



# کنترل نیمه فعال سازه یک درجه آزادی با استفاده از میراگر مایع با پره قابل تنظیم

سید مهدی زهرایی<sup>۱</sup>، حامد عنایتی<sup>۲\*</sup>

۱- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، دانشکده عمران، تهران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵، hamed.enayati@mazust.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۴)

## چکیده

روش‌های کنترل سازه به دنبال کاهش پاسخ سازه و ارتقای رفتار دینامیکی سازه تحت اثر بارهای جانبی مثل باد و زلزله می‌باشد. روش‌های کنترلی را می‌توان به سه دسته کلی غیر فعال، فعال و نیمه فعال تقسیم نمود. کنترل نیمه فعال علاوه بر قابلیت سازگاری کنترل فعال، قابلیت اطمینان کنترل غیر فعال را دارا می‌باشد. در کنترل نیمه فعال به یک منبع انرژی کوچک خارجی نیاز است که این امر در زلزله‌ها به علت احتمال قطع شدن برق امکان استفاده از آن را فراهم می‌نماید. میراگر مایع علاوه بر هزینه نصب و راه اندازی کم دارای هزینه نگهداری پایینی نیز می‌باشد. از دیگر ویژگی‌های این میراگر می‌توان به قابلیت استفاده دومانظوره به عنوان مخزن ذخیره آب اشاره نمود. میراگر مورد استفاده دارای ۴ پره در دو ردیف بوده که امکان چرخش آن در حین تحریک فراهم می‌باشد. برای طراحی الگوریتم کنترلی از روش کنترل بهینه خطی استفاده شده و تاخیر زمانی نیز در الگوریتم کنترلی لحاظ گردیده است. در این مطالعه از ۴ رکورد زلزله حوزه نزدیک و ۴ رکورد حوزه دور استفاده شده تا بتوان اثر چرخش پره‌ها را بررسی نمود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که میراگر مایع با پره قابل تنظیم در کنترل نیمه فعال باعث بهبود پاسخ سازه در مقایسه با نتایج کنترل غیر فعال می‌گردد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که این میراگر در تحریک‌های حوزه نزدیک باعث کاهش بیشتر پاسخ‌ها نسبت به تحریک‌های حوزه دور می‌گردد.

## واژگان کلیدی

کنترل نیمه فعال، کنترل غیر فعال، میراگر مایع با پره قابل تنظیم، الگوریتم کنترل بهینه خطی، تاخیر زمانی

## Semi-Active Control of a SDOF Structure Using Tuned Liquid Damper with Variable Baffles

S.M. Zahrai, H. Enayati

### Abstract

Structural control methods are aimed to decrease structural responses and improve the dynamic behavior against lateral loads such as wind or earthquake. These methods are classified to three main category of passive, semi active and active. Semi active control possesses both adjustability of active control and reliability of passive control. Semi active control needs a small power source such that lack of electricity during earthquakes cannot disturb its function. In this study a tuned liquid damper (TLD) with baffles is used. TLD is a damper with low installation and maintenance costs and can simultaneously be utilized as a water tank. The used TLD has 4 baffles in two rows that can rotate during excitation. The semi active control algorithm is implemented using the optimal linear control method with time delay compensation. Four far fields and four near field earthquake record are used to study effects of baffles' rotation. Results show that semi active TLD improves structural behavior more than passive one. Also, the performance of semi active TLD under near field earthquakes are better than that under far field earthquakes.

### Keywords

Semi active control, Passive control, Variable baffles tuned liquid damper, Instantaneous optimal control, Time delay



زمانی که سازه‌های عمرانی در برابر بارهای دینامیکی مانند زلزله یا باد قرار می‌گیرند دچار ارتعاش می‌شوند. علاوه بر تخریب سازه‌ها در برابر این عوامل محیطی، ارتعاش اتلاف اموال و تهدید جانی را نیز به دنبال دارد. سیستم‌های کنترلی بر اساس نیاز به انرژی خارجی را می‌توان در چهار دسته به کنترل غیر فعال<sup>۱</sup>، فعال<sup>۲</sup>، ترکیبی و نیمه فعال<sup>۳</sup> تقسیم نمود. برخلاف سیستم کنترل فعال که در آن پاسخ دینامیکی سازه بوسیله اعمال یک انرژی خارجی به سازه کاهش پیدا می‌کند، در کنترل غیر فعال منبع انرژی خارجی مورد نیاز نیست و مکانیزم‌های کنترلی به همراه سازه اصلی حرکت می‌کنند و نیروهای کنترلی در خلال حرکت ابزار کنترل به وجود می‌آیند. کنترل ترکیبی که عموماً ترکیبی از کنترل‌های غیر فعال و فعال می‌باشد به انرژی خارجی کمتری نیاز دارد زیرا قسمتی از کنترل سازه‌ای، کنترل غیر فعال، به منبع انرژی خارجی نیازی ندارد. اما بین این دو کنترل می‌توان به کنترل نیمه فعال که در واقع ترکیبی از نکات مثبت هر دو سیستم می‌باشد اشاره کرد.

سیستم کنترل نیمه فعال از مکانیزم تغییر خواص میرایی یا سختی یک سیستم کنترل سازه استفاده می‌کند تا پاسخ سازه را کاهش دهد. این سیستم‌ها بر خلاف سیستم‌های فعال به منبع انرژی به مراتب کوچک‌تری نسبت به سیستم‌های فعال نیاز دارند بطوری‌که این سیستم‌ها قادرند توسط منابع تامین شده توسط باتری تغذیه شوند که این امر به دلیل احتمال قطعی برق در هنگام زلزله بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به عبارتی دیگر می‌توان یک سیستم کنترل نیمه فعال را سیستم کنترلی غیر فعال دانست که خواص مکانیکی آن براساس باز خورد تحریک یا پاسخ اندازه گیری شده بر اساس یک الگوریتم از پیش تعیین شده قابل تنظیم است. از آنجا که در سیستم کنترل نیمه فعال انرژی مکانیکی به سیستم سازه‌ای اعمال نمی‌شود لذا پایداری سیستم تهدید نمی‌گردد که این یکی دیگر از ویژگی‌های سیستم‌های کنترل نیمه فعال می‌باشد.

در میراگر مایع تنظیم شده که یک میراگر مکانیکی غیرفعال است، بر حسب عمق سیال درون مخزن دو دسته بندی کلی داریم: عمیق و کم عمق، که مرز بین این دو حالت نسبت عمق سیال به طول مخزن ۰/۱۵ می‌باشد [۱]. Fujino و همکارانش مطالعات گسترده‌ای بروی پارامترهای مختلف میراگر مایع انجام دادند [۲]. آنها در تحقیق دیگری اثر زبری کف میراگرهای مایع را بروی رفتار سیستم میراگر و پاسخ سازه مورد ارزیابی قرار

دادند [۳]. Jao و Fujino به منظور بررسی میزان استهلاک انرژی در میراگرهای مایع از صفحاتی در داخل مخزن استفاده و اثر این صفحات بر رفتار میراگر را بررسی نمودند [۴]. Lou و همکارانش با قرار دادن یک پره در داخل میراگر که امکان تغییر موقعیت آن فراهم بوده است یک سیستم تقریباً نیمه فعال را برای میراگرهای مایع پیشنهاد کردند. در این میراگر پیشنهادی با تغییر موقعیت پره طول موثر میراگر نیز تغییر می‌یافت [۵].

در سال‌های اخیر میراگرهای مایع با قابلیت سازگاری و تغییر مورد توجه محققین قرار گرفته است. Tait و همکارانش از صفحات مشبکی در داخل میراگر استفاده نموده اند تا با این ایده بتوان استهلاک انرژی در این نوع میراگرها را افزایش داد [۶]. Love و Tait تاثیر موقعیت این صفحات در داخل میراگر را بروی رفتار سیستم مورد ارزیابی قرار دادند [۷]. این دو یک مدل غیر خطی برای شبیه سازی تلاطم سیال در میراگر با هندسه متفاوت ارائه نمودند در این مطالعه آنها کف مخزن را صاف و هموار در نظر گرفته‌اند [۸]. Crowley و Porter در مطالعه خود از صفحات باریک قائم در داخل میراگر به منظور ایجاد میرایی در زمانی که سیال دارای حرکت است استفاده نموده‌اند. آنها آرایش متفاوت این صفحات داخل مخزن را مورد ارزیابی قرار دادند و تلاش نمودند تا رفتار میراگر را با توجه به کاهش جابجایی کلی تحت تاثیر نیرو با فرکانس‌های مختلف بهینه نمایند. بدین منظور تعداد، مکان و تداخل صفحات در داخل مخزن تغییر داده شد [۹].

Zahrai و همکارانش از پره‌های قابل تنظیم در داخل میراگر استفاده نموده‌اند. آنها کارایی استفاده از پره در میراگرهای مایع مستطیلی را ارزیابی نمودند و در حین تست‌های خود اثر نسبت جرم، نسبت فرکانس زاویه جهت گیری پره‌ها و نسبت عمق را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که استفاده از پره‌ها باعث کاهش پاسخ سازه و افزایش میرایی سازه مجهز به این نوع میراگرها می‌گردد [۱۰]. Sonmez و همکارانش یک مدل کنترل نیمه فعال برای میراگر مایع ستونی ارائه نموده‌اند و با مقایسه جذر مجموع مربعات پاسخ نشان دادند که کنترل نیمه فعال کارایی بالاتری دارد. برای مقایسه نتایج، ۳ حالت در نظر گرفته شد، سازه بدون میراگر، سازه با کنترل غیر فعال و کنترل نیمه فعال. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که کنترل غیر فعال به علت از دست دادن کارایی خود به محض تغییر نیروی تحریک نسبت به کنترل نیمه فعال که قابلیت سازگاری دارد، کارایی کمتری خواهد داشت [۱۱].



Soliman و همکارانش بروی کنترل نیمه فعال میراگر مایع مجهز به صفحاتی جهت افزایش میرایی میراگر مایع مطالعه نمودند. آنها با استفاده از پره‌ها رفتار میراگر را ارتقا داده و امکان استفاده از آن در کنترل نیمه فعال را فراهم نمودند. Soliman و همکارانش با استفاده از یک الگوریتم کنترلی مناسب و ارزیابی پاسخ سازه یک طبقه مجهز به این میراگر ضریب میرایی بهینه ( $\xi_{opt}$ ) را برای میراگر تعیین نمودند [۱۲].

روش‌های کنترل نیمه فعال مختلفی مورد استفاده محققین قرار گرفته است که همواره کاهش همزمان جابجایی و شتاب در آنها از دغدغه مهندسين می‌باشد. Chase و همکارانش با ارائه الگوریتم جدید این دغدغه را حل نمودند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که روش آنها هم در زلزله حوزه نزدیک و هم در زلزله حوزه دور کارایی مناسبی دارد [۱۳]. Chey و همکارانش از ابزارهای قابل تنظیم برای کاهش پاسخ سازه در کنترل نیمه فعال استفاده کردند. در این مطالعه ضرایب قابل تنظیم به نحوی تعیین می‌شود که نقطه سرعت صفر بروی قله جابجایی قرار گیرد [۱۴]. روش‌های کنترل نیمه فعال همواره جذابیت خاصی برای محققین دارد. Yalla و همکارانش میراگر مایع ستونی را به صورت غیر فعال و نیمه فعال با استفاده از روش کنترل فازی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که انرژی لازم در کنترل نیمه فعال شیرها با یک باطری تامین می‌گردد که بسیار اندک می‌باشد و در نتیجه کنترل نیمه فعال کاهش قابل قبولی در پاسخ‌ها مشاهده می‌گردد [۱۵]. Sun و Nagarajaiah میراگر جرمی با سختی و میرایی متغیر را تحت تحریک زلزله مورد بررسی قرار دادند. ضریب میرایی این میراگر با توجه به پاسخ جابجایی میراگر تعیین می‌گردد در حالی که ضریب سختی میراگر با توجه به جابجایی سازه تعیین می‌گردد. در این مطالعه هم حوزه نزدیک و هم حوزه دور برای ارزیابی کارایی میراگر و الگوریتم کنترل مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که این میراگر باعث کاهش پاسخ سازه و بهبود رفتار دینامیکی سازه می‌گردد [۱۶].

همانطور که بیان شد روش کنترل نیمه فعال یکی از روش‌های مورد علاقه محققین می‌باشد به دلیل نیاز به منبع انرژی کم و قابلیت تطابق پذیری با شرایط می‌باشد. از طرفی دیگر بهبود رفتار سازه‌ها و کاهش پاسخ‌ها در حین تحریک زلزله همواره یکی از اهداف مهندسين می‌باشد. روش‌های کنترل نیمه فعال با تغییر اندک در ویژگی‌های سازه از جمله میرایی سازه به دنبال بهبود رفتار دینامیکی سازه می‌باشد. در این تحقیق از میراگر مایع با پره قابل تنظیم پیشنهادی

توسط Zahrai و همکارانش استفاده شده است. این میراگر یک مخزن مستطیلی ساده با چند پره قابل تنظیم است که تا حدی از آب پر گردیده است. دلیل استفاده از این میراگر در این تحقیق هزینه پایین نصب و نگهداری و امکان استفاده دو منظوره از آن می‌باشد. در این میراگرها با قرار دادن یک موتور می‌توان امکان چرخش پره‌ها را فراهم نمود.

برای استفاده از این میراگر در کنترل نیمه فعال چرخش پره‌ها مدنظر قرار گرفت. به بیانی دیگر در این مطالعه با چرخش پره‌ها به دنبال بهبود رفتار میراگر و افزایش میزان استهلاک انرژی در آن می‌باشیم. به منظور طراحی الگوریتم کنترل نیمه فعال ابتدا بایستی ضریب میرایی میراگر متناظر با هر زاویه جهت گیری پره‌ها تعیین گردد. برای این منظور از نتایج آزمایشات انجام شده بروی سازه یک درجه آزادی و میراگر مایع با پره قابل تنظیم استفاده شده است. بعد از تعیین ضریب میرایی با استفاده از الگوریتم کنترلی خطی بهینه و با در نظر گرفتن تاخیر زمانی کنترلر نیمه فعال پیاده سازی می‌گردد.

## ۲- میراگر مایع با قابلیت تنظیم

در راستای استفاده از میراگر مایعی تنظیم شده به عنوان میراگری که قابلیت سازگاری با شرایط مختلف را داشته باشد، همانگونه که بیان شد تعدادی از محققین با تغییراتی در میراگر مایع از آن به عنوان میراگر با قابلیت تنظیم استفاده نموده‌اند [۱۰-۶]. میراگری که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است طبق پیشنهاد Zahrai و همکارانش به پره‌هایی مجهز شده تا امکان کنترل نیمه فعال را فراهم نموده و ایراد ذکر شده را نیز مرتفع نماید.

در این میراگر از ۴ پره در دو ردیف استفاده شده است، به نحوی که در زمان بسته شدن پره‌ها مخزن میراگر به سه قسمت با طول مساوی تقسیم می‌گردد.

همانطور که می‌دانیم میراگرهای مایع در یک محدوده باریک فرکانسی، در اطراف فرکانس سازه کارایی دارد. در میراگر مایع با پره قابل تنظیم، این محدوده فرکانسی به محدوده بین فرکانس سیال در حالتی که پره‌ها کاملاً باز و کاملاً بسته است، ارتقا یافته است تا بدین گونه ایراد ذکر شده برطرف گردد [۱۰].

در این مطالعه از میراگر مایع با قابلیت تنظیم در کنترل نیمه فعال استفاده شده است. این نوع میراگرها دارای هزینه نصب و نگهداری پایین بوده که از نظر اقتصادی یک مزیت می‌باشد و از طرف دیگر قابلیت استفاده دو منظوره از آن، یعنی مخزن ذخیره آب و میراگر از دیگر مزیت‌های آن می‌باشد.



$$\Delta F_k = F_k + BU_k + M(a_2\ddot{X}_{k-1} + a_3\dot{X}_{k-1}) + C^*(a_5\dot{X}_{k-1} + a_6\ddot{X}_{k-1}) - (M\ddot{X}_{k-1} + C\dot{X}_{k-1} + KX_{k-1}) \quad (7)$$

ثابت‌های موجود در روابط بالا عبارتند از:

$$a_1 = \frac{1}{\delta\Delta t^2}; \quad a_2 = \frac{1}{\delta\Delta t}; \quad a_3 = \frac{1}{2\delta} \quad (8)$$

$$a_4 = \frac{\gamma}{\delta\Delta t}; \quad a_5 = \frac{\gamma}{\delta}; \quad a_6 = \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\delta} - 1 \right) \quad (9)$$

که در این روابط  $\gamma$  و  $\delta$  ثابت‌های روش نیومارک می‌باشند. در روش کنترل بهینه خطی شاخص عملکردی  $J$  در هر گام طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد که پارامتری وابسته به زمان می‌باشد.

$$J_k = \frac{1}{2} (X_k^T Q_1 X_k + \dot{X}_k^T Q_2 \dot{X}_k + \ddot{X}_k^T Q_3 \ddot{X}_k + U_k^T R U_k) \quad (10)$$

در این رابطه  $Q_1$  و  $Q_2$  ماتریس‌های مثبت نیمه معین می‌باشد که طبق مطالعه چانگ و یانگ از رابطه (۱۱) و (۱۲) تعیین می‌گردد. البته محاسبه ماتریس  $Q_1$  و  $Q_2$  طبق روابط و با توجه به مثبت نیمه معین بودن ماتریس سختی و میرایی زیر منجر به پایدار شدن الگوریتم کنترل می‌گردد. همچنین ماتریس مثبت نیمه معین  $R$  که بر اساس نیروی کنترلی محاسبه می‌گردد را می‌توان طبق معادله (۱۳) بدست آورد [۱۷].

$$Q_1 = \alpha_1 K^* \quad (11)$$

$$Q_2 = \alpha_2 K^* \quad (12)$$

$$R = B^T K^* B \quad (13)$$

در نهایت می‌توان معادله بردار کنترل را مطابق رابطه زیر محاسبه نمود.

$$U_k = -(B^T K^* B)^{-1} B^T (\alpha_1 X_k + \alpha_2 \dot{X}_k) \quad (14)$$

البته لازم به ذکر است که در الگوریتم کنترل بالا تاخیر زمانی طبق کار Symans و Constantinou لحاظ شده است. برای این منظور فرض می‌شود که سازه در حین بازه تاخیر زمانی لحاظ شده به صورت ارتعاش آزاد بدون میرایی رفتار می‌کند که با توجه به کوچک بودن میزان تاخیر زمانی فرض معقولی می‌باشد [۱۸]. برای پیاده سازی الگوریتم کنترل از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. البته در کد نوشته شده حداکثر اجازه چرخش سه پله (حداکثر ۲۷ درجه) در هر گام داده شده است تا از چرخش‌های بیش از حد و خرابی‌های احتمالی در سیستم چرخش پره‌ها در حین تحریک جلوگیری شود.

از بعد رفتاری نیز فعال شدن این نوع میراگرها با کوچکترین حرکت سازه، از دیگر برتری‌های آن می‌باشد. این میراگر یک مخزن مستطیلی ساده با چند پره قابل تنظیم است که تا حدی از آب پر گردیده است در این میراگر از دو ردیف پره استفاده شده تا در صورت بسته شدن آنها طول مخزن به سه قسمت مساوی تقسیم گردد. افزودن پره‌ها به میراگر قابلیت توازن بیشتری به میراگر مایعی داده است. در این میراگرها به علت افزایش سطح تماس سیال با مخزن و انحنای اجباری خطوط جریان در حالت پره‌های نیمه بسته، سیستم دارای توانایی بالاتری در اتلاف انرژی می‌باشد. بدیهی است که در صورت کنترل این پره‌ها به صورت خودکار صرفاً استفاده از نیروی تامین شده توسط یک باتری ساده کفایت خواهد کرد.

### ۳- کنترل بهینه لحظه‌ای

در روش کنترل بهینه لحظه‌ای داده‌های مربوط به تحریک خارجی تا لحظه مدنظر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این الگوریتم کنترل بهینه از شاخص عملکردی وابسته به زمان  $J(t)$  استفاده می‌گردد. نیروی بهینه کنترل از کمینه نمودن  $J(t)$  در هر لحظه زمانی  $t$  به دست می‌آید.

#### ۳-۱- الگوریتم کنترل بهینه لحظه‌ای بر مبنای روش نیومارک

در این مطالعه از روش کنترل بهینه خطی برای طراحی الگوریتم کنترل نیمه فعال استفاده شده است. معادله حرکت یک سیستم را می‌توان طبق رابطه (۱) بیان نمود.

$$MX + C\dot{X} + KX = F + BU \quad (1)$$

در این معادله  $M$ ،  $K$  و  $C$  به ترتیب ماتریس‌های  $n \times n$  جرم، سختی و میرایی می‌باشد که  $n$  نشان دهنده تعداد درجات آزادی خواهد بود. در رابطه  $X$  بردار تغییر مکان،  $F$  بردار تحریک،  $U$  بردار نیروی کنترلی و  $B$  نشان دهنده محل میراگرها می‌باشد. با استفاده از روش نیومارک برای حل گام به گام معادله بالا خواهیم داشت:

$$X_k = X_{k-1} + \Delta X_k \quad (2)$$

$$\dot{X}_k = (1 - a_5)\dot{X}_{k-1} - a_6\ddot{X}_{k-1} + a_4\Delta X_k \quad (3)$$

$$\ddot{X}_k = (1 - a_3)\ddot{X}_{k-1} - a_2\dot{X}_{k-1} + a_1\Delta X_k \quad (4)$$

$$\Delta X_k = K^{*-1}\Delta F_k \quad (5)$$

$$K^* = a_1 M + a_4 C^* + K^* \quad (6)$$



میراگر در زاویه جهت گیری ۷۲ درجه دارای بالاترین میرایی است. به بیانی دیگر در این زاویه که نزدیک به حالت بسته پرها می‌باشد به دلیل انحنای بیشتر خط جریان استهلاک انرژی بیشتری در سازه رخ می‌دهد. اما همانطور که می‌دانیم به دلایل مختلفی از جمله مصرف انرژی بیشتر برای ثابت نگه داشتن دریچه‌ها در این حالت به دلیل ضربات جریان آب به آن، این زاویه جهت گیری مقرون به صرفه نخواهد بود تا آنجا که با بررسی نتایج نیز می‌توان به این نکته پی برد که در بسیاری از زمان‌های تحریک زوایای دیگر پاسخگو بوده و می‌تواند از پاسخ سازه تا حد مطلوب بکاهد. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود تا زمانی که فرکانس تحریک کمتر ۱/۵ هرتز می‌باشد میزان ضریب میرایی این زاویه به ضرایب نظیر آن در زاویه‌های ۸۱ و ۶۳ درجه بسیار نزدیک و گاه‌ا از آنها کمتر است در واقع نمی‌توان در کنترل غیر فعال یک زاویه خاص را به عنوان بهترین زاویه در نظر گرفت که این مشکل را می‌توان با کنترل نیمه فعال و چرخش پرها امکان پذیر ساخت. از طرفی دیگر جدول (۱) براساس نسبت جرمی ۴ درصد و عمق سیال حدود ۵ سانتیمتر ارائه شده است. در این عمق نسبت عمق در حالتی که پرها باز است ۸ درصد و در حالت پره‌های بسته ۲۴ درصد می‌باشد. به غیر از حالت بسته پرها، نسبت عمق در محدوده کم عمق قرار می‌گیرد. در حالیکه غالباً این نوع میراگرها علاوه بر میراگر به عنوان مخزن ذخیره آب نیز استفاده می‌شوند که این امر تغییر نسبت جرمی و نسبت عمق را ممکن می‌سازد، بنابراین چرخش پرها و استفاده از الگوریتم کنترل نیمه فعال این امکان را فراهم می‌سازد که میراگر در هر لحظه بهترین عملکرد را داشته باشد. به بیانی دیگر قابلیت سازگاری با شرایط موجود و بازخورد پاسخ سازه را فراهم می‌نماید که این امر موجب صرفه جویی در مصرف انرژی و کاهش بیش از پیش پاسخ‌ها می‌گردد.

#### ۴-۱- نتایج حاصل از تحریک زلزله حوزه نزدیک

به منظور بررسی اثر نوع زلزله بر عملکرد میراگر مورد بحث ابتدا سازه یک درجه آزادی مجهز به میراگر تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک قرار گرفته است. در زلزله‌های حوزه نزدیک مولفه عمود بر گسل نگاشت‌های ثبت شده دارای پالس‌هایی با پریود بلند در نگاشت سرعت بوده و تقریباً قسمت عمده‌ای از انرژی در غالب این زلزله‌ها در این پالس‌ها جمع می‌شوند. همین امر یعنی ورود یکباره انرژی به سازه باعث تغییر شکل‌های بزرگ می‌گردد. یکی از اصلی‌ترین خصیصه‌های متمایز کننده زلزله‌های

در این تحقیق از سازه یک درجه آزادی برای تحلیل استفاده شده است. سختی این سازه ۱۴۰۰۰ نیوتن بر متر و جرم آن ۳۰۰ کیلوگرم لحاظ شده است. برای این سازه میرایی ۵٪ در مطالعه لحاظ شده است. برای لحاظ نمودن میرایی ناشی از میراگر از نتایج آزمایشگاهی انجام شده استفاده شده است که در جدول (۱) آورده شده است. در کد پیاده سازی شده با توجه به الگوریتم کنترلی در هر گام با توجه به بازخورد سازه میزان ضریب میرایی متناسب تعیین شده و متناظر با آن طبق جدول (۱) زاویه جهت گیری پرها تعیین می‌گردد.

برای مقایسه نتایج حاصل از کنترل نیمه فعال سازه ابتدا تحت کنترل غیر فعال قرار گرفته و نتایج حاصل با نتایج کنترل نیمه فعال مقایسه گردید. در کنترل غیر فعال زاویه جهت گیری پرها ۷۲ درجه لحاظ شده است. در این مطالعه همانطور که بیان شد از ۴ رکورد زلزله حوزه دور لوماپریتا (کلیف هوس)، ایمبریال ولی، کوکائلی و لوماپریتا (پرزیدو) و ۴ رکورد زلزله حوزه نزدیک لوماپریتا، کوبه، کیپ مندوسینو و نرتریج استفاده شده است.

برای صحت سنجی نتایج از نتایج کار آزمایشگاهی انجام شده استفاده شده است. بدین منظور نتایج حاصل از تحریک سازه یک درجه آزادی تحت اثر تحریک هارمونیک با فرکانس ۱/۲۵ هرتز و شتاب ۰/۱g با کد کنترلی نیمه فعال طراحی شده، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در شکل (۱) نمودار تاریخچه زمانی جابجایی سازه در آزمایشگاه و حاصل از کنترل نیمه فعال آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در کنترل نیمه فعال با توجه به تحریک هارمونیک و نتایج آزمایشگاهی بهترین زاویه جهت گیری پره باید ۷۲ درجه باشد که در اثر الگوریتم کنترل همین امر محقق شده و نتایج حاصل نیز به نتایج آزمایشگاهی نزدیک است.

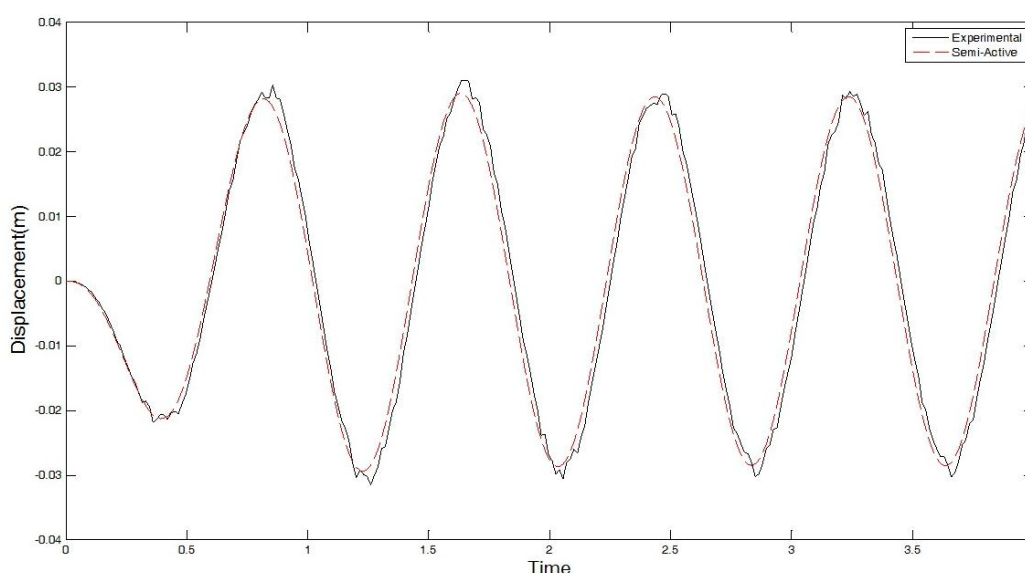
#### ۴-۲- بررسی و تفسیر نتایج

در این بخش نتایج حاصل از کنترل نیمه فعال و غیر فعال بروی سازه یک درجه آزادی مجهز به میراگر مایع با پره قابل تنظیم ارائه می‌گردد. همانطور که بیان شد به منظور مقایسه عملکرد میراگر در کنترل نیمه فعال از نتایج کنترل غیر فعال میراگر نیز استفاده شده است. برای کنترل غیر فعال میراگر می‌بایستی زاویه جهت گیر پرها ثابت لحاظ شود. بدین منظور با استفاده از جدول (۱) که حاصل کار آزمایشگاهی انجام شده توسط Zahrai و Enayati در آزمایشگاه دینامیک خاک دانشگاه تهران می‌باشد استفاده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود



جدول ۱- ضریب میرایی میراگر مایع با پره قابل تنظیم متناظر با فرکانس تحریک و زاویه جهت گیری پره‌ها

فرکانس تحریک (Hz)							زاویه پره‌ها (درجه)
۱۰	۵/۰	۳/۰	۲/۰	۱/۵	۱/۲۵	۰/۵	
۰/۰۱۵	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰
۰/۰۲۱	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۱۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۹
۰/۰۲۸	۰/۰۲	۰/۰۱۶	۰/۰۱۳	۰/۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۱	۱۸
۰/۰۳۴	۰/۰۲۴	۰/۰۲۲	۰/۰۲	۰/۰۱۲	۰/۰۱	۰/۰۱۱	۲۷
۰/۰۴	۰/۰۳۴	۰/۰۲۷	۰/۰۲۶	۰/۰۱۹	۰/۰۱۸	۰/۰۱۴	۳۶
۰/۰۴۹	۰/۰۳۹	۰/۰۲۸	۰/۰۲۲	۰/۰۲۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۸	۴۵
۰/۰۵۴	۰/۰۴۲	۰/۰۳	۰/۰۲۵	۰/۰۲۳	۰/۰۲۱	۰/۰۱۹	۵۴
۰/۰۵۸	۰/۰۴۹	۰/۰۳۵	۰/۰۲۹	۰/۰۲۶	۰/۰۲۳	۰/۰۲۵	۶۳
۰/۰۶۶	۰/۰۵۱	۰/۰۴۳	۰/۰۳۶	۰/۰۳۱	۰/۰۲۸	۰/۰۲۷	۷۲
۰/۰۶۳	۰/۰۴۹	۰/۰۴	۰/۰۳۴	۰/۰۳۳	۰/۰۲۷	۰/۰۲۳	۸۱
۰/۰۵۹	۰/۰۴۶	۰/۰۳۹	۰/۰۳۳	۰/۰۲۹	۰/۰۲۴	۰/۰۲	۹۰



شکل ۱- منحنی تاریخچه زمانی جابجایی سازه تحت تحریک هارمونیک با فرکانس ۱/۲۵ هرتز، ناشی از کار آزمایشگاهی و الگوریتم کنترل نیمه فعال

بررسی اقتصاد پروژه به دلیل کاهش برش پایه منجر به کاهش نیروهای طراحی و در نتیجه کاهش ابعاد مقاطع و وزن سازه می‌گردد که این امر خود به دلیل کاهش وزن سازه منجر به کاهش مضاعف نیروی طراحی می‌شود.

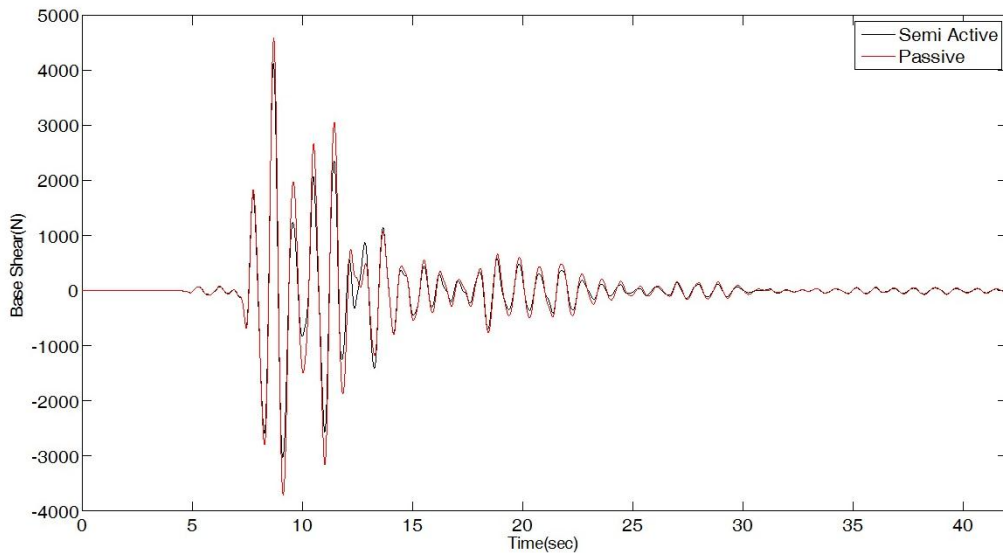
در شکل (۳) نمودار تاریخچه زمانی جابجایی سازه تحت زلزله حوزه نزدیک کوبه آورده شده است. در این شکل به منظور مقایسه نتایج، پاسخ سازه تحت کنترل نیمه فعال و غیر فعال آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با استفاده از چرخش پره‌ها در کنترل نیمه فعال بیشینه پاسخ‌ها نسبت به کنترل غیر فعال کاهش یافته که این امر نشان دهنده

حوزه نزدیک تولید این گونه پالس‌هاست که این پالس‌های حرکت عموماً شامل یک یا چند پالس مجزا در تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان و اغلب در تاریخچه زمانی سرعت می‌باشد.

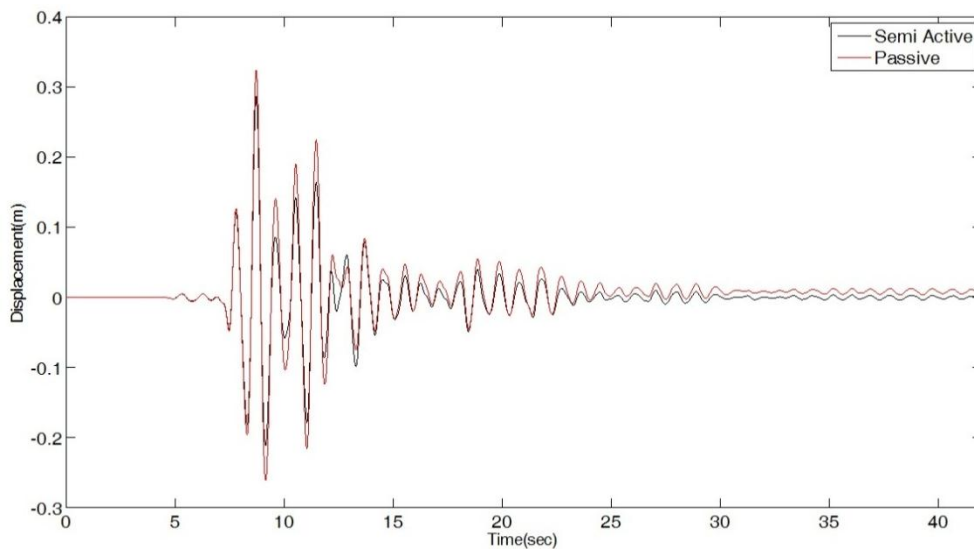
در شکل (۲) نمودار نیرو جابجایی برای یکی از زلزله‌های حوزه نزدیک آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود کنترل نیمه فعال میراگر یعنی امکان چرخش پره‌ها در حین تحریک منجر به کاهش برش پایه در این حالت می‌گردد. همانطور که می‌دانیم در هر پروژه دو نکته حائز اهمیت می‌باشد، ایمنی و اقتصاد آن. بررسی شکل (۲) مشخص می‌کند که در







شکل ۲- نمودار تاریخچه زمانی برش پایه سازه تحت اثر زلزله حوزه نزدیک کوبه در کنترل غیر فعال و نیمه فعال



شکل ۳- نمودار تاریخچه زمانی پاسخ جابجایی سازه تحت اثر زلزله حوزه نزدیک کوبه

به کاهش پاسخ جابجایی می‌گردد. حالت دیگر بررسی اثر کنترل نیمه فعال میراگر مایع بروی پاسخ جابجایی در کل بازه تحریک می‌باشد. در این حالت نیز بررسی نمودارهای تاریخچه زمانی جابجایی مؤید کاهش پاسخ می‌باشد. بررسی پاسخ سازه یک درجه آزادی مورد مطالعه در کنترل نیمه فعال و غیر فعال نشان می‌دهد که علاوه بر نقاط اوج در سایر نقاط نیز کاهش مشاهده می‌گردد که می‌توان دلیل آن را چرخش پره‌ها متناسب با تحریک ورودی و اختصاص مناسب‌ترین زاویه و بهینه‌ترین ضریب میرایی در هر گام زمانی دانست.

در ادامه بیشینه پاسخ برای زلزله کوبه در جدول (۲) آورده شده است. در این جداول بیشینه، کمینه، بیشینه مطلق و جذر

عملکرد مثبت میراگر در کنترل نیمه فعال می‌باشد.

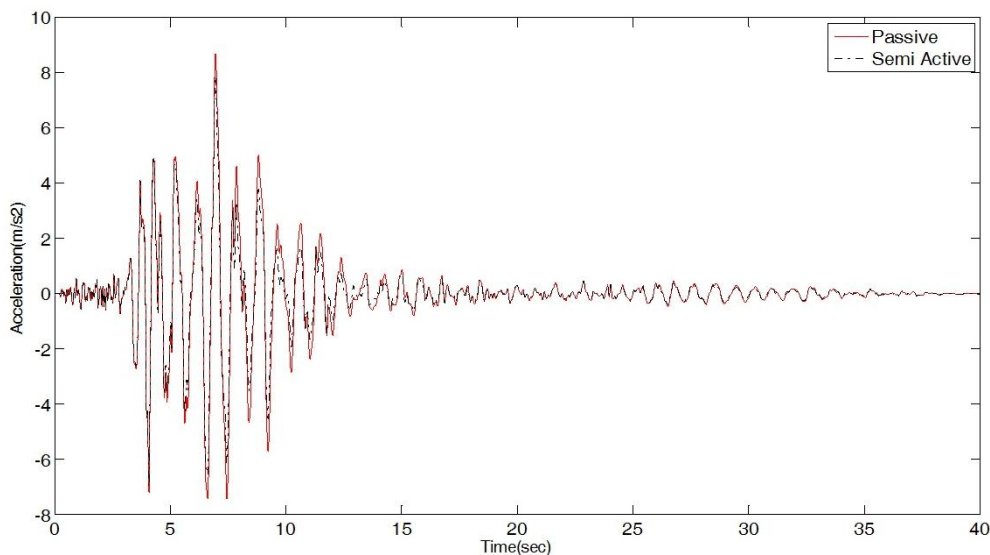
شکل (۳) را از دو منظر می‌توان بررسی نمود یکی نقاط بیشینه پاسخ و دیگری کل بازه تحریک. همانطور که از روی شکل‌های بالا مشخص است در زلزله کوبه در نقاط بیشینه پاسخ استفاده از کنترل نیمه فعال و چرخاندن پره‌ها منجر به کاهش پاسخ می‌گردد. به بیانی دیگر چرخاندن پره‌ها در این نقاط باعث بهبود رفتار سازه گردیده است. در این نقاط به دلیل تغییر جهت حرکت و صفر بودن سرعت، باعث تلاطم سیال و اختلاف فشار هیدرودینامیک بروی دیواره‌ی میراگر شده که این امر باعث استهلاک انرژی می‌شود، در واقع چرخش پره‌ها منجر به افزایش این تلاطم و بیشتر شدن اختلاف فشار بروی دیواره‌ها و منجر

در ادامه به بررسی نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب سازه یک درجه آزادی می‌پردازیم. در شکل (۴) پاسخ شتاب سازه کنترل نیمه فعال و غیر فعال را برای زلزله حوزه نزدیک نرتریج ارائه شده است. همانطور که دیده می‌شود در اثر کنترل نیمه فعال میراگر مایع پاسخ شتاب سازه نسبت به کنترل غیر فعال کاهش یافته است. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود با استفاده از کنترل نیمه فعال پاسخ شتاب سازه نسبت به نتایج کنترل غیر فعال کاهش از خود نشان می‌دهد. دلیل این کاهش تغییر زاویه پرها و تغییر انحنای خطوط جریان متناظر با آن می‌باشد. از طرفی دیگر چرخش پرها به منظور اختصاص زاویه بهینه، باعث افزایش تلاطم سیال و شکست موج شده که این امر خود باعث افزایش مکانیزم استهلاک انرژی و کاهش پاسخها می‌گردد.

مجموع مربعات پاسخها آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از کنترل نیمه فعال باعث کاهش ماکزیمم و جذر مجموع مربعات پاسخ سازه می‌شود تا جایی که در زلزله کوبه بیشینه جابجایی ۱۳ درصد کاهش از خود نشان می‌دهد.

جدول ۲- بیشینه پاسخ سازه تحت اثر زلزله حوزه نزدیک کوبه

بیشینه پاسخ سازه	کنترل نیمه فعال		غیر فعال	
	جابجایی (m)	برش پایه (N)	جابجایی (m)	برش پایه (N)
ماکزیمم	۰/۲۹	۴۱۳۵/۲۸	۰/۳۲	۴۵۸۵/۸۹
مینیمم	-۰/۲۱	-۳۰۲۸/۲۳	-۰/۲۶	-۳۷۰۸/۲۷
ماکزیمم مطلق	۰/۲۹	۴۱۳۵/۲۸	۰/۳۲	۴۵۸۵/۸۹
جذر مجموع مربعات	۰/۰۴	۵۴۲/۵۸	۰/۰۵	۶۴۸/۰۵



شکل ۴- نمودار تاریخچه زمانی پاسخ شتاب سازه تحت اثر زلزله حوزه نزدیک نرتریج

جدول ۳- درصد کاهش پاسخ سازه تحت اثر زلزله حوزه نزدیک

نرتریج در کنترل نیمه فعال نسبت به کنترل غیر فعال

پاسخ سازه	جابجایی (%)	شتاب (%)	برش پایه (%)
ماکزیمم	۱۱/۵۵	۱۰/۳۸	۱۰/۸۹
جذر مجموع مربعات	۲۲/۲۳	۱۷/۶۹	۲۰/۹۷

۴-۲- نتایج حاصل از تحریک زلزله حوزه دور

همانطور که بیان شد در این مطالعه به منظور بررسی اثر نوع زلزله بر عملکرد میراگر از زلزله های حوزه نزدیک و حوزه دور

در ادامه در جدول (۳) به بررسی میزان کاهش بیشینه و جذرمجموع مربعات پاسخ سازه مورد مطالعه در زلزله نرتریج پرداخته شده است. مشاهده می‌شود که کنترل نیمه فعال و چرخش پرها با الگوریتمی مناسب سبب کاهش پاسخها می‌شود تا آنجا که در زلزله نرتریج بیشینه جابجایی تا ۱۱/۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد. این در حالی است که در همین زلزله جذر مجموع مربعات کاهش ۲۲ درصد دارد که این نشان از کارایی بالای کنترل نیمه فعال و ارتقای رفتار دینامیکی سازه مجهز به میراگر مایع با پره‌های قابل تنظیم دارد.





که با حداکثر ظرفیت خود کار می‌کند، می‌باشد. البته همانطور که در ادامه آورده شده است پاسخ‌ها در کنترل نیمه فعال به پاسخ غیر فعال نزدیک می‌باشد.

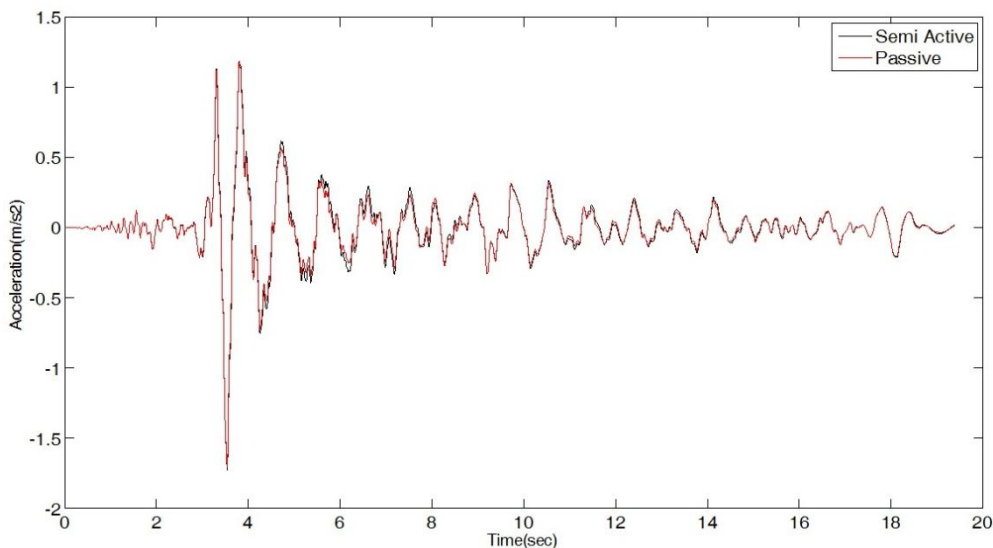
#### ۴-۳- نتایج حاصل از بررسی ضریب میرایی

همانطور که بیان شد دو مکانیزم استهلاک انرژی در میراگرهای مایع داریم که در زلزله‌های حوزه نزدیک به علت آزاد شدن یکباره انرژی به سازه تالطم سیال و شکست موج مشارکت بیشتری در استهلاک انرژی دارد. چرخش پره‌ها در کنترل نیمه فعال در این نوع زلزله‌ها یعنی زلزله‌ی حوزه نزدیک باعث افزایش میزان استهلاک ناشی از این مکانیزم شده که منجر به کاهش پاسخ سازه یک درجه آزادی می‌گردد. در حالیکه در زلزله‌های حوزه دور این چنین نبوده و انحنای مسیر جریان و اصطکاک لایه مرزی نقش بارزتری در مکانیزم استهلاک انرژی خواهد داشت. البته در کنترل نیمه فعال با توجه به چرخش پره‌ها از اثر مکانیزم دوم یعنی اصطکاک لایه مرزی کاسته خواهد شد. به بیانی دیگر میزان مشارکت مکانیزم اول در استهلاک انرژی بیشتر و موثر تر از مکانیزم دوم می‌باشد. البته باید توجه نمود که در مجموع میزان مشارکت مکانیزم تالطم سیال و شکست موج بیشتر از اصطکاک لایه مرزی در کل میزان استهلاک انرژی میراگر مایع با پره قابل تنظیم می‌باشد به همین دلیل این میراگر در کنترل نیمه فعال تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک کاهش پاسخ از خود نشان می‌دهد.

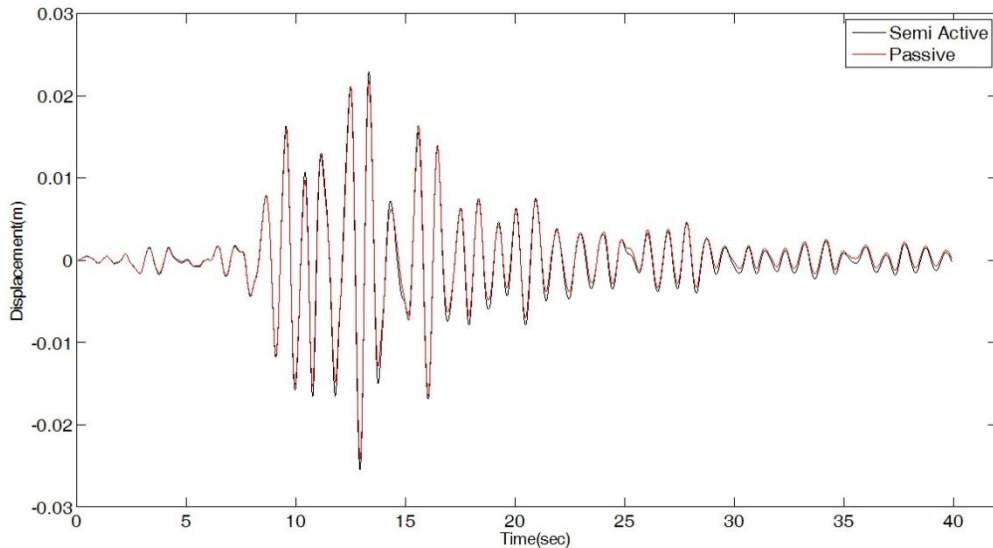
استفاده شده است. در این بخش نتایج حاصل از ۴ رکورد زلزله حوزه دور آورده شده است.

در شکل (۵) نمودار تاریخچه زمانی پاسخ شتاب سازه یک درجه آزادی تحت زلزله حوزه دور ایمپریال ولی آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد پاسخ سازه در کنترل نیمه فعال و غیر فعال به یکدیگر نزدیک می‌باشد. البته باید به این نکته توجه نمود که میراگر غیر فعال با حداکثر میرایی یعنی تحت زاویه ۷۲ درجه به پاسخ‌هایی مشابه با کنترل نیمه فعال با ضریب میرایی بهینه دست می‌یابد. به بیانی دیگر میراگر مایع با پره قابل تنظیم با ضریب میرایی کمتر به پاسخی مشابه با کنترل غیر فعال با حداکثر میرایی دست می‌یابد که این خود از برتری کنترل نیمه فعال می‌باشد.

در شکل (۶) نمودار تاریخچه زمانی جابجایی سازه مورد مطالعه تحت اثر زلزله حوزه دور لوماپریتا (کلیف هوس) آورده شده است. بررسی پاسخ جابجایی سازه تحت اثر این زلزله نیز مشابه زلزله‌های حوزه دور دیگر می‌باشد. بدین معنی که تحت اثر زلزله لوماپریتا (کلیف هوس) نیز نتایج کنترل نیمه فعال مشابه کنترل غیر فعال می‌باشد اما با ضریب میرایی کمتر. به بیانی دیگر با استفاده از امکان چرخش پره‌ها در کنترل نیمه فعال در هرگام زمانی ضریب میرایی بهینه انتخاب شده و متناظر با آن زاویه جهت گیری پره‌ها تعیین شده است. اما این ضریب میرایی مشخص شده کمتر از مقدار تعیین شده در کنترل غیر فعال



شکل ۵- نمودار تاریخچه زمانی پاسخ شتاب سازه تحت اثر زلزله حوزه دور ایمپریال ولی

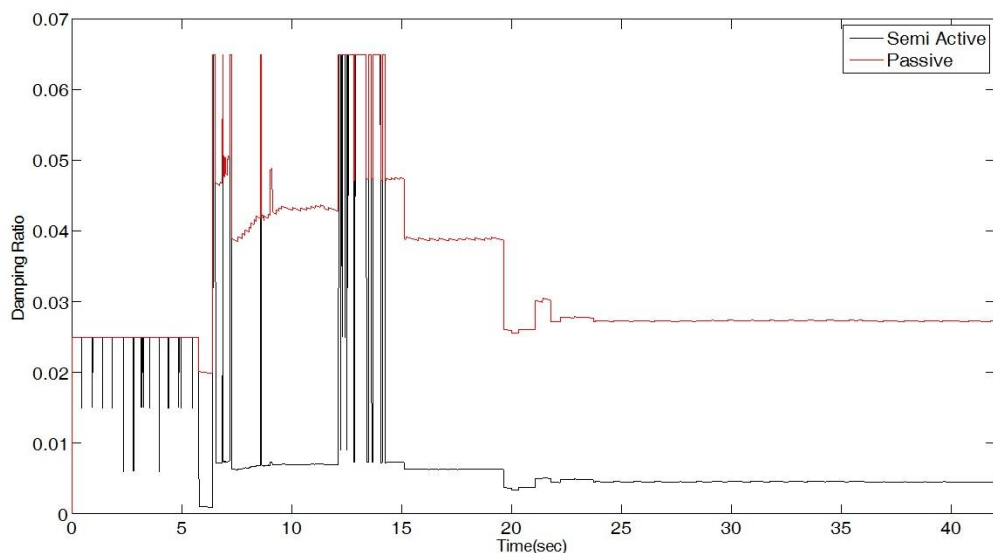


شکل ۶- نمودار تاریخیچه زمانی پاسخ جابجایی سازه تحت اثر زلزله حوزه دور لوماپریتا (کلیف هوس)

غیر فعال است در حالیکه پاسخ سازه یک درجه آزادی مورد بررسی به یکدیگر در این دو نوع کنترل نزدیک است و این امر نشان دهنده رفتار بهینه تر میراگر مایع با پره قابل تنظیم در کنترل نیمه فعال می‌باشد.

در جدول (۴) ضریب میرایی در هر گام برای کنترل نیمه فعال و غیر فعال برای زلزله‌های حوزه نزدیک کپ مندوسینو در یک ثانیه اول تحریک آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مشابه زلزله‌های حوزه دور ضریب میرایی در هر گام در کنترل نیمه فعال کمتر از کنترل غیرفعال می‌باشد.

البته بررسی ضریب میرایی میراگر در هر گام نکات قابل توجهی دارد. شکل (۷) نشان می‌دهد که در کنترل نیمه فعال میرایی در هر گام زمانی نسبت به کنترل غیر فعال در سازه کمتر می‌باشد. همانطور که بیان شد در کنترل نیمه فعال نتایج حاصل از تحریک زلزله حوزه دور به کنترل غیر فعال نزدیک و تقریباً یکسان است در حالیکه الگوریتم کنترل ضریب میرایی بهینه‌ای به سازه اعمال می‌کند. در شکل (۷) مشاهده می‌گردد که در زلزله حوزه دور کوکائلی ضریب میرایی اعمال شده کمتر و در برخی از زمان‌ها برابر با ضریب میرایی نظیرش در کنترل



شکل ۷- ضریب میرایی میراگر در کنترل غیر فعال و نیمه فعال در زلزله حوزه دور کوکائلی

جدول ۴- ضرایب میرایی در کنترل غیر فعال و نیمه فعال در زلزله حوزه نزدیک کیپ مندوسینو

زمان	ضریب میرایی در کنترل غیر فعال	ضریب میرایی در کنترل نیمه فعال	زمان	ضریب میرایی در کنترل غیر فعال	ضریب میرایی در کنترل نیمه فعال
۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۵۲	۰/۰۳۵	۰/۰۰۶
۰/۰۲	۰/۰۶۵	۰/۰۳۲	۰/۵۴	۰/۰۲۴	۰/۰۰۶
۰/۰۴	۰/۰۲۵	۰/۰۱۹	۰/۵۶	۰/۰۶۵	۰/۰۳۲
۰/۰۶	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۵۸	۰/۰۲۲	۰/۰۰۵
۰/۰۸	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۶	۰/۰۳۲	۰/۰۰۵
۰/۱۰	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۶۲	۰/۰۶۵	۰/۰۳۲
۰/۱۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۶۴	۰/۰۶۵	۰/۰۵۴
۰/۱۴	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۶۶	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵
۰/۱۶	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۶۸	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵
۰/۱۸	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۷۰	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵
۰/۲۰	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۷۲	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵
۰/۲۲	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۷۴	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵
۰/۲۴	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۷۶	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵
۰/۲۶	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۷۸	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵
۰/۲۸	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۸۰	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵
۰/۳۰	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۸۲	۰/۰۳۹	۰/۰۲۵
۰/۳۲	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۸۴	۰/۰۳۹	۰/۰۱۳
۰/۳۴	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۸۶	۰/۰۳۹	۰/۰۰۶
۰/۳۶	۰/۰۴۱	۰/۰۲۷	۰/۸۸	۰/۰۳۸	۰/۰۰۶
۰/۳۸	۰/۰۴۰	۰/۰۱۴	۰/۹۰	۰/۰۳۸	۰/۰۰۶
۰/۴۰	۰/۰۳۹	۰/۰۰۶	۰/۹۲	۰/۰۳۸	۰/۰۰۶
۰/۴۲	۰/۰۳۹	۰/۰۰۶	۰/۹۴	۰/۰۳۸	۰/۰۰۶
۰/۴۴	۰/۰۲۸	۰/۰۰۶	۰/۹۶	۰/۰۳۷	۰/۰۰۶
۰/۴۶	۰/۰۳۸	۰/۰۰۶	۰/۹۸	۰/۰۳۷	۰/۰۰۶
۰/۴۸	۰/۰۲۷	۰/۰۰۶	۱/۰۰	۰/۰۳۶	۰/۰۰۶
۰/۵۰	۰/۰۳۶	۰/۰۰۶			

### ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه رفتار میراگر مایع با پره قابل تنظیم در کنترل نیمه فعال با استفاده از الگوریتم کنترل بهینه خطی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای مقایسه نتایج از یک سازه یک درجه آزادی با سختی ۱۴۰۰۰ نیوتن بر متر و جرم ۳۰۰ کیلوگرم استفاده شده است. علاوه بر کنترل نیمه فعال سازه تحت کنترل غیر فعال نیز قرار گرفته تا بتوان نتایج را با یکدیگر مقایسه نمود. به منظور تعیین ضریب میرایی متناظر با هر زاویه جهت گیری پره‌ها از نتایج آزمایشگاهی انجام شده استفاده شده است. در کنترل غیر فعال زاویه جهت گیری پره‌ها ثابت و ۷۲ درجه لحاظ شده است. برای بررسی نتایج از ۸ رکورد زلزله حوزه دور و حوزه نزدیک برای تحریک سازه یک درجه آزادی استفاده

شده است. همچنین بیشینه پاسخ سازه و جذر مجموع مربعات آن مقایسه گردیده است.

بررسی نتایج زلزله حوزه نزدیک نشان می‌دهد که میراگر در کنترل نیمه فعال نسبت به کنترل غیر فعال پاسخ‌های بهتری داشته تا آنجا که بیشینه جابجایی سازه تا ۱۳ درصد کاهش نسبت به کنترل غیر فعال از خود نشان می‌دهد. البته میزان کاهش در جذر مجموع مربعات پاسخ‌ها نسبت به بیشینه پاسخ بیشتر خواهد بود تا آنجا که در زلزله کوبه ۲۲ درصد کاهش در جذر مجموع مربعات جابجایی مشاهده می‌گردد.

بررسی ضریب میرایی سازه در هر گام زمانی نیز نشان می‌دهد که با اینکه ضریب میرایی در هر گام زمانی در کنترل غیر فعال بیشتر از کنترل نیمه فعال می‌باشد ولی پاسخ سازه در کنترل نیمه فعال کمتر از کنترل غیر فعال می‌باشد. در زلزله‌های



Expansion Technique”, Journal of fluids and Structures, Vol. 26, No. 7-8, pp. 1058-1077.

- [8] Love, J.S. and Tait, M.J. (2012), “A Preliminary Design Method for Tuned Liquid Dampers Conforming”, Engineering Structures, Vol. 40, pp 187-197.
- [9] Crowley, S. and Porter, R. (2012), “An Analysis of Screen Arrangements for a Tuned Liquid Damper”, Journal of Fluids and Structures, Vol. 34, pp 291-309.
- [10] Zahrai, S.M., Abbasi, S., Samali, B. and Vercelj, Z. (2012), “Experimental Investigation of Utilizing TLD with Baffles in a Scaled down 5- Story Benchmark Building”, Journal of Fluids and Structures, Vol. 28, pp. 194-210.
- [11] Sonmez, E., Nagarajaiah, S., Sun, C. and Basu, B. (2016), “A Study on Semi-Active Tuned Liquid Column Dampers (sTLCDs) for Structural Response Reduction under Random Excitations”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 362, pp. 1-15.
- [12] Soliman, I.M., Tait, M J. and El Damatty, A.A. (2016), “Modeling and Analysis of a Structure Semi-Active Tuned Liquid Damper System”, Structural Control and Health Monitoring, Vol. 24, No. 2, e1865.
- [13] Chase, J.G., Barroso, L.R. and Hunt, S. (2004), “The Impact of Total Acceleration Control for Semi-Active Earthquake Hazard Mitigation”, Engineering Structures, Vol. 26, No. 2, pp. 201-209.
- [14] Chey, M.-H., Chase, J.G., Mander, J.B. and Carr, A.J. (2010), “Semi-active tuned mass damper building systems: Design”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 39, No. 2, pp. 119-139.
- [15] Yalla, S.K., Kareem, A. and Kantor, J.C. (2001), “Semi-Active Tuned Liquid Column Dampers for Vibration Control of Structures”, Engineering Structures, Vol. 23, No. 11, pp. 1469-1479.
- [16] Sun, C. and Nagarajaiah, S. (2014), “Study on Semi-Active Tuned Mass Damper with Variable Damping and Stiffness under Seismic Eitations”, Structural Control and Health Monitoring, Vol. 21, No. 6, pp. 890-906.
- [17] Chang, C. and Yang, H. (1994), “Instantaneous Optimal Control of Building Frames”, Journal of structural Engineering, Vol. 120, No. 4, pp. 1307-1326.
- [18] Symans, M.D. and Constantinou, M.C. (1997), “Seismic Testing of a Building Structure with a Semi-Active Fluid Damper Control System”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, No. 6, pp. 759-777..

حوزه دور نتایج کنترل نیمه فعال به پاسخ سازه در کنترل غیر فعال نزدیک می‌باشد. در حالیکه در هر گام زمانی میزان ضریب میرایی اعمالی از الگوریتم کنترل در کنترل نیمه فعال کمتر از کنترل غیر فعال می‌باشد.

در مجموع می‌توان گفت که میراگر مایع با پره قابل تنظیم در کنترل نیمه فعال عملکردی بهتر از کنترل غیر فعال خواهد داشت. اما در مقایسه بین زلزله حوزه نزدیک و حوزه دور، در زلزله‌های حوزه نزدیک رفتاری بهتر از از خود نشان می‌دهد. البته با در نظر گرفتن ضریب میرایی سازه کنترل نیمه فعال نسبت به کنترل غیر فعال رفتار بهتر و بهینه‌ای خواهد داشت.

## ۸- مراجع

- [1] Kareem, A. (1993), “Tuned Liquid Dampers: past, present and future”, Proceeding of the 7<sup>th</sup> U.S. National Conference on Wind Engineering, Los Angeles, pp. 343-352.
- [2] Fujino, Y., Pacheco, B.M., Chaiseri, P. and Sun, L.M. (1988), “Parametric Studies on Tuned Liquid Damper (TLD) Using Circular Containers by Free Oscillation Experiments”, Journal of Structural Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 381-391.
- [3] Fujino, Y., Pachec, B.M., Chaiseri, P. and Sun, L.M. (1988), “Fundamental Study of Tuned Liquid Damper (TLD)- A New Damper for Building Vibration”, Proceedings of Symposium/Workshop on Serviceability of Buildings, University of Ottawa, Ontario, Canada, pp. 214-227.
- [4] Zhao, Z. and Fujino, Y. (1993), “Numerical Simulation and Experimental Study of Deeper Water TLD in the Presence of Screens”, Journal of Structural Engineering, Vol. 39, No. 2, pp.699-711.
- [5] Lou, J.Y.K., Lutes, L.D. and Li, J.J. (1994), “Active Tuned Liquid Damper for Structural Control”, Proceedings the First World Conference on Structural Control, Pasadena, California, pp. 70-79.
- [6] Tait, M.J., El Damatty, A.A., Isyumov, N. and Siddique, M.R. (2005), “Numerical Flow Models to Simulate Tuned Liquid Dampers (TLD) with Slat Screens”, Journal of Fluids and structures, Vol. 20, No. 8, pp. 1007-1023.
- [7] Love, J.S. and Tait, M.J. (2010), “Nonlinear Simulation of a Tuned Liquid Damper with Damping Screens Using a Modal

## پی نوشت

<sup>1</sup> Passive control

<sup>2</sup> Active control

<sup>3</sup> Hybrid control

