

# کنترل نیمه فعال سازه مجهز به میراگر MR با استفاده از روش نیومارک اصلاح شده مبتنی بر الگوریتم بهینه لحظه‌ای

جواد کاتبی<sup>۱\*</sup> و سمیرا محمدی زاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

\* نویسنده مسئول

دریافت ۹۴/۹/۱۹ پذیرش ۹۵/۴/۱۲

## چکیده

در دهه‌های اخیر، کارایی و تأثیر انواع ابزارهای کنترل نیمه فعال در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مورد مطالعه و توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در این میان، میراگر مغناطیسی (MR) به علت کاربرد آسان، ظرفیت تولید نیروی مناسب و مصرف انرژی کمتر، به عنوان یکی از پرکاربردترین تجهیزات کنترل نیمه فعال شناخته شده است. این نوع میراگر دارای رفتاری کاملاً غیر خطی می‌باشد و تا کنون مدل‌های مکانیکی متعددی برای بیان ویژگی‌های رفتاری آن معرفی شده است، مدل بوک-ون اصلاح شده به عنوان یکی از رایج‌ترین این مدل‌ها بوده و به خوبی رفتار میراگر را نمایش می‌دهد. به دلیل غیر خطی بودن رفتار میراگر MR، معادله حرکت سازه مجهز به آن یک معادله درگیر بوده و همواره یافتن روشی برای حل این معادله یکی از مشکلات مطالعات عددی مربوط به این نوع میراگر می‌باشد. در این مطالعه، با توجه به قابلیت روش نمودی نیومارک در حل معادلات دینامیکی خطی و غیر خطی، از الگوریتم بهینه لحظه‌ای جهت اصلاح و بهبود آن بهره گرفته شده و با استفاده از این شیوه پیشنهادی معادله حرکت سازه مجهز به میراگر MR حل می‌گردد. همچنین جهت بررسی کارایی این الگوریتم یک مطالعه عددی بر روی سازه مبنای سه طبقه معرفی شده توسط کمیته ASCE انجام می‌گیرد. نتایج این مطالعه عددی و مقایسه آن با سایر استراتژی‌ها حاکی از کارآمدی روش نمودی نیومارک اصلاح شده پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم بهینه لحظه‌ای، در حل معادله دیفرانسیل غیر خطی و کاهش ارتعاشات سازه مبنا تحت اثر تحریکات لرزه‌ای می‌باشد. **واژگان کلیدی:** کنترل نیمه فعال، میراگر MR، کنترل بهینه، روش نیومارک اصلاح شده.

## ۱- مقدمه

میراگرهای سیال مورد توجه در مهندسی عمران و در بحث کنترل نیمه فعال سازه‌ها می‌باشد. در آمریکا، برای اولین بار این میراگرها به منظور کاهش تنش در عرشه پل‌ها، بین پایه و عرشه پل به کار گرفته شدند. کاربردهای فراوانی از میراگرهای MR در ساختمان‌های گوناگون نیز به چشم می‌خورد [۲].

میراگر MR دارای رفتاری کاملاً غیر خطی می‌باشد. تا کنون مدل‌های مکانیکی متعددی برای بیان ویژگی‌های رفتاری این میراگر معرفی شده است. مدل بینگهام<sup>۲</sup> از اولین مدل‌های معرفی شده برای محاسبه نیروی کنترل می‌باشد. این مدل توانایی انعکاس رفتار غیر خطی میراگر را در سرعت‌های نزدیک به صفر ندارد. مدل‌های چندجمله‌ای<sup>۳</sup> و گاموتا فیلیسکو<sup>۴</sup> نیز از مدل‌های ارائه شده جهت توصیف رفتار میراگر MR می‌باشند. این مدل‌ها رفتار میراگر را در سرعت‌های بالا به خوبی نشان داده و عملکرد بهتری نسبت به مدل بینگهام در سرعت‌های پایین

میراگر سیال MR<sup>۱</sup> که در زمره تجهیزات کنترل نیمه فعال قرار می‌گیرد، شامل یک سیلندر هیدرولیکی می‌باشد، که در آن ذرات میکرونی با خاصیت آهن‌ربایی درون یک مایع (معمولاً روغن) شناور هستند. هنگامی که مایع MR تحت تأثیر میدان مغناطیسی نباشد، به صورت روان حرکت می‌کند و بالعکس هنگامی که این مایع تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گیرد، به حالت نیمه جامد تبدیل می‌شود. یک آهنربای الکتریکی که در داخل پیستون قرار گرفته است میدان مغناطیسی لازم را ایجاد می‌کند. به عبارتی مشخصه اصلی این سیال توانایی آن در تغییر حالت، از مایع روان به مایع ویسکوزیته خطی و ماده نیمه جامد، با توانایی ایجاد تنش برشی در زمانی بسیار کوتاه، تحت اثر میدان مغناطیسی می‌باشد [۱].

این میراگر به علت داشتن مزیت‌هایی از جمله مصرف پایین انرژی، نیروی قابل کنترل، پاسخ سریع و ایمنی در عمل، یکی از

2- Bingham

3- Polynomial

4- Gamota filisko

1- Magneto-Rheological damper

Dominguez و همکاران [۸]، از روش المان محدود و روش نیومارک جهت آنالیز سازه نیمه سازگار مجهز به میراگر MR استفاده نمودند. در این مطالعه روش نیومارک با استفاده از یک فرآیند درونی تکرار شونده اصلاح شده است تا بر درگیر بودن معادله حرکت غلبه کند و از تعادل نیروی به دست آمده در هر گام اطمینان حاصل شود.

مطالعه حاضر به بیان یک روش جدید، جهت حل معادله غیر خطی حرکت سازه مجهز به میراگر MR می پردازد. در این روش با استفاده از شاخص عملکرد لحظه ای، نیروی بهینه ای جهت اصلاح روش نیومارک محاسبه می شود. با استفاده از پاسخ های پیش بینی شده می توان به حل معادلات درگیر غیر خطی بوک-ون پرداخت و نیروی کنترلی میراگر MR را محاسبه نمود. جهت بررسی کارایی این الگوریتم یک مطالعه عددی بر روی سازه مینای معرفی شده توسط کمیته ASCE انجام می گیرد [۹]. این سازه مینا تا کنون توسط محققین بسیاری در مطالعات مربوط به کنترل سازه مورد استفاده قرار گرفته است. Spencer و همکاران [۳] در بررسی الگوریتم کنترلی بهینه کوتاه شده<sup>۴</sup> در میراگر MR این سازه مینا را مورد مطالعه قرار دادند. از دیگر مطالعات انجام شده بر روی این سازه می توان به بررسی الگوریتم مود لغزشی فازی در کابل های فعال توسط Kim و همکاران اشاره نمود [۱۰]. در مطالعه حاضر به مقایسه نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی کنترل بهینه لحظه ای با روش بهینه کوتاه شده پرداخته می شود.

## ۲- تخمین پاسخ سازه با روش کنترل بهینه لحظه ای و

### روش نیومارک

#### ۲-۱- روش نیومارک

معادله حرکت عمومی یک سازه  $n$  درجه آزادی خطی مجهز به ابزار کنترل کننده به صورت زیر فرمول بندی می گردد:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -[M]\{\ddot{u}_g\} + [D]\{U(t)\} \quad (1)$$

در این معادله ماتریس های  $M$ ،  $C$ ،  $K$  به ترتیب ماتریس های  $n \times n$  جرم، میرایی و سختی سیستم و  $\{u(t)\}$  بردار  $n$  بعدی جابه جایی سازه مورد نظر می باشد،  $\{\dot{u}(t)\}$  و  $\{\ddot{u}(t)\}$  نیز به

دارند. در میان مدل های معرفی شده، مدل بوک-ون<sup>۱</sup> بسیار پرکاربرد بوده و رفتار نیرو-جابجایی میراگر را به خوبی و رفتار سرعت-نیرو را بسیار نزدیک به داده های آزمایشگاهی نشان می دهد. این در حالی است که این مدل در مراحل که نمودار نیرو-سرعت غیر خطی بوده و در آن شتاب و سرعت علامتی مخالف یکدیگر دارند و سرعت ها بسیار کوچک هستند، نمی تواند نقش مناسبی را ایفا کند. برای جبران این نقیصه، مدل بوک-ون اصلاح شده توسط Spencer [۳] در سال ۱۹۹۷ معرفی گردید. این مدل در محدوده رفتار غیر خطی میراگر MR، بسیار مناسب عمل می کند.

رفتار غیر خطی و معادلات حاکم بر میراگر MR موجب درگیر شدن معادله حرکت سازه مجهز به آن می شود، به گونه ای که محاسبه نیروی کنترلی و پاسخ سازه به یکدیگر وابسته بوده و نمی توان آن ها را به طور هم زمان محاسبه نمود. حل این معادلات عموماً با استفاده از روش های رایج در مختصات فضای حالت صورت می گیرد. همچنین استفاده از روش هوش مصنوعی، منطق فازی و الگوریتم های تکاملی در حل معادله حرکت غیر خطی، در دهه اخیر گسترش یافته است. در این بین روش های نوینی جهت حل معادله حرکت عنوان شده است [۴].

Seung و همکاران [۵]، از روش خطی سازی تصادفی جهت حل معادله حرکت سازه غیر خطی استفاده کرده اند. در این روش پاسخ سازه ها در یک حالت بهینه به دست می آیند و همچنین از تحلیل های پیچیده غیر خطی جلوگیری می شود.

Zhu و همکاران [۶]، از روش متوسط گیری تصادفی جهت حل معادله حرکت یک سازه چهل طبقه مجهز به میراگر MR و ER<sup>۲</sup> استفاده نمودند و این سازه را تحت تحریک باد و زلزله تحلیل کردند. با استفاده از این روش یک نیروی کنترل بهینه جهت مقابله با نیروهای خارجی حاصل می گردد. نتایج این تحقیق حاکی از کارآمد بودن این روش در محاسبه نیروی کنترل بهینه می باشد.

Dinh و همکاران [۷]، جهت به دست آوردن نیروی کنترل میراگر MR و حل معادله حرکت از روش استنتاجی عصبی-فازی استفاده کردند. آن ها در این مطالعه از روش جعبه سیاه<sup>۳</sup> جهت پیش بینی نیروی میراگر MR استفاده کردند. نتایج حاکی از توانایی این مدل در پیش بینی دقیق نیروی میراگر MR است.

1- Bouc-Wen

2- Electro-Rheological damper

3- Black Box (BB)

4- Clipped-Optimal

در روابط بالا  $i$  برابر با شماره گام زمانی است، همچنین مقادیر  $\alpha_1$  تا  $\alpha_6$  طبق فرمول‌های زیر به دست می‌آیند.

$$\alpha_1 = \frac{1}{\delta(\Delta t)^2}; \alpha_2 = \frac{1}{\delta \Delta t}; \alpha_3 = \frac{1}{2\delta}; \quad (9\text{-الف})$$

$$\alpha_4 = \frac{\gamma}{\delta \Delta t}; \alpha_5 = \frac{\gamma}{\delta}; \alpha_6 = \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\delta} - 1 \right); \quad (9\text{-ب})$$

که در آن  $\gamma$  و  $\delta$  پارامترهای روش نیومارک می‌باشند [۱۱].

## ۲-۲- روش‌های بهینه تعیین نیروی کنترل

یکی از نخستین الگوریتم‌ها جهت بهینه‌یابی نیروی کنترل لازم، الگوریتم LQR می‌باشد. در این شیوه به تعریف یک شاخص عملکرد  $J$  که شامل ماتریس‌های وزنی می‌باشد، اقدام شده و با توجه به کمینه شدن این شاخص، نیروهای کنترل که رابطه‌ای خطی با پاسخ‌های سیستم سازه‌ای دارند، محاسبه می‌شوند. در این الگوریتم هدف محاسبه ماتریس بهره می‌باشد. در روش کنترل کلاسیک به دلیل نیاز به حل معادله ریکاتی، داشتن تمامی تاریخچه زمانی زلزله از پیش الزامی می‌باشد که با توجه به نامشخص بودن بار لرزه‌ای این کار عملاً ناممکن است. برای برطرف کردن این کاستی روش کنترل بهینه لحظه‌ای توسط یانگ معرفی شد، این الگوریتم به تغییر زمان حساس بوده و در هر لحظه ماتریس‌های وزنی آن تغییر می‌نمایند [۱۲].

Yang و همکاران [۱۲]، برای رفع این نقیصه از روش لیاپانوف مستقیم استفاده نمود و ماتریس‌های وزنی پایداری را ارائه نمود. با لحاظ این تغییر کارایی روش کنترل بهینه لحظه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت.

Yang و همکاران [۱۳] بر اساس روش کنترل بهینه لحظه‌ای، به معرفی یک الگوریتم جدید جهت استفاده در روش نیومارک پرداختند و در تعریف شاخص خود از بازخورد سرعت و جابجایی استفاده نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که استفاده از بازخورد سرعت بسیار مؤثرتر از بازخورد جابجایی می‌باشد. در نهایت Bahar و همکاران [۱۴]، شاخص کنترلی لحظه‌ای رابطه (۱۰) را در اصلاح روابط ویلسون-تتا به کار گرفتند. این شاخص از هر سه بازخورد جابجایی، سرعت و شتاب استفاده می‌کند که به صورت زیر است:

ترتیب بردارهای  $n \times 1$  سرعت و شتاب این سیستم می‌باشند.  $D$  ماتریس موقعیت میراگرها و  $L$  بردار تأثیر زلزله است که برداری واحد می‌باشد.  $U$  بردار  $r$  بعدی نیروی کنترل می‌باشد که  $r$  برابر با تعداد ابزارهای کنترل به کارگرفته شده در سازه مورد نظر می‌باشد [۳]. معادله (۱) برای حل عددی گسسته با گام زمانی نمونه  $\Delta t$  بین زمان‌های  $(i-1)\Delta t$  تا  $i\Delta t$  می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$[M]\{\Delta \ddot{u}(t)\} + [C]\{\Delta \dot{u}(t)\} + [K]\{\Delta u(t)\} = \Delta P(t) \quad (2\text{-الف})$$

$$\Delta \ddot{u}(t) = \ddot{u}_i - \ddot{u}_{i-1} \quad (2\text{-ب})$$

$$\Delta \dot{u}(t) = \dot{u}_i - \dot{u}_{i-1} \quad (2\text{-ج})$$

$$\Delta u(t) = u_i - u_{i-1} \quad (2\text{-د})$$

$$\Delta P(t) = P_i - P_{i-1} \quad (2\text{-ه})$$

$$P_i = -[M] \cdot \{L\} \cdot \ddot{u}_{gi} + [D] \{U_i\} \quad (2\text{-و})$$

$$P_{i-1} = -[M] \cdot \{L\} \cdot \ddot{u}_{gi-1} + [D] \{U_{i-1}\} \quad (2\text{-ز})$$

حال برای به دست آوردن پاسخ سازه در هر گام زمانی، از روابط نیومارک استفاده می‌گردد:

$$u_i = \Delta u_i + u_{i-1} \quad (3)$$

$$\dot{u}_i = (1 - \alpha_5) \dot{u}_{i-1} - \alpha_6 \ddot{u}_{i-1} + \alpha_4 \Delta u_i \quad (4)$$

$$\ddot{u}_i = (1 - \alpha_3) \ddot{u}_{i-1} - \alpha_2 \dot{u}_{i-1} + \alpha_1 \Delta u_k \quad (5)$$

$$\Delta u_i = K^{*-1} \Delta F_i \quad (6)$$

$$K^* = [K] + \alpha_1 [M] + \alpha_4 [C] \quad (7)$$

$$\Delta F_i = (P_i - P_{i-1}) + [M] (\alpha_2 \dot{u}_{i-1} + \alpha_3 \ddot{u}_{i-1}) + [C] (\alpha_5 \dot{u}_{i-1} + \alpha_6 \ddot{u}_{i-1}) \quad (8)$$

این مدل در شکل (۱) ارائه شده است. رابطه‌ای که مقدار نیرو را بر اساس این مدل بیان می‌کند به صورت زیر می‌باشد [۳].

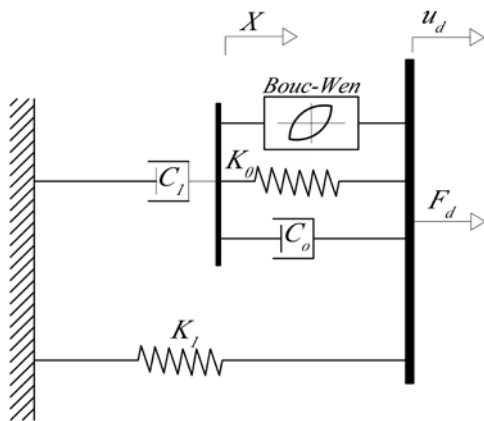
$$F_d = C_1 \dot{X} + K_1 (u_d - x_0) \quad (13)$$

که مقدار  $\dot{x}$  می‌تواند از حل معادله درگیر زیر به دست آید:

$$\ddot{y} = -\gamma |v_d - \dot{X}| (y) |y|^{(n-1)} - \beta (v_d - \dot{X}) |y|^{(n)} + A_d (v_d - \dot{X}) \quad (14)$$

$$\dot{X} = \left\{ \frac{1}{(C_0 + C_1)} \right\} \{ \alpha_0 y + C_0 v_d + K_0 (u_d - X) \} \quad (15)$$

$F_d$  نیروی کنترلی میراگر MR می‌باشد. پارامترهای  $u_d$  و  $v_d$  مقدار جابجایی و سرعت میراگر می‌باشند.  $X$  شبه جابجایی داخلی میراگر و  $\gamma$  متغیر تکاملی است که رفتار چرخه‌ای میراگر را توصیف می‌کند. در این جا سختی القاگر توسط  $K_1$  و میرایی ویسکوز مشاهده شده در سرعت‌های بزرگ توسط  $C_0$  ارائه می‌شود. یک میراگر که توسط  $C_1$  نشان داده می‌شود، در مدل لحاظ شده تا رفتار غیر خطی میراگر در سرعت‌های پایین (که در داده‌های آزمایشگاهی مشاهده شده است) را معرفی نماید.



شکل ۱- مدل بوک-ون اصلاح شده

$K_0$  به منظور کنترل سختی در سرعت‌های بزرگ بوده و  $x_0$  تغییر مکان اولیه فنر با سختی  $K_1$  است. لذا  $K_1 x_0$  نیروی اسمی تولید شده توسط القاگر می‌باشد.  $\alpha_0$  نیز ضریب تکاملی در نظر گرفته شده برای مدل می‌باشد. با تنظیم پارامترهای  $\gamma$ ،

$$J_i = \frac{1}{2} (u_i^T Q_a u_i + \dot{u}_i^T Q_v \dot{u}_i + \ddot{u}_i^T Q_d \ddot{u}_i + U_i^T R U_i) \quad (10)$$

در این شاخص،  $Q_d$ ،  $Q_v$  و  $Q_a$  ماتریس‌های وزنی مثبت نیمه‌معین  $n \times n$  هستند که به ترتیب مربوط به بازخورد جابجایی، سرعت و شتاب سازه می‌باشند.  $R$  نیز یک ماتریس مثبت معین  $r \times r$  است که ارزش نیروی کنترلی مورد نیاز را تعیین می‌کند. در روش کنترل بهینه لحظه‌ای، با کمینه کردن شاخص عملکرد  $J_i$  در هر لحظه می‌توان نیروی کنترلی  $U_i$  در آن لحظه را محاسبه نمود و بر این اساس نیروی کنترلی مورد نیاز در هر گام زمانی به صورت زیر به دست می‌آید.

$$U_i = -R^{-1} D^T K^{*-T} (Q_d u_i + \alpha_4 Q_v \dot{u}_i + \alpha_1 Q_a \ddot{u}_i) \quad (11)$$

$-T$  دلالت بر ترانزپوز معکوس ماتریس مورد نظر دارد. بدین ترتیب نیروی کنترلی در هر لحظه از سه بخش مرتبط با پاسخ-های جابجایی، سرعت و شتاب سازه تشکیل شده است. بنابر این می‌توان معادله حرکت را به صورت زیر باز نویسی و حل نمود:

$$([M] + [M_o]) \{ \Delta \ddot{u}(t) \} + ([C] + [C_o]) \{ \Delta \dot{u}(t) \} + ([K] + [K_o]) \{ \Delta u(t) \} = -[M] \cdot \{ L \} \cdot \ddot{x}_g \quad (12-الف)$$

$$M_o = \alpha_1 D R^{-1} D^T K^{*-T} Q_a \quad (12-ب)$$

$$C_o = \alpha_4 D R^{-1} D^T K^{*-T} Q_v \quad (12-ج)$$

$$K_o = D R^{-1} D^T K^{*-T} Q_d \quad (12-د)$$

که مقادیر  $M_o$ ،  $C_o$  و  $K_o$  در هر گام مقادیر ثابتی هستند [۱۱]. با استفاده از روابط (۲) تا (۱۲) پاسخ سازه در هر گام تخمین زده می‌شود. حال با وجود پاسخ سازه در هر لحظه می‌توان ولتاژ اعمالی بر میراگر MR را محاسبه و در نهایت نیروی کنترلی میراگر را به دست آورد.

### ۳- تعیین نیروی میراگر MR

در این تحقیق، از مدل بوک-ون اصلاح شده جهت محاسبه نیروی کنترلی میراگر MR استفاده می‌شود. جزئیات مربوط به

برای ملاحظه وابستگی نیرو به ولتاژ اعمال شده، پارامترهای  $C_0$ ،  $C_1$  و  $\alpha_0$  را می توان به صورت زیر فرمول بندی نمود:

$$C_0 = C_{0a} + C_{0b}u, \quad (۱۶-الف)$$

$$C_1 = C_{1a} + C_{1b}u, \quad (۱۶-ب)$$

$$\alpha_0 = \alpha_{0a} + \alpha_{0b}u, \quad (۱۶-ج)$$

در این بین  $u$  ولتاژ است که به صورت خروجی فیلتر مرتبه اول به صورت زیر بیان می گردد [۳].

$$\dot{u} = -\eta(u-V) \quad (۱۷)$$

انتخاب یک الگوریتم مناسب در کنترل نیمه فعال سازه ها یکی از چالش برانگیزترین موضوعات این مبحث می باشد، زیرا الگوریتم کنترل تأثیر قابل توجهی در عملکرد سیستم دارد. در این تحقیق از تئوری پایداری لیاپانوف در کنترل نیمه فعال سازه مورد نظر استفاده گردیده است. استفاده از این تئوری پایداری سیستم را تضمین می کند. بر اساس این تئوری مقدار ولتاژ ورودی ( $V$ ) بر اساس رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$V = V_{max} H\left(-Z^T [P_L] [B] \{F_d\}\right) \quad (۱۸)$$

در این رابطه  $H(\cdot)$  تابع پله ای هویساید و  $V_{max}$  حداکثر ولتاژ اعمالی می باشد.

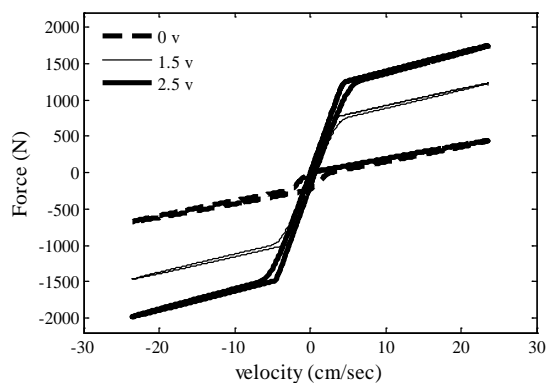
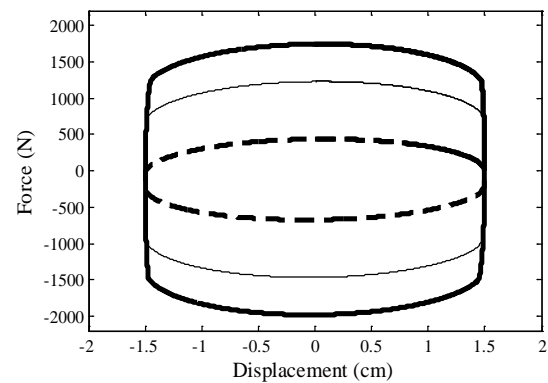
هنگامی که مقدار تابع  $H(\cdot)$  بزرگ تر از صفر باشد، ولتاژ به دست آمده جهت تولید نیرو کنترل برابر با  $V_{max}$  خواهد بود، در غیر این صورت ولتاژ حاصل مقداری برابر با صفر خواهد داشت که در آن  $[P_L]$  از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$[A^T] [P_L] + [P_L] [A] = -[Q_P] \quad (۱۹)$$

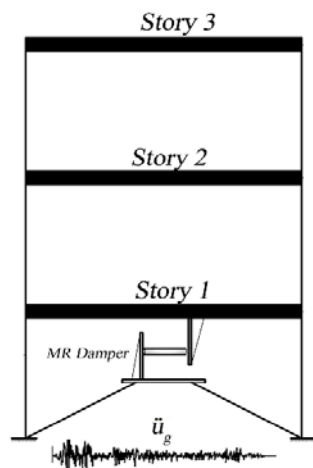
در رابطه بالا  $[Q_P]$  ماتریس واحد می باشد. معادله حرکت یک سازه را می توان با استفاده از روابط (۲۰) در فضای حالت بازنویسی نمود.  $Z$  بردار حالت با ابعاد  $2n \times 1$ ،  $A$  ماتریس سیستم با ابعاد  $2n \times 2n$ ،  $B$  و  $E$  به ترتیب ماتریس های توزیع نیروی کنترل و نیروی زلزله با ابعاد  $2n \times n$  و  $2n \times r$

$\beta$ ،  $A_d$  و  $n$  می توان شکل حلقه چرخه ای را کنترل نمود. جهت حل معادلات (۱۴) و (۱۵) از روش ران-کوتای مرتبه چهار استفاده شده است، همچنین برای اطمینان از صحت حل معادلات بوک-ون، ابتدا کاربرد آن با استفاده از کد نویسی در نرم افزار متلب<sup>۱</sup> برای یک جابجایی سیسنوسی با دامنه ۱/۵ سانتی-متر و تحت ولتاژهای صفر، ۱/۵ و ۲/۵ ولت بررسی گشته است. شکل (۲) نشان دهنده رفتار چرخه ای میراگر MR تحت این جابجایی سیسنوسی می باشد. رفتار صحیح غیر خطی میراگر MR در سرعت های نزدیک به صفر در شکل (۲) تایید کننده کاربرد صحیح معادلات بوک-ون در محاسبه نیروی کنترلی میراگر MR می باشد.

همچنین نتایج این شکل نشان می دهند که با افزایش ولتاژ محدوده رفتار غیر خطی میراگر افزایش داشته و نیروی کنترلی به دست آمده افزایش می یابد.



شکل ۲- رفتار چرخه ای میراگر MR تحت جابجایی سیسنوسی و با استفاده از مدل بوک-ون



شکل ۳- سازه مبنای سه طبقه

ارزیابی کارایی میراگر MR و الگوریتم کنترل بهینه لحظه‌ای در قالب ۱۰ معیار عملکرد ( $J_1 - J_{10}$ ) زیر و تحت اثر تحریکات لرزه‌ای ال- سنترو، لوماپریتا و کوبه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تعریف این معیارها از مقدار جذر میانگین مربعات<sup>۱</sup> و مقادیر حداکثر پاسخ‌های سازه استفاده می‌شود. جذر میانگین مربعات به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$RMS(x) = \sqrt{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)/n} \quad (21)$$

#### ۱-۱-۴- معیارهای ارزیابی عملکرد RMS پاسخ‌ها

پنج معیار ارزیابی عملکرد اول مربوط به RMS پاسخ‌های سازه در اثر زلزله است که به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$J_1 = \max_{i=1,2,3} \left\{ \frac{\sigma_{U_{sd,i}}}{\sigma_{u_{s,3}}^0} \right\} \quad (22)$$

$$J_2 = \max_{i=1,2,3} \left\{ \frac{\sigma_{\ddot{u}_{sa,i}}}{\sigma_{\ddot{u}_{sa,3}}^0} \right\} \quad (23)$$

که در آن  $\sigma_{U_{sd,i}}$  و  $\sigma_{\ddot{u}_{sa,i}}$  RMS جابجایی نسبی و شتاب مطلق کنترل شده طبقه  $i$ ام می‌باشد. همچنین  $\sigma_{u_{s,3}}^0$  و  $\sigma_{\ddot{u}_{sa,3}}^0$  RMS جابجایی نسبی و شتاب مطلق کنترل نشده طبقه سوم سازه تحت هر تحریک می‌باشند.

هستند. در این روابط پارامترهای  $r$  و  $n$  در بخش ۲-۱ معرفی گشته‌اند. این ماتریس‌ها را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\dot{Z} = AZ + BF_d + E\ddot{u}_g \quad (20-الف)$$

$$Z = \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}D \end{bmatrix} \quad (20-ب)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ M^{-1}D & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ r \end{bmatrix} \quad (20-ج)$$

#### ۴- مطالعه عددی سازه مبنا

##### ۴-۱- سازه مبنا و معیارهای ارزیابی عملکرد

به منظور بررسی کارآمدی روش جدید کنترل بهینه لحظه‌ای در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگر MR، از یک سازه سه طبقه مبنا که توسط کمیته کنترل سازه ASCE معرفی شده است، استفاده می‌گردد. این سازه یک ساختمان برشی سه طبقه مقیاس شده می‌باشد (شکل (۳)). جهت کاهش ارتعاشات این سازه یک میراگر MR بین طبقه اول و زمین قرار گرفته است. مشخصات جرم، سختی و میرایی این سازه به صورت زیر می‌باشد [۱۰]:

$$M_1 = M_2 = M_3 = 98.3 \text{ Kg}$$

$$K_1 = 5.16 \times 10^5 \text{ N/m}, K_2 = K_3 = 6.84 \times 10^5 \text{ N/m}$$

$$C_1 = 125 \frac{\text{N.s}}{\text{m}}, C_2 = C_3 = 50 \frac{\text{N.s}}{\text{m}}$$

پارامترهای مدل بوک-ون اصلاح شده برای میراگر MR در جدول (۱) آورده شده است. همچنین حداکثر ولتاژ اعمال شده به میراگر برابر با ۲/۵ ولت می‌باشد. ماتریس‌های وزنی استفاده شده در روش بهینه لحظه‌ای به صورت زیر می‌باشند:

$$Q_d = 0.5 \times \begin{bmatrix} 9 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}; Q_v = 2 \times \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$

همچنین ماتریس  $Q_a$  یک ماتریس واحد می‌باشد ( $Q_a = I_{3 \times 3}$ ). ماتریس‌های وزنی بالا به صورت سعی و خطا به دست آمده‌اند.

جدول ۱- پارامترهای مدل بوک-ون اصلاح شده [۳]

| واحد      | پارامترهای میراگر   | واحد     | پارامترهای میراگر |
|-----------|---------------------|----------|-------------------|
| N/cm      | $\alpha_{0a} = 14$  | $s^{-1}$ | $\eta = 190$      |
| N/cm/V    | $\alpha_{0b} = 695$ | N.s/cm   | $C_{1a} = 283$    |
| $cm^{-2}$ | $\gamma = 363$      | N.s/cm/V | $C_{1b} = 2/95$   |
| $cm^{-2}$ | $\beta = 363$       | N.s/cm   | $C_{0a} = 21$     |
| -         | $A = 301$           | N.s/cm/V | $C_{0b} = 3/5$    |
| cm        | $X_0 = 14$          | N/cm     | $k_0 = 46/9$      |
| -         | $n = 2$             | N/cm     | $k_1 = 5$         |

$$J_7 = \max_{i=1,2,3} \left\{ \frac{|\ddot{u}_{sd,i}|}{\dot{u}_{s,3}^0} \right\} \quad (28)$$

سایر معیارهای ارزیابی این گروه بیانگر پارامترهای جابجایی، سرعت و نیروی کنترل میراگر هستند.

$$J_8 = \max \left\{ \frac{|u_p|}{u_{s,3}^0} \right\} \quad (29)$$

$$J_3 = \max \left\{ \frac{\sigma_{u_p}}{\sigma_{u_{s,3}^0}} \right\} \quad (24)$$

$$J_9 = \max \left\{ \frac{|\dot{u}_p|}{\dot{u}_{s,3}^0} \right\} \quad (30)$$

$$J_4 = \max \left\{ \frac{\sigma_{\dot{u}_p}}{\sigma_{\dot{u}_{s,3}^0}} \right\} \quad (25)$$

$$J_{10} = \max \left\{ \frac{|F_d|}{W} \right\} \quad (31)$$

$$J_5 = \max \left\{ \frac{\sigma_{F_d}}{W} \right\} \quad (26)$$

در روابط بالا،  $u_{s,3}^0$ ،  $\dot{u}_{s,3}^0$  و  $\ddot{u}_{s,3}^0$  حداکثر پاسخهای کنترل نشده طبقه سوم می‌باشند و  $u_p$  و  $\dot{u}_p$  حداکثر جابجایی و سرعت میراگر هستند.

که  $\sigma_{u_p}$  و  $\sigma_{\dot{u}_p}$  برابر با RMS جابجایی و سرعت پیستون است و  $\sigma_{u_{s,3}^0}$  و  $\sigma_{\dot{u}_{s,3}^0}$  نیز جابجایی و سرعت کنترل شده طبقه سوم سازه هستند. همچنین  $\sigma_{F_d}$  برابر جذر میانگین مربعات نیروی کنترل میراگر MR و W وزن کل سازه می‌باشد.

#### ۴-۲- مقایسه با سایر مطالعات انجام شده

در ادامه، جهت تکمیل ارزیابی عملکرد میراگر MR و روش پیشنهادی تحقیق حاضر، مقایسه‌ای با یکی از مطالعات انجام شده بر روی سازه مبنا انجام می‌گیرد. بررسی الگوریتم بهینه کوتاه شده در سازه‌های مجهز به میراگر MR توسط Spencer و همکاران [۱]، یکی از مطالعات برجسته بر روی سازه مبنا می‌باشد که در آن معادله حرکت در فضای حالت حل شده است. در این روش یک کنترلر بهینه خطی به گونه‌ای طراحی می‌شود که نیروی کنترل مطلوب  $f_c$  مبتنی بر بردار اندازه‌گیری شده  $y$  (شامل پاسخ سازه، نیروی کنترل و نویز اندازه‌گیری شده) و همچنین نیروی  $f$  وارد بر سازه باشد، یعنی:

#### ۴-۱-۲- معیارهای ارزیابی عملکرد حداکثر پاسخها

در تعریف پنج معیار ارزیابی باقی‌مانده از حداکثر پاسخهای سازه تحت سه تحریک عنوان شده استفاده می‌گردد، که در آن  $J_6$  و  $J_7$  به ترتیب مربوط به جابجایی نسبی و شتاب مطلق حداکثر نرمال شده طبقات می‌باشند، همچنین  $J_8$ ،  $J_9$  و  $J_{10}$  به ترتیب نشان دهنده حداکثر جابجایی، سرعت و نیروی کنترل نرمال شده میراگر می‌باشند.

$$J_6 = \max_{i=1,2,3} \left\{ \frac{|u_{sd,i}|}{u_{s,3}^0} \right\} \quad (27)$$

میراگر MR از تحریک لرزه‌ای مقیاس شده ال-سنترو استفاده شده است، به گونه‌ای گام زمانی آن بر ۵ تقسیم شده است. [۳]. نمودار این تحریک لرزه‌ای مقیاس شده را می‌توان در شکل (۴) مشاهده نمود. در مطالعه حاضر جهت مقایسه پاسخ‌های به دست آمده با روش بهینه کوتاه شده، سازه مبنا تحت تحریک زلزله مقیاس شده ال-سنترو قرار می‌گیرد.

#### ۴-۳- بحث و نتایج عددی

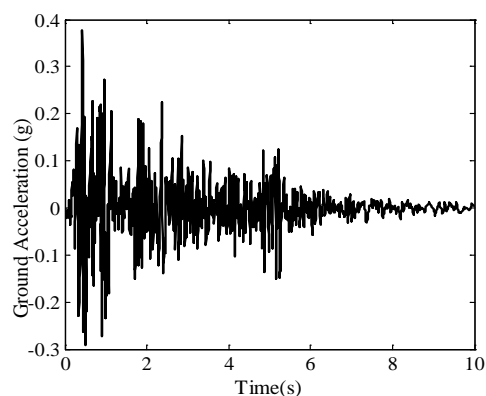
نتایج عددی کاربرد روش کنترل بهینه لحظه‌ای در حل معادله حرکت سازه‌های مجهز به میراگر MR، تحت رکورد مقیاس شده ال-سنترو در شکل‌های (۵) تا (۹) نشان داده شده است. بررسی نمودارهای مربوط به پاسخ جابجایی طبقه اول و شتاب طبقه سوم سازه (شکل‌های (۵) و (۹)) نشان می‌دهد که کاربرد میراگر MR در سازه موجب کاهش ارتعاشات لرزه‌ای آن شده است. نتایج مربوط به حداکثر پاسخ‌های مثبت سازه در جدول (۲) نشان داده شده است، همچنین میزان کاهش حداکثر پاسخ را می‌توان بر حسب درصد در جدول (۳) مشاهده نمود. با بررسی این جداول و نمودارهای به وضوح دیده می‌شود میراگر MR موجب کاهش حداکثر پاسخ جابجایی و شتاب سازه شده است. از آنجایی که میراگر به طور صلب بین طبقه اول و زمین قرار گرفته، میزان جابجایی و سرعت پیستون با مقدار جابجایی و سرعت طبقه اول برابر خواهد بود، یکسان بودن این مقادیر را می‌توان در جدول (۲) مشاهده نمود.

$$f_c = L^{-1} \left\{ -k_c(s) L \left( \begin{bmatrix} y \\ f \end{bmatrix} \right) \right\} \quad (32)$$

در این رابطه  $L\{\cdot\}$  تبدیل لاپلاس می‌باشد.  $k_c(s)$  در حقیقت تبدیل لاپلاس تابع انتقال فیلتر کالمن بوده و می‌تواند با استفاده از روش‌های ترکیبی زیادی به دست آید و نهایتاً ولتاژ مورد نیاز میراگر MR با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V = V_{max} H \{ (f_c - f) f \} \quad (33)$$

در رابطه بالا نیز  $H\{\cdot\}$  تابع پله‌ای هویساید می‌باشد.



شکل ۴- تحریک لرزه‌ای مقیاس شده ال-سنترو

از آنجایی که سازه استفاده شده در این تحقیق یک مدل مقیاس شده می‌باشد، جهت بررسی الگوریتم بهینه کوتاه شده در

جدول ۲- مقایسه نتایج کنترل نشده و کنترل شده نیمه فعال روش پیشنهادی

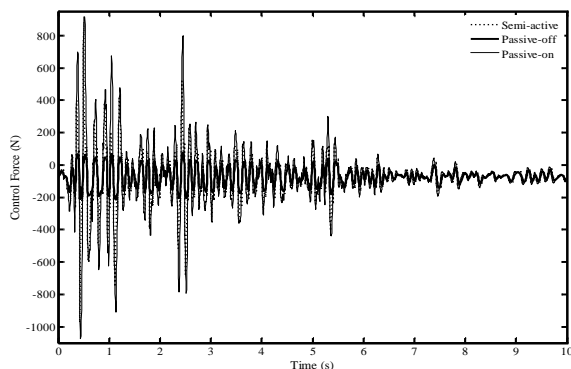
| لوما پریتا |            | کوبه      |            | ال- سنترو |            | طبقه | پارامتر                    |
|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|------|----------------------------|
| کنترل شده  | کنترل نشده | کنترل شده | کنترل نشده | کنترل شده | کنترل نشده |      |                            |
| ۰/۰۲۰      | ۰/۱۶       | ۰/۱۱      | ۰/۱۳۱      | ۰/۰۹      | ۰/۵۹       | ۱    | جابجایی حداکثر (cm)        |
| ۰/۰۳۶      | ۰/۲۵       | ۰/۱۸      | ۰/۲۰۵      | ۰/۱۷      | ۰/۹۱       | ۲    |                            |
| ۰/۰۸۶      | ۰/۲۶       | ۰/۲۱      | ۰/۲۴       | ۰/۲۳      | ۱/۰۷       | ۳    |                            |
| ۰/۰۴۸      | ۰/۲۱       | ۰/۲۱      | ۰/۳۱۵      | ۰/۴۳      | ۰/۹۹       | ۱    | شتاب حداکثر (g)            |
| ۰/۱۵       | ۰/۳۵       | ۰/۱۶      | ۰/۳۲       | ۰/۶۵      | ۱/۱۹       | ۲    |                            |
| ۰/۱۶       | ۰/۳۵       | ۰/۲۲      | ۰/۳۳       | ۰/۹۶      | ۱/۵۳       | ۳    |                            |
| ۴۱۰/۲۶     | -          | ۶۹۷/۸۳    | -          | ۸۸۴/۴۴    | -          | ۱    | نیروی کنترل حداکثر (N)     |
| ۰/۰۲       | -          | ۰/۰۱۱     | -          | ۰/۰۹      | -          | ۱    | جابجایی حداکثر پیستون (cm) |
| ۲/۴۵       | -          | ۴/۱۲      | -          | ۴/۵۳      | -          | ۱    | سرعت حداکثر پیستون (cm/s)  |
| ۱/۶۵       | -          | ۱/۶۵      | -          | ۱/۲۲      | -          | ۱    | ولتاژ حداکثر (V)           |



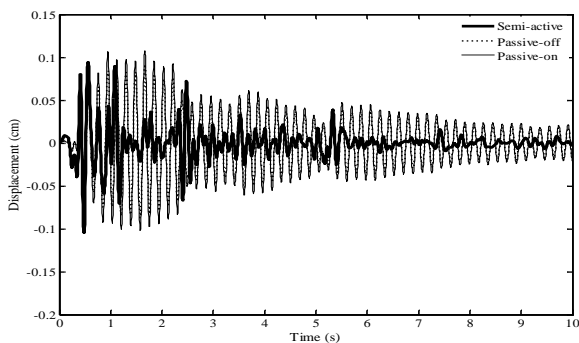
جدول ۳- میزان کاهش نتایج کنترل شده نیمه فعال با روش پیشنهادی

| شتاب طبقه اول (%) |             | جابجایی طبقه اول (%) |             | تحریکات لرزه‌ای |
|-------------------|-------------|----------------------|-------------|-----------------|
| RMS پاسخ          | حداکثر پاسخ | RMS پاسخ             | حداکثر پاسخ |                 |
| ۸۶/۲              | ۵۶/۶        | ۹۰/۲                 | ۸۴/۷        | ال- سنترو       |
| ۵۵/۳۸             | ۳۳/۳۳       | ۵۷/۴۴                | ۱۶/۰۸       | کوبه            |
| ۵۲/۸۲             | ۷۷/۵۰       | ۸۸/۰۹                | ۸۷/۵۰       | لوما پریتا      |

در جدول (۳) می‌توان درصد کاهش پاسخ‌ها را مشاهده نمود. مقادیر نشان داده شده در این جدول بازگویی کاهش قابل ملاحظه پاسخ‌های سازه در حالت کنترل شده می‌باشند. مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. با توجه به این که معیارهای ارزیابی در حالت کنترل نشده برابر با عدد ۱ می‌باشند (به جز معیارهای  $J_5$  و  $J_{10}$ )، مقدار هر معیار و فاصله آن از عدد ۱، میزان بهبود معیار ارزیابی عملکرد را نشان می‌دهد. معیارهای  $J_5$  و  $J_{10}$  نیز نشان دهنده نسبت نیروی کنترل به وزن کل سازه می‌باشند، مقادیر آن‌ها در جدول (۴) بیانگر این است که مقدار نیروی کنترل درصد ناچیزی از وزن سازه می‌باشد.

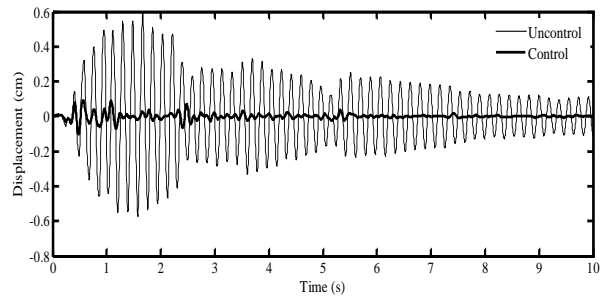


شکل ۵- تاریخچه زمانی نیروی کنترل میراگر MR با روش پیشنهادی تحت زلزله مقیاس شده ال- سنترو



شکل ۶- تاریخچه زمانی نیروی کنترل میراگر MR با روش پیشنهادی تحت زلزله مقیاس شده ال- سنترو

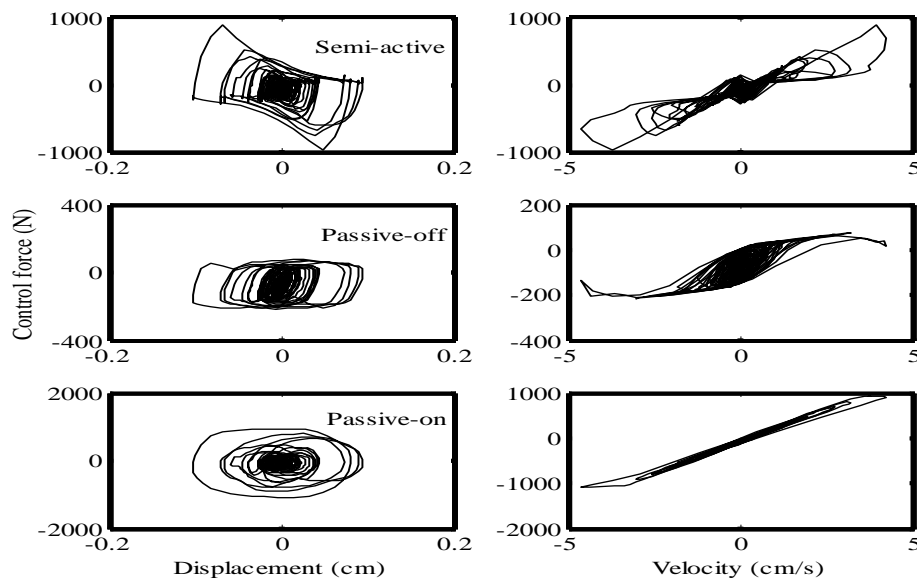
شکل (۶) تاریخچه زمانی نیروی کنترل میراگر MR در سه حالت نیمه فعال، پسیو آف (Passive-off) و پسیو آن (Passive-on) تحت زلزله ال سنترو نمایش می‌دهد. در حالت نیمه فعال، ولتاژ اعمالی از رابطه (۱۸) محاسبه می‌گردد، اما در دو حالت پسیو آف و پسیو آن مقدار ولتاژ ثابت و به ترتیب برابر با ۰ و ۲/۵ ولت در نظر گرفته شده است.



شکل ۷- تاریخچه جابجایی طبقه اول در حالت کنترل نیمه فعال با الگوریتم بهینه لحظه‌ای تحت تحریک مقیاس شده ال- سنترو

در حالت نیمه فعال، بازه مقدار نیروی کنترل اعمال شده به سازه در محدوده ظرفیت آن می‌باشد (ظرفیت میراگر ۱۰۰۰ نیوتن است) و در هر لحظه ولتاژ بر اساس پاسخ سازه محاسبه می‌گردد. نمودارهای شکل (۷) جابجایی طبقه اول سازه را در سه حالت نیمه فعال، پسیو آف و پسیو آن نشان می‌دهند. نمودارهای چرخه‌ای میراگر MR نیز در سه حالت گفته شده در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. رفتار غیر خطی میراگر MR را در سرعت‌های نزدیک به صفر می‌توان در نمودارهای نیرو-سرعت به خوبی مشاهده نمود.

همان طور که ذکر شد، یکی از مشکلات مطالعات عددی میراگر MR حل معادله حرکت آن می‌باشد به گونه‌ای که پاسخ به دست آمده و نیروی کنترل در تعامل مناسبی با یکدیگر باشند. منظور از تعامل مناسب پاسخ سازه و نیروی کنترل بازتاب رفتار صحیح میراگر در سرعت‌های مختلف است. نمودارهای شکل (۸) گویای این واقعیت هستند که روش کنترل لحظه‌ای روشی کارآمد در حل معادله حرکت سازه می‌باشد.



شکل ۸- نمودار چرخه‌ای میراگر MR با الگوریتم کنترل بهینه لحظه‌ای تحت زلزله مقیاس شده ال- سنترو

جدول ۴- نتایج معیارهای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در

حالت نیمه فعال

| معیارهای ارزیابی عملکرد | ال-سنترو | کوبه   | لوما پربتا |
|-------------------------|----------|--------|------------|
| J <sub>1</sub>          | ۰/۱۱۳    | ۰/۴۲۵  | ۰/۱۲۶      |
| J <sub>2</sub>          | ۰/۲۴۱    | ۰/۴۶۹  | ۰/۱۷۷      |
| J <sub>3</sub>          | ۰/۳۹۷    | ۰/۵۲۳  | ۰/۵۰۷      |
| J <sub>4</sub>          | ۰/۳۴۲    | ۰/۵۱۹  | ۰/۴۹۵      |
| J <sub>5</sub>          | ۰/۰۰۰۵   | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۳     |
| J <sub>6</sub>          | ۰/۱۸۹    | ۰/۳۴۳  | ۰/۲۴۷      |
| J <sub>7</sub>          | ۰/۵۶۲    | ۰/۹۳۵  | ۰/۵۸۴      |
| J <sub>8</sub>          | ۰/۳۳۲    | ۰/۵۲۱  | ۰/۴۴۳      |
| J <sub>9</sub>          | ۰/۳۰۲    | ۰/۵۴۵  | ۰/۴۳۸      |
| J <sub>10</sub>         | ۰/۰۰۳۴   | ۰/۰۰۳۲ | ۰/۰۰۱۸     |

مقایسه نتایج پاسخ‌های به دست آمده از روش کنترل لحظه-

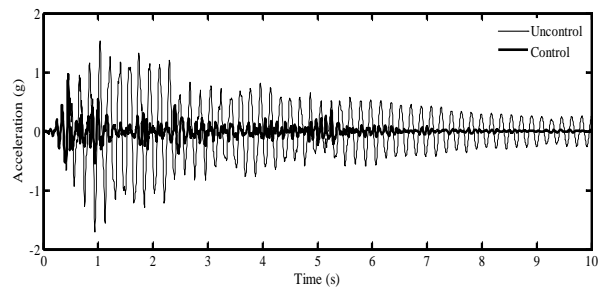
ای با روش‌های بهینه کوتاه شده تحت تحریک لرزه‌ای ال- سنترو در جدول (۵) آورده شده است. مقایسه این روش‌ها نشان می‌دهد که نتایج روش کنترل بهینه لحظه‌ای در محدوده قابل قبولی قرار دارد. به عنوان مثال جابجایی کنترل شده طبقه اول سازه با روش کنترل بهینه لحظه‌ای برابر با ۰/۰۹ cm می‌باشد. این در حالی است که مقدار این جابجایی در روش بهینه کوتاه شده برابر با ۰/۱۱ cm می‌باشد.

بنابر این نه تنها نتایج حاصل از روش کنترل بهینه لحظه‌ای در محدوده مناسبی می‌باشد، بلکه در برخی موارد نسبت به این الگوریتم نتایج بهتری از خود نشان می‌دهد. به عنوان مثال با مقایسه مقادیر حداکثر مورد نیاز مشاهده می‌شود که نیروی حاصل از روش حاضر ۶ درصد کمتر از مطالعه Spencer و همکاران [۱] می‌باشد. این در حالی است که علی‌رغم کاهش نیرو بهبود مناسبی در پاسخ‌ها مشاهده می‌شود.

جدول ۵- مقایسه نتایج حالت نیمه فعال روش کنترل بهینه لحظه‌ای با روش بهینه کوتاه شده تحت زلزله‌ای ال-سنترو

| حداکثر پارامتر  | طبقه | کنترل نشده | کنترل بهینه | بهینه کوتاه شده |
|-----------------|------|------------|-------------|-----------------|
| جابجایی (cm)    | ۱    | ۰/۵۹       | ۰/۰۹        | ۰/۱۱            |
|                 | ۲    | ۰/۹۱       | ۰/۱۷        | ۰/۱۸            |
|                 | ۳    | ۱/۰۷       | ۰/۲۳        | ۰/۲۱            |
| شتاب (g)        | ۱    | ۰/۹۹       | ۰/۴۳        | ۰/۷۱            |
|                 | ۲    | ۱/۱۹       | ۰/۶۵        | ۰/۷۵            |
|                 | ۳    | ۱/۵۳       | ۰/۹۶        | ۰/۷۱            |
| نیروی کنترل (N) | ۱    | -          | ۸۸۴/۴۴      | ۹۴۱             |

- [3] Dyke, S. J., Spencer, J. Sain, M. K., Carlson, J. D., "Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction", *Journal of Smart Material and Structures*, 1996, 5 (5), 565-575.
- [4] Kwok, N. M., Ha, Q. P., Nguyen, M. T., Li, J., Samali, B., "Bouc-Wen Model Parameter Identification for a MR Fluid Damper Using Computationally Efficient GA", *ISA Transactions*, 2007, 46 (2), 167-179.
- [5] Seung, Y. O., Junho, S., Kwan-Soon, P., "Optimal Design of Hysteretic Dampers Connecting Adjacent Structures Using Multi-Objective Genetic Algorithm and Stochastic Linearization Method", *Journal of Engineering Structures*, 2008, 30 (5), 1240-1249.
- [6] Zhu, W. Q., Luo, M., Dong, L., "Semi-active Control of Wind Excited Building Structures Using MR/ER Dampers", *Journal of Probabilistic Engineering Mechanics*, 2004, 19 (3), 279-285.
- [7] Dinh, Q., Truong, K., Kwan, A., "Nonlinear Black-Box Models and Force-Sensorless Damping Control for Damping Systems Using Magneto-Rheological Fluid Dampers", *Journal of Sensors and Actuators*, 2011, 167 (2), 556-573.
- [8] Dominguez, A., Sedaghati, R., Stiharu, I., "Modeling and Application of MR Dampers in Semi-adaptive Structures", *Journal of Computers and Structures*, 2008, 86 (3), 407-415.
- [9] Chung, L. L., Lin, R. C., Soong, T. T., Reinhorn, A. M., "Experiments on Active Control for MDOF Seismic Structures", *Journal of Engineering Mechanics*, 1989, 115 (8), 1609-1627.
- [10] Kim, S. B., Yun, C. B., "Sliding Mode Fuzzy Control: Theory and Verification on a Benchmark Structure", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2000, 29 (11), 1587-1608.
- [11] Joghataie, A., Mohebbi, M., "Optimal Control of Nonlinear Frames by Newmark and Distributed Genetic Algorithms", *Journal of the Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2012, 21 (2), 77-95.
- [12] Yang, J. N., Akbarpour, A., Ghaemmaghami, "Optimal Control Algorithms for Earthquake Excited Buildings", *The 2<sup>nd</sup> International Symposium of Structural Control*, Ontario, Canada, 15-17 July, 1985, pp 748-761.



شکل ۹- تاریخچه شتاب طبقه سوم در حالت کنترل نشده و کنترل شده نیمه‌فعال با روش پیشنهادی تحت زلزله ال-سنترو

## ۵- نتایج

در این تحقیق، روابط روش کلاسیک بتا با استفاده از الگوریتم کنترل لحظه‌ای جهت حل معادله حرکت سازه مجهز به میراگر MR، اصلاح گردید. جهت بررسی این روش، یک سازه مبنای سه طبقه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به دست آمده از کنترل نیمه‌فعال این سازه حاکی از کاهش قابل ملاحظه پاسخ‌های سازه مجهز به میراگر MR تحت زلزله‌های مختلف می‌باشد، به عنوان مثال جابجایی طبقه اول سازه در زلزله ال-سنترو به میزان ۸۴/۷ درصد و تحت زلزله کوبه و لوماپریتا به ترتیب به میزان ۱۶/۰۸ و ۸۷/۵۰ درصد کاهش یافته است. همچنین بررسی نمودارهای چرخه‌ای میراگر MR نشان می‌دهد که روش کنترل بهینه لحظه‌ای می‌تواند به درستی پاسخ‌های سازه را تخمین بزند به گونه‌ای که نیروی کنترلی میراگر MR و سرعت سازه در تعامل مناسبی باشند که منجر به رفتار صحیح میراگر MR در سرعت‌های مختلف می‌گردد. همچنین مقایسه این روش نوین با الگوریتم بهینه کوتاه شده نشان می‌دهد که نتایج این روش در محدوده قابل قبولی قرار دارد؛ به گونه‌ای که جابجایی کنترل شده طبقه اول و حداکثر نیروی کنترلی این دو روش به ترتیب دارای اختلافی در حدود ۱۸ و ۶ درصد می‌باشند. این اختلاف در حقیقت تأییدی بر کارایی روش پیشنهادی می‌باشد.

## ۶- مراجع

- [1] Spencer, J. Dyke, S. J., Sain, M. K., Carlson, J. D., "Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper", *Journal of Engineering Mechanics*, 1996, 123 (3), 230-238.
- [2] Kwok, N. M., Ha, Q. P., Nguyen, M. T., Li, J., Samali, B., "Bouc-Wen Model Parameter Identification for a MR Fluid Damper Using Computationally Efficient GA", 2007, 46 (2), 167-179.

- [13] Yang, J. N., Li, Z., Liu, S. C., "Stable Controllers for Instantaneous Optimal Control", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 118 (8), 1612-1630.
- [14] Bahar, O., Banan, M. R., Mahzoon, M., Kitagawa, Y., "Instantaneous Optimal Wilson- $\theta$  Control Method", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2003, 129 (11), 1268-1276.

**EXTENDED ABSTRACT**

## **Semi-active Control of Structures with MR Damper Using Modified Newmark Method Based on Instantaneous Optimal Control Algorithm**

Javad Katebi\*, Samira Mohammadyzadeh

*Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran*

**Received:** 09 December 2015; **Accepted:** 02 July 2016

---

**Keywords:**

Semi-active control, MR damper, Optimal control algorithm, Newmark method

---

### **1. Introduction**

Magnetorheological (MR) fluid damper shows great promising in semi-active control of civil engineering structures, in which, fault-safe, low-power consumption, force controllability and rapid response are its advantageous. However, a major drawback that hinders its application rests with the non-linear force/displacement and hysteretic force/velocity characteristics. With regard to building control, it is crucial that a tractable model of the MR damper should be available before any design in realizable controller. There are several MR damper models proposed in the literature using a range of techniques. Models obtained by a deterministic approach include Bingham, phenomenological, Bouc-Wen models. The Bingham model cannot represent nonlinear behavior of MR damper and may be considered as a simple model for the hysteresis characteristic. The Bouc-Wen model uses a differential equation to depict the non-linear hysteresis with moderate complexity and is widely applied in building controls [1]. Nonlinear dependent relation between damper control force, floors displacement and velocity does not allow to solve governing equation of motion which makes the structure response analyzing impossible. There are a few new methods for estimating the response of structure with MR damper. In the present study modified Newmark-Beta method based on the instantaneous optimal control algorithm is used to estimate the response of the coupled system with MR damper, for the first time.

### **2. Methodology**

Computing MR damper control force depends on piston displacement and velocity. On the other hand, calculating displacement and velocity is not independent of control force, too. So it is not feasible to determine control force and structures responses, for the next discrete time step, simultaneously. Because of the strong nonlinear behavior of MR dampers that emerged in Bouc-Wen model, the equation of motion of coupled structures becomes an involved equation and it is impossible to solve it with common time stepping methods [3]. In present paper, the instantaneous optimal control algorithm based on Newmark-Beta integration proposed by Yang et al. [4], is used for solving the involved equation without considering an especial control device interaction. In fact, in this model, optimal control force is computed by an instantaneous performance index that included structure responses at each time step  $i$  and different feedback of system states can be used in this index. In the instantaneous optimal control, at each time step  $i$ , the control force is computed by minimizing the performance index and the structure response can be estimated by this method. Estimated responses is led to calculate MR damper voltage and control force.

### **3. Results and discussion**

As proved in mentioned studies, using MR dampers is an appropriate method for reducing structures extra movements. MR damper control force time history has been studied in three different strategies (passive off, passive

---

\* Corresponding Author

*E-mail addresses:* jkatebi@tabrizu.ac.ir (Javad Katebi), s.mohammadyzadeh@gmail.com (Samira Mohammadyzadeh).

on and semi-active) which passive on strategy produces the most control force but not efficient reduction of structure response. However semi-active strategy applies average control force and decreases the response sufficiently. Reduction in damper displacement and velocity and nonlinear behavior of MR damper is shown in hysteresis loops in Fig. 1. Since the behavior of MR damper in low velocity, has been shown correctly in Fig. 1, it is proved that the optimal control algorithm is an efficient method to forecast the response of structures. Also, optimal control algorithm and Clipped-Optimal method comparison demonstrates that the optimal control algorithm obtained responses are in an appropriate range. The summary of results under three different earthquakes (El-Centro, Kobe, Loma prieta) have been shown in Table 1.

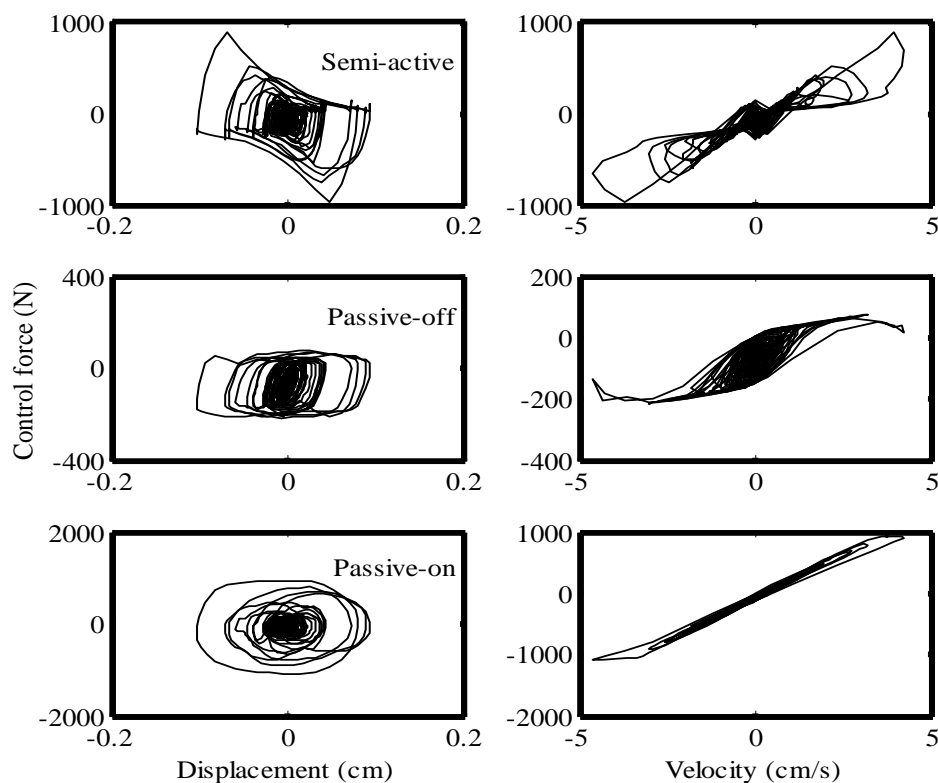


Fig. 1. Hysteresis loops of MR damper optimal control algorithm under El-Centro earthquake

Table 1. The summary of results

| Parameters                       | Story | El-Centro |        | Kobe  |        | Loma prieta |        |
|----------------------------------|-------|-----------|--------|-------|--------|-------------|--------|
|                                  |       | Unc*      | Cont** | Unc   | Cont   | Unc         | Cont   |
| Maximum displacement (cm)        | 1     | 0.59      | 0.09   | 0.131 | 0.11   | 0.16        | 0.02   |
|                                  | 2     | 0.91      | 0.17   | 0.205 | 0.18   | 0.25        | 0.036  |
|                                  | 3     | 1.07      | 0.23   | 0.24  | 0.21   | 0.26        | 0.086  |
| Maximum acceleration (g)         | 1     | 0.99      | 0.43   | 0.315 | 0.21   | 0.21        | 0.048  |
|                                  | 2     | 1.19      | 0.65   | 0.32  | 0.16   | 0.35        | 0.15   |
|                                  | 3     | 1.53      | 0.96   | 0.33  | 0.22   | 0.35        | 0.16   |
| Maximum control force (N)        | 1     | -         | 884.44 | -     | 697.83 | -           | 410.26 |
| Maximum piston displacement (cm) | 1     | -         | 0.09   | -     | 0.011  | -           | 0.02   |
| Maximum piston velocity (cm/s)   | 1     | -         | 4.53   | -     | 4.12   | -           | 2.45   |
| Maximum voltage (v)              | 1     | -         | 1.22   | -     | 1.65   | -           | 1.62   |

Unc\*: uncontrolled responses, Cont\*\*: controlled responses

#### 4. Conclusions

In this study structural control of a three story building is investigated. According to strong nonlinear behavior of MR damper, it is impossible to gain the structure response with common time step methods. Resolving this problem has been gained using instantaneous optimal control algorithm for calculating the control force, rewriting the equation of motion and estimating coupled system responses at time  $t$ . Results show that using MR damper is an efficient method for reducing structure response and optimal control algorithm is an appropriate method for solving equation of motion.

#### 5. References

- [1] Dyke, S. J., Spencer, Jr., Sain, M. K., Carlson, J. D., "Modeling and Control of Magneto Rheological Dampers for Seismic Response Reduction", *Journal of Smart Material and Structures*, 1996, 5 (5), 565-575.
- [2] Seung, Y. O., Junho, S., Kwan-Soon, P., "Optimal Design of Hysteretic Dampers Connecting Adjacent Structures Using Multi-Objective Genetic Algorithm and Stochastic Linearization Method", *Journal of Engineering Structures*, 2008, 30 (5), 1240-1249.
- [3] Dominguez, A., Sedaghati, R., Stiharu, I., "Modeling and Application of MR Dampers in Semi-adaptive Structures", *Journal of Computers and Structures*, 2008, 86 (3), 407-415.
- [4] Yang, J. N., Li Z., Liu, S. C., "Stable Controllers for Instantaneous Optimal Control", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 118 (8), 1612-1630.