده و درصد کاهش پاسخ‌ها در هر حالت در جدول (۳) گزارش شده است.

جدول (۴): مقایسه ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه با استفاده از SATMD و TMD در حالت‌های مختلف تحت اثر رکورد

$W(t)$  بر حسب cm

	ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه	درصد کاهش پاسخ نسبت به حالت کنترل نشده (%)
سازه کنترل نشده	۴/۷۵	-
$TMD (c_d = 14.4 \text{ kN} \cdot \text{sec} / \text{m})$	۴/۲۷	۱۰
$TMD (c_d = c_{min})$	۴/۳۶	۸
$TMD (c_d = c_{max})$	۴/۱۶	۱۴
SATMD	۳/۳۳	۳۰

## ۷- بررسی عملکرد SATMD طراحی شده تحت زلزله های آزمایشی

در قسمت قبل سیستم کنترل SATMD بر اساس ارتعاش خارجی اغتشاش سفید  $W(t)$  طراحی شد در ادامه مطالعات عددی انجام شده در این مقاله، به منظور بررسی عملکرد مکانیزم SATMD تحت اثر زلزله های دیگر که به لحاظ مشخصات متفاوت از زلزله طرح هستند در این قسمت سازه کنترل شده با SATMD تحت اثر زلزله های دیگر که دارای حداکثر شتاب زمین مختلف مطابق جدول (۵) می باشند قرار گرفته و ماکزیمم پاسخ سازه برای حالت کنترل نشده و کنترل شده با SATMD غیرفعال در جدول (۵) گزارش شده است. نتایج نشان می دهند که عملکرد سیستم کنترلی در سازه های غیرخطی به مشخصات رکورد زلزله بستگی دارد با این حال سیستم SATMD نسبت به حالت TMD در کاهش پاسخها موفق تر است. بنابراین برای عملکرد بهینه سیستم کنترل در هر منطقه باید پارامترهای آن با توجه به مشخصات زلزله طرح آن منطقه به صورت بهینه انتخاب شود.

جدول (۵): ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه تحت اثر

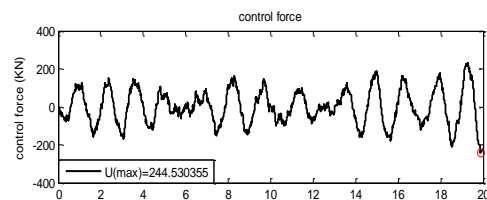
رکورد زلزله های دیگر بر حسب cm

رکورد زلزله	PG A	کنترل نشده	T MD	SAT MD
Northridge	۱/۲۷g	۸/۲	۸/۴	۷/۵۷
EL Centro	g ۰/۳۴	۴/۳۵	۱/۱ ۴	۴/۰۱
Tabas	g ۰/۸۸	۷/۵۲	۱/۴۷ ۷	۷/۱۰

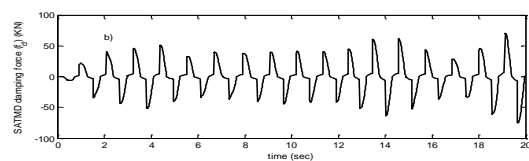
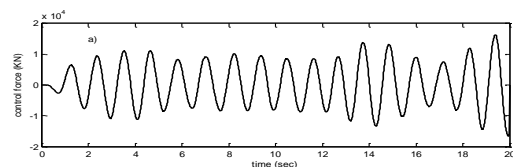
## ۸- نتیجه گیری

در این پژوهش با هدف بررسی کارایی سیستم های کنترل نیمه فعال سازه ها در کاهش پاسخ سازه های با رفتار غیرخطی تحت اثر ارتعاش زلزله، عملکرد مکانیزم میراگر جرمی هماهنگ شده نیمه فعال بر روی سازه های غیرخطی برشی با رفتار دو خطی و هیستریسیس مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور قاب برشی ۸ طبقه تحت اثر ارتعاش اغتشاش سفید قرار گرفته و با انتخاب مقادیر مشخصی برای پارامترهای میراگر جرمی (جرم، سختی و میرایی) به طراحی سیستم کنترل نیمه فعال پرداخته شده است. مکانیزم میراگر جرمی هماهنگ شده نیمه فعال از طریق جایگزین کردن میراگر غیر فعال سیستم

سازه عملکرد قابل توجهی داشته است و استفاده از AMD، ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی، تغییر مکان جانبی و ماکزیمم نیروی برشی طبقات را به ترتیب به مقدار ۴۵٪، ۲۳٪، ۸٪ کاهش داده است در حالی که درصد های کاهش برای SATMD به ترتیب ۳۰٪، ۵٪ و ۶٪ بوده است. بدیهی است که عملکرد مکانیزم AMD وابسته به ظرفیت محرک و پارامترهای TMD خواهد بود که نتایج بر اساس مقادیر فرضی فوق گزارش شده است. به عنوان مثال با کاهش ظرفیت محرک ( $u_{max}$ ) کارایی AMD کاهش می یابد. همچنین مکانیزم AMD به علت نیاز به منابع تامین انرژی زیاد و تکنولوژی پیچیده آن معمولاً دچار محدودیت است. بنابراین می توان گفت که اگرچه SATMD نتوانسته پاسخ ها را به خوبی AMD کاهش دهد اما به علت نیاز به انرژی کم برای راه اندازی، همچنان می تواند به عنوان گزینه مناسبی برای کاهش پاسخ سازه های غیرخطی مورد توجه قرار گیرد.



شکل (۱۴): تاریخچه زمانی نیروی کنترل اعمال شده توسط AMD شکل (۱۵) نیروی کنترل بدست آمده از الگوریتم کنترل فعال (معادله ۱۵) در گام اول طراحی SATMD و نیروی میرایی تولید شده توسط میراگر در گام دوم (معادله ۶) با اعمال قانون کنترل برشی را نشان می دهد. همانطوریکه معادله (۱۸) نشان می دهد نیروی میرایی تولید شده توسط میراگر بستگی به مقدار  $C_{min}$ ,  $C_{max}$  دارد که در مطالعه حاضر مقدار نیروی میرایی SATMD کمتر از مقدار نیروی کنترل فعال می باشد.



شکل (۱۵): تاریخچه زمانی نیروی کنترل اعمال شده توسط SATMD (a) نیروی کنترل فعال ایده آل (گام اول الگوریتم) (b) نیروی میرایی میراگر جرمی نیمه فعال

میراگر جرمی هماهنگ شده غیر فعال نشان می دهد که استفاده از میراگر جرمی هماهنگ شده نیمه فعال به دلیل مشخصات تغییر پذیر این سیستم می تواند دامنه فرکانسی بیشتری را پوشش دهد. بدین ترتیب در سازه های غیرخطی که امکان دارد میراگر جرمی هماهنگ شده غیر فعال به دلیل نامیزان شدن عملکرد خوبی نداشته باشد مکانیزم میراگر جرمی نیمه فعال می تواند جایگزین مناسبی برای آن باشد.

۴- مکانیزم میراگر جرمی فعال در کاهش پاسخ های سازه عملکرد موثرتری داشته است. اما این مکانیزم به علت نیاز به منابع تامین انرژی زیاد و تکنولوژی پیچیده آن معمولاً محدودیت استفاده دارد. بنابراین اگرچه میراگر جرمی هماهنگ شده نیمه فعال نتوانسته پاسخ ها را به خوبی میراگر جرمی فعال کاهش دهد اما به علت نیاز به انرژی کم برای راه اندازی همچنان می تواند مورد توجه قرار گیرد.

۵- در حالیکه عملکرد سیستم کنترلی در سازه های غیر خطی به مشخصات ثبت زلزله وابسته است، با این حال سیستم SATMD نسبت به حالت TMD تحت اثر زلزله های آزمایش در کاهش پاسخ ها موفق تر می باشد. بنابراین برای عملکرد بهینه سیستم کنترل باید پارامترهای آن با توجه به مشخصات زلزله طرح هر منطقه به صورت بهینه انتخاب شود.

TMD با یک میراگر با مشخصات قابل تنظیم (اریفیس متغیر) ایجاد شده است. برای تعیین مقادیر ضریب میرایی در هر لحظه، الگوریتم کنترل نیمه فعال براساس قانون کنترل بهینه برشی و الگوریتم کنترل بهینه ی آنی با استفاده از روش عددی نیومارک برای کاربرد در سازه های غیر خطی توسعه داده شده است که تابع عملکرد استفاده شده در الگوریتم شامل پسخور کامل پاسخ سازه (تغییر مکان، سرعت و شتاب) است.

همچنین به منظور ارزیابی بهتر کارایی مکانیزم میراگر جرمی هماهنگ شده نیمه فعال برای بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های غیر خطی، عملکرد مکانیزم های میراگر جرمی هماهنگ شده غیر فعال و فعال نیز بررسی شده و نتایج با هم مقایسه شده اند بر اساس تحلیل های عددی انجام شده می توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- الگوریتم کنترل بهینه ی آنی با استفاده از روش عددی نیومارک می تواند با استفاده از مفهوم کنترل بهینه برشی برای سیستمهای کنترل نیمه فعال بسط داده شده و برای طراحی مکانیزم های نیمه فعال در سازه های غیر خطی به کار گرفته شود.

۲- برای عملکرد مناسب مکانیزم میراگر جرمی نیمه فعال باید حد پایین و بالای میرایی میراگر با میرایی متغیر به طور مناسب انتخاب شود.

۳- مقایسه عملکرد میراگر جرمی هماهنگ شده نیمه فعال با

## ۹- مراجع

- [۱] Zuk, W.M.; "Kinetic structures", ASCE, J. Civil. Eng., 38(7), pp. 62- 64, 1968.
- [۲] Yao, J.T.P.; "Concept of structural control", J. Struct. Division, ASCE, 98, ST 7, pp. 1567-1574, 1972.
- [۳] Soong, T.T.; "Active Structural Control: Theory and Practice", 1st edn., Longman Scientific & Technical, UK and John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [۴] Symans, M.D. and Constantinou, M.C.; "Development and experimental study of semi-active fluid damping devices for seismic protection of structures", Nat. Center for Earthquake Engrg. Res., Tech. Report NCEER-95- 0011, 1995.
- [۵] Sadek, F. and Mohraz, B.; "Semi-active control algorithms for structures with variable dampers", J. Engrg. Mech. ASCE, 124 (9), pp. 981- 990, 1998.
- [۶] Jansen, L.M. and Dyke, S.J.; "Semi-active control strategies for the MR damper: A comparative study", J. Engrg. Mech. ASCE, 126(8), pp. 795- 803, 2000.
- [۷] Connor, J.J., "An Introduction to structural motion control", IT University Press, 2001.
- [۸] McNamara, R. J.; "Tuned mass dampers for buildings", ASCE J. Struct. Division, 103(9), pp. 1785- 1798, 1977.
- [۹] Soong, T.T. and Dargush, G.F.; "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley and Sons, New York, 1997.

- Abe, M.; "Semi-active tuned mass dampers for seismic protection of civil structures", *Earthquake Eng. & Struct. Dyn.*, 25(7), pp. 743- 749, 1996. [۲۳]
- Runlin, Y. , Xiyuan, Z. and Xihui, Z.; "Seismic structural control using semi-active tuned mass dampers", *Earthquake Eng & Eng Vib.*, 1(1), pp. 111– 118, 2002. [۲۴]
- Aldemir, U.; "Optimal control of structures with semi-active-tuned mass dampers", *J. Sound Vibrat.*, 266(4), pp. 847- 874, 2003. [۲۵]
- Setareh, M.; "Application of semi-active tuned mass dampers to base-excited systems", *Earthquake Eng. & Struct Dyn.*, 30(3), pp. 449– 462, 2001. [۲۶]
- Lin, P.Y., Chung, L.L. and Loh, C.H.; "Semi-active control of building structures with semi-active tuned mass damper", *Computer-aided Civil and Infrastruct. Eng.*, 20(1), pp. 35– 51, 2005. [۲۷]
- Dyke, S. J., Spencer, B. F., Sain, M. K. and Carlson, J.D.; "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", *Smart Materials and Struct.*, 5, pp. 565– 575, 1996. [۲۸]
- Ji, H., Moon, Y., Kim, C. and Lee, I.; "Structural vibration control using semi-active tuned mass damper", *Proc Eighteenth KKCNN Symposium on Civil Engineering-KAIST6 December 18– 20, Taiwan, 2005.* [۲۹]
- Chang, C. C. and Yang, H. T. Y; "Instantaneous optimal control of building frames", *J. Struct. Eng., ASCE*, 120(4), pp. 1307- 1326, 1994. [۳۰]
- Joghataie, A. and Mohebbi, M.; "Optimal control of nonlinear frames by Newmark and distributed genetic algorithms", *Struct. Design Tall Spec. Build*, 21 (2): pp. 77- 95., 2012. [۳۱]
- Jalili .N; "A Comparative study and analysis of semi-Active vibration control systems", *J. Vib. Acoust.*, 124(4), pp. 593– 605, 2002. [۳۲]
- Jansen, L.M. and Dyke, S.J.; "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study", *J. Engrg. Mech., ASCE*, 126(8), pp. 795- 803, 2000. [۳۳]
- Koo, J.H, Setareh, M. and Murray, T.M; "In search of a suitable control methods for semi-active tuned vibration absorbers", *J. Vibrat. and Contr.*, (10), pp. 163- 174, 2004. [۳۴]
- Liu, Y., Waters, T.P. and Brennan, M.J.; "A comparison of semi-active damping control strategies vibration isolation of harmonic disturbances", *J. Sound Vibrat.*, 280(1–2), pp. [۳۵]
- Den Hartog J.P; "Mechanical Vibrations", 4th edn, McGraw- Hill, New York, 1956. [۱۰]
- Warburton G.B.; "Optimal absorber parameters for various combination of response and excitation parameters", *Earthquake Eng. & Struct. Dyn.*, pp. 197- 217, 1982. [۱۱]
- Sadek F. and Mohraz, B.; "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic application", *Earthquake Eng. & Struct. Dyn.*, 26, pp. 617- 635, 1997. [۱۲]
- Pinkaew, T. and Fujino, Y.; "Effectiveness of semi-active tuned mass dampers under harmonic excitation", *Engrg. Struct.* 23, pp. 850- 856., 2001. [۱۳]
- Kaynia N.M., Veneziano D. and Biggs J.M ; "Seismic effectiveness of tuned mass dampers", *J. Struct. Division, ASCE*, 107(8), pp. 1465- 84, 1981. [۱۴]
- Sladek, J.R. and Klinger, R.E.; "Effect of tuned-mass dampers on seismic response", *J. Struct. Eng., ASCE*, 109(9), pp. 2004- 2009, 1983. [۱۵]
- Soto-Brito, R. and Ruiz S.E.; "Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers", *Earthquake Eng. & Struct. Dyn.*, 28, pp. 1255- 1271, 1999. [۱۶]
- Lukkunaprasit, P. and Wanitkorkul, A.; "Inelastic buildings with tuned mass dampers under moderate ground motions from distant earthquakes", *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, 30, pp. 537- 51, 2001. [۱۷]
- Mohebbi, M. and Joghataie, A.; "Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms", *Struct. Design Tall Spec. Build.*, 21(1), pp. 57- 76, 2012. [۱۸]
- Chang, C. C. and Yang, H. T. Y. ;"Control of buildings using active tuned mass dampers", *J. Engrg. Mech., ASCE*, 121(3), pp. 355- 366, 1995. [۱۹]
- Reinhorn, A., Soong, T. T., Riley, M. A., Lin, R. C., Aizawa, S. and Higashino, M.; "Full scale implementation of active control. ii: Installation and performance", *J. Struct. Eng., ASCE*, 119(6), pp. 1935– 1960, 1993. [۲۰]
- Spencer, B.F. and Nagarajaiah, S.; "State of the art of structural control", *J. Struct. Eng., ASCE*, 129(7), pp. 845- 856, 2003 [۲۱]
- Hrovat, D., Barak, P. and Rabins, M.; "Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control", *J. Engrg. Mech., ASCE*, pp. 109- 691, 1983. [۲۲]

structures controlling the damping”, Proc.,  
12th European Conf. on Earthquake.  
Engineering, paper reference, 178, 2002.

Bathe KJ.; “Finite element Procedures”, [۴۰]  
Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1996.

Goldberg, D.E., “Genetic algorithms in [۴۱]  
search, optimization and machine Learning”,  
Addison- Wesley Publishing Co., Inc.  
Reading, Mass, 1989.

21– 39, 2005.

Symans, M.D. and Constantinou, M.C.; [۳۶]  
“Semi-active control systems for seismic  
protection of structures: A state-of-the-art  
review”, J. Engrg. Struct., 21(6), pp. 469–  
487, 1999.

Kurata, N., Kobori, T., Takahashi, M., Niwa, [۳۷]  
N., and Midorikawa, H.; “Actual seismic  
response controlled building with semi-active  
damper system”, Earthquake Eng. & Struc.  
Dyn., 28, pp. 1427– 1447, 1999.

Symans, M. and Constantinou, M. C.; [۳۸]  
“Seismic testing of a building structure with a  
semi-active fluid damper control system”,  
Earthquake Eng. & Struc. Dyn., 26(7), pp.  
759– 777, 1999.

Christopoulos, C., Rotunno, M. D. and [۳۹]  
Callafon, R. A.; “Semi-active tuned mass  
dampers for seismic protection of MDOF

#### ۱۰- زیرنویس ها

- <sup>\</sup>Tuned Mass Damper(TMD)
- <sup>∨</sup> Active Mass Damper(AMD)
- <sup>∧</sup> Semi- Active
- TunedMassDamper(SATMD)
- <sup>‡</sup> Clipped Optimal Control
- <sup>∂</sup> Genetic Algorithm(GA)
- <sup>∫</sup> Full Feedback
- <sup>∇</sup> Drift
- <sup>^</sup> Peak Ground Acceleration(PGA)
- <sup>∧</sup> MATLAB