

کنترل فعال دیوارهای آجری محصور

مسعود نکوئی^{*}، کارشناس ارشد گرایش زلزله دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف، تهران*

عبدالرضا جغتائی^{*}، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف، تهران**

* تلفن: ۰۲۱-۶۵۰۷۱۹۳، پست الکترونیکی: nekooei@mehr.sharif.edu

** تلفن: ۰۲۱-۶۱۶۴۲۱۶، پست الکترونیکی: joghatae@sina.sharif.edu

چکیده:

یکی از راههای حفظ و تقویت سازه‌های آجری در برابر زلزله‌های مخرب؛ استفاده از ابزار کنترل فعال می‌باشد. روش کنترل فعال سازه‌ها، سالهاست که در مورد سازه‌های فلزی وتنی مورد بررسی قرار می‌گیرد اما از این روش در کنترل سازه‌های آجری؛ استفاده ای حتی از لحاظ بررسی عددی نیز به عمل نیامده است. در این مقاله از روش کنترل فعال؛ در کنترل یک سازه آجری ساده (یک دیوار آجری) استفاده شده است. از آنجا که متداولترین سازه‌های آجری که در چند طبقه ساخته می‌شوند؛ سازه‌های آجری با دیوارهای محصور (کلاف بندی شده) می‌باشند لذا در این مقاله این نوع دیوارهای آجری مورد بررسی قرار گرفته اند. در این مقاله ابتدا مدل کامپیوتربی که برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی دیوارهای آجری محصور در نظر گرفته شده است، معروفی میگردد سپس الگوریتمی برای کنترل فعال اینگونه دیوارها ارائه می‌شود. در انتها نیز رفتار دینامیکی دیوارهای آجری محصور که به روش کنترل فعال در مقابل زلزله مقاوم شده اند؛ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلید واژه‌ها: دیوار آجری محصور، کنترل فعال، زلزله.

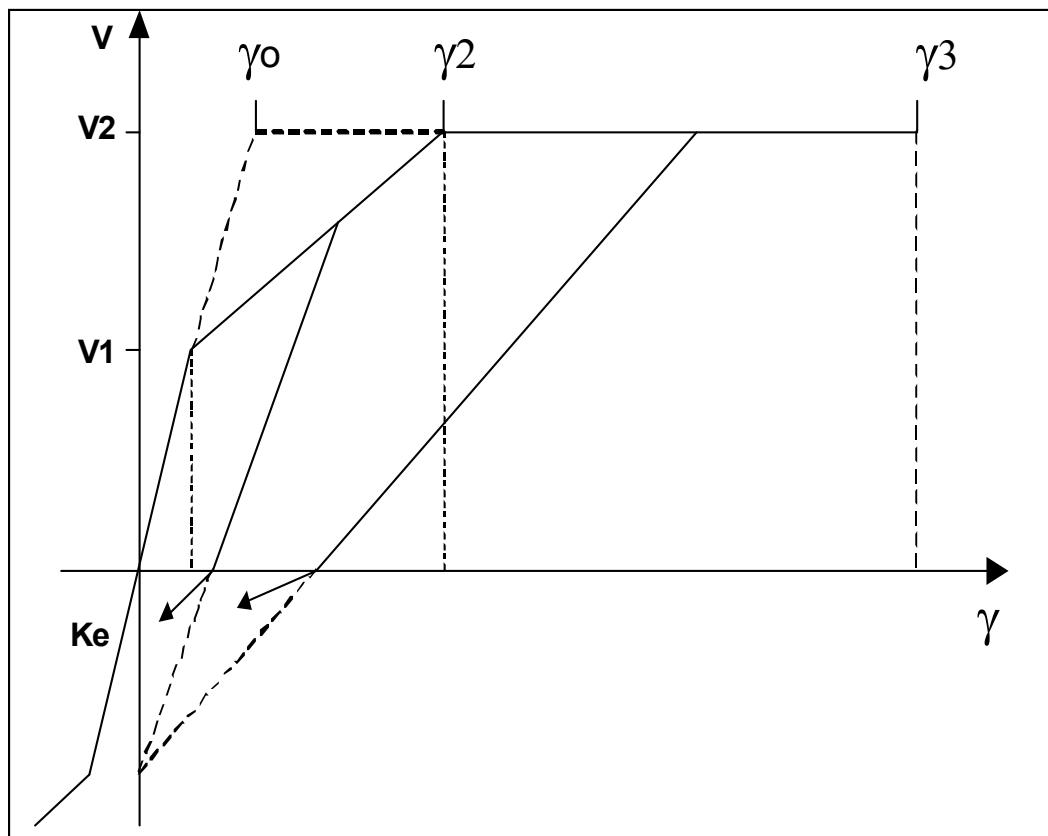
۱- مقدمه:

تا کنون بررسی‌های زیادی در مورد رفتار سازه‌های آجری صورت گرفته است. متداولترین این سازه‌ها، سازه‌های آجری محصور می‌باشند. از جمله کارهایی که در مورد سازه‌های آجری محصور صورت گرفته، می‌توان به کارهای Moroni و همکارانش [۱] اشاره کرد. آنها حدود ۵۰ آزمایش در مقیاس واقعی بر روی دیوارهای آجری محصور انجام دادند و همچنین یک مدل ساده برای رفتار غیر خطی دیوارهای آجری محصور بر اساس نتایج آزمایشگاهی خود ارایه کردند [۲-۳] از دیگر کسانی هستند که در این زمینه کار کردند. آنها بر اساس Klemenc و Tomazevic آزمایشاتی که بر روی دیوارهای آجری محصور با مقیاس ۱:۵ انجام دادند، یک مدل سه خطی برای منحنی پوش پسماند این نوع دیوارها ارایه کردند. همچنین آنها یک سری آزمایشات میز لرزان بر

روی دو مدل از یک ساختمان آجری محصور انجام دادند . از طرفی مقوله کنترل فعال سازه ها نیز سالهاست که در مورد سازه های فلزی و بتونی مورد بررسی قرار می گیرد . از جمله این کارها می توان به کارهای Yang و همکارانش [۴] در زمینه کنترل بهینه خطی و غیر خطی سازه ها و همچنین کارهای Ghaboussi و همکارانش [۶-۵] در زمینه استفاده از شبکه عصبی در کنترل خطی و غیر خطی سازه ها نام برد . اما تا کنون از روش کنترل فعال سازه ها در کنترل سازه های آجری ، استفاده ای حتی از لحاظ بررسی عددی نیز به عمل نیامده است که در این مقاله سعی می شود تا حدودی به این مقوله پرداخته شود .

۲- مدل تحلیلی دیوار آجری محصور :

بر اساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده ، یک مدل تحلیلی ساده جهت پیش بینی رفتار غیر خطی دیوارهای آجری محصور ، توسط Moroni و همکارانش [] ارایه شده است که در این مقاله از این مدل در شبیه سازی رفتار دینامیکی دیوار آجری استفاده می شود . این مدل ، دیوار آجری محصور شده را به صورت یک فنر برشی درنظر می گیرد که سختی آن از یک مدل سه خطی اولیه و حلقه های هیسترزیس کاهش سختی شبیه شکل ۱ پیروی می کند .



شکل ۱ : مدل رفتار غیر خطی دیوار آجری محصور

پارامترهای γ_0 ، γ_2 ، γ_3 و V_1 ، K_e و V_2 به صورت زیر تعریف می‌شوند:

V_1 : نیروی جانبی برابر با سطح تسیلیم اولیه، یعنی حالتی که بعد از آن دیوار شروع به رفتار غیر

خطی می‌کند، مطابق با کرنش برشی ۱/۲۴۰۰

V_2 : بار جانبی ماکزیمم

K_e : سختی موثر فنر برشی

γ_0 : کرنش مربوط به سیستم الاستوپلاستیک با سختی K_e و بار جانبی V_2

γ_2 : کرنش مربوط به لحظه رسیدن به بار جانبی V_2

γ_3 : کرنش نهایی که بعد از آن دیوار تخریب شده فرض می‌شود.

کاهش سختی با مشخص کردن یک نقطه عمومی بر روی محور بار که در این مقاله منطبق بر V_1

است درنظر گرفته می‌شود، به این ترتیب که خطوط باربرداری به سمت این نقطه هدف گیری می‌کنند و

هنگام تقاطع با محور تغییر مکان، به سمت نقطه ماکزیمم یا می‌نیمم قبلی جهت گیری می‌کنند. بار جانبی

V_1 نیز وابسته به بار عمودی اعمال شده σ_0 ، مقاومت برشی مصالح τ_m و سطح مقطع دیوار A_m می‌باشد و

با بهره گیری از روش حداقل مربعات در مورد داده‌های تجربی، از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$V_1 = (0.19 \tau_m + 0.12 \sigma_0) A_m \quad (1)$$

بار جانبی V_2 نیز با همان روش بدست می‌آید:

$$V_2 = (0.37 \tau_m + 0.43 \sigma_0) A_m \quad (2)$$

مقادیر γ_2 و γ_3 نیز از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\gamma_2 = \alpha_1 \gamma_0 \quad (3)$$

$$\gamma_3 = \alpha_2 \gamma_0 \quad (4)$$

$$\gamma_0 = (V_2 / K_e) / h \quad (5)$$

که در این روابط h ارتفاع دیوار و α_1 و α_2 ضرایبی هستند که از آزمایش بدست می‌آیند. در این

مقاله میرایی دیوار، معادل ۵٪ در نظر گرفته می‌شود که مطابق با پیشنهاد Moroni و همکارانش [۱] می‌

باشد. مشخصات دیگر دیوار آجری محصور به کار برده شده در این مقاله به قرار زیر است:

۱- سختی موثر اولیه و نیز سختی ثانویه دیوار به ترتیب برابر ۴۳۲۶۲۱ و ۴۹۵۴۴ نیوتون بر سانتیمتر

می‌باشد.

۲- مقاومتهاهای الاستیک و پلاستیک دیوار به ترتیب برابر ۳۴۴۱۵ و ۹۷۵۲۵ نیوتون می‌باشد.

۳- میرایی دیوار برابر ۱۸۵۰ نیوتون - ثانیه بر سانتیمتر می‌باشد.

۴- سریار دیوار آجری که به عنوان جرم مت مرکز در بالای آن فرض شده، برابر ۱۵۸ نیوتون -

مجذور ثانیه بر سانتیمتر می‌باشد.

۳- الگوریتم کنترل فعال دیوار آجری محصور:

همانطورکه در کارهای Yao و اکثر کارهای تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است آمده

است [۷] ، یک سیستم کنترل سازه ای فعال شامل بخش‌های زیر می باشد :

۱. سنسورهایی که برای اندازه گیری تحریکات خارجی یا تغییرات پاسخ سازه در سازه نصب می شوند .

۲. وسیله ای که اطلاعات اندازه گیری شده را پردازش می کند و نیروی کنترلی لازم را بر اساس الگوریتم کنترل ، محاسبه می نماید .

۳. تحریک کننده ای که بوسیله منابع انرژی خارجی تغذیه می شود تا نیروهای لازم را به سازه وارد کند .

برای بررسی اثر بکار بردن نیروهای کنترلی در رفتار سازه ، یک سیستم با جرم متغیر و دارای فنر و میراگر در نظر گرفته می شود. معادله حرکت این سازه را می توان بصورت زیر نوشت :

$$\bar{M} \ddot{\bar{Y}}(t) + \bar{C} \dot{\bar{Y}}(t) + \bar{K} \bar{Y}(t) = \bar{D} \bar{U}(t) + \bar{E} \bar{F}(t) \quad (6)$$

که $\bar{K}, \bar{C}, \bar{M}$ به ترتیب ماتریسهای جرم ، میرایی و سختی $n \times n$ می باشند . $\bar{F}(t)$ بردار تحریکات خارجی با بعد r می باشد و $\bar{U}(t)$ بردار نیروهای کنترلی با بعد m می باشد . ماتریس $\bar{D}, n \times m$ و ماتریس $\bar{E}, n \times r$ به ترتیب ماتریسهای موقعیت نیروهای کنترل و تحریکات خارجی می باشند. $\bar{Y}(t)$ نیز بردار جابجایی سازه می باشد .

حال فرض می کنیم یک سیستم کنترلی حلقه بسته داریم که نیروی کنترلی آن تابع خطی از بردار سرعت اندازه گیری شده سازه می باشد که در این صورت بردار نیروی کنترلی را می توان بصورت زیر نشان داد :

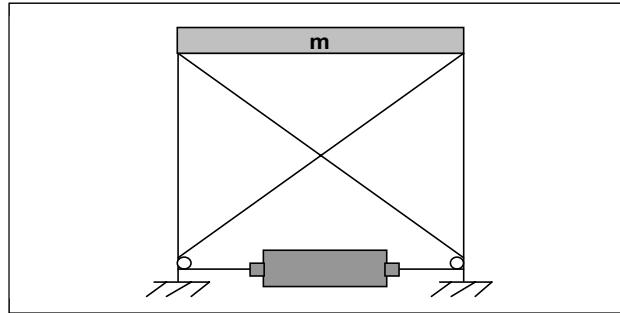
$$\bar{U}(t) = \bar{C}_1 \dot{\bar{Y}}(t) \quad (7)$$

که ماتریس \bar{C}_1 بستگی به کنترل انجام شده دارد و می تواند تابعی از زمان نیز باشد. از جایگذاری معادله (7) در معادله (6) رابطه زیر بدست می آید :

$$\bar{M} \ddot{\bar{Y}}(t) + (\bar{C} - \bar{D} \bar{C}_1) \dot{\bar{Y}}(t) + \bar{K} \bar{Y}(t) = \bar{E} \bar{F}(t) \quad (8)$$

از مقایسه معادله (8) با معادله (6) بدون حضور نیروی کنترلی ، اینگونه مشاهده می شود که این کنترل حلقه بسته ، با تغییر دادن در پارامتر میرایی سازه باعث می شود سازه پاسخ مناسب تری نسبت به تحریکات خارجی وارد از خود نشان دهد. از این سیستم کنترلی، در این مقاله برای کنترل فعال دیوار آجری محصور در برابر زلزله استفاده می شود.

در این مقاله دیوار آجری محصور به صورت یک سازه یک درجه آزادی فرض شده که نیروی کنترل بوسیله یک محرک الکتروهیدرولیک که با کابل به دیوار متصل شده است، به آن وارد می شود (مطابق شکل ۲).



شکل ۲: نحوه اتصال محرک الکتروهیدرولیکی به سازه یک درجه آزادی

۴- حل عددی معادله دیفرانسیل حرکت:

در این مقاله از روش گام به گام انتگرالگیری تابعی ویلسون برای حل معادله دیفرانسیل حرکت سازه استفاده شده است. بطور خلاصه می توان [۸] روش گام به گام انتگرالگیری تابعی ویلسون را برای حل دستگاه معادلات حرکت غیر خطی سازه با فرض مشخص بودن بردارهای سرعت و جابجایی اولیه سازه، به شرح زیر بیان کرد:

۱- انتخاب گام زمانی h و ضریب θ (معمولًا برابر $1/4$) و محاسبه $\tau = \theta \times h$.

۲- بدست آوردن دستگاه معادلات نموی حرکت بصورت زیر :

$$\overline{M} \ddot{\Delta \bar{Y}_i} + \overline{C} \dot{\Delta \bar{Y}_i} + \overline{K} \bar{Y}_i = \hat{\Delta \bar{F}_i} \quad (9)$$

که در این رابطه \overline{M} ماتریس جرم و \overline{C} و \overline{K} ماتریسهای میرایی و سختی سازه می باشند که تابعی از سرعت و جابجایی می باشند. \bar{Y} ، $\dot{\bar{Y}}$ و $\ddot{\bar{Y}}$ به ترتیب بردارهای جابجایی، سرعت و شتاب سازه می باشند.

در این رابطه علامت $\hat{\Delta}$ بیانگر آن است که مقادیر نمو مربوط به گام زمانی $\tau = \theta \times h$ می باشند.

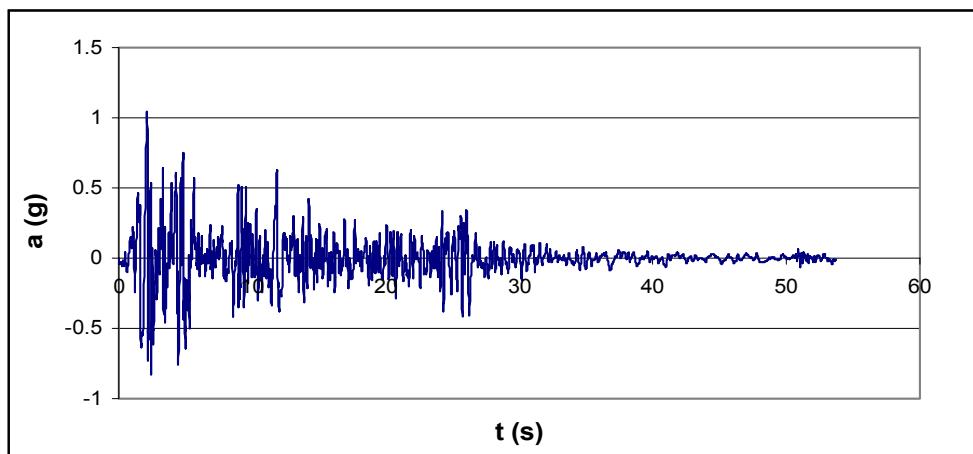
۳- حل دستگاه معادلات نموی حرکت بر اساس گام زمانی تغییریافته τ مانند روش شتاب خطی.

۴- تصحیح مقادیر بدست آمده برای گام زمانی انتگرالگیری h .

در این مقاله دیوار آجری محصور مانند یک سازه یک درجه آزادی با جرم متغیر، فتر و میراگر در نظر گرفته شده است. همچنین گام زمانی انتگرالگیری h ، در محاسبات برابر $2/000$ ثانیه در نظر گرفته شده است.

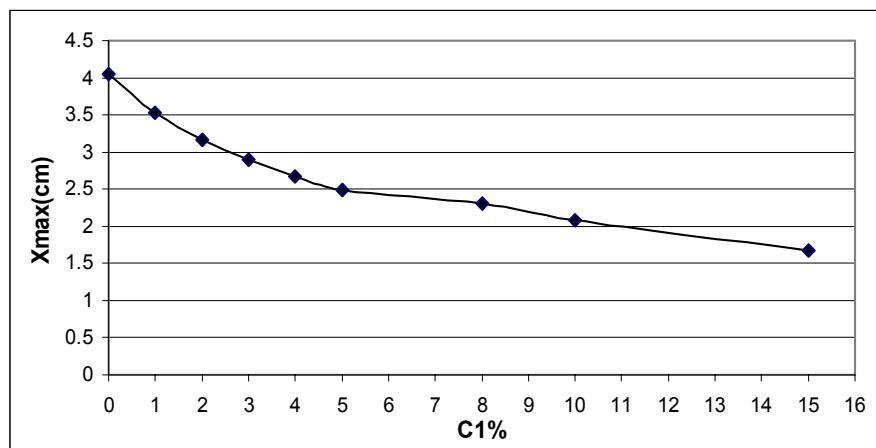
۵- بررسی نتایج عددی :

طیف زلزله اعمال شده در این مقاله، طیف زلزله استترو می باشد که با بزرگنمایی^۳ بکار برده شده است تا تاثیر کنترل فعال برپاسخ دیوار آجری محصور در برابر زلزله بهتر مشاهده شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین تخریب دیوار آجری محصور نیز در این بررسی لحاظ نشده است.

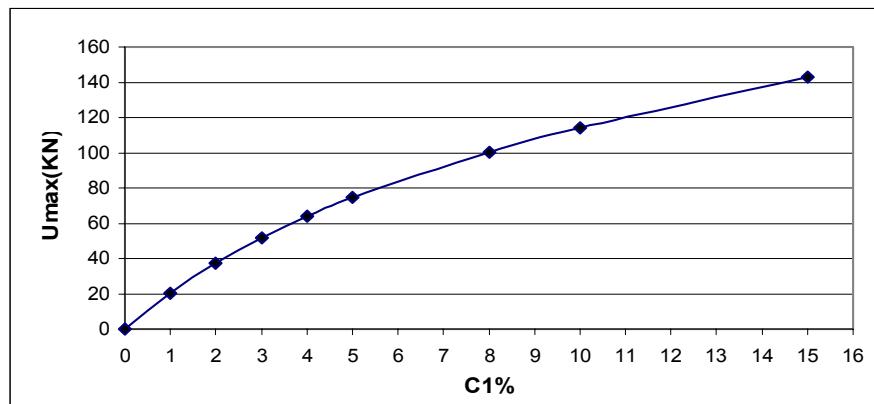


شکل ۳: طیف زلزله استترو با بزرگنمایی^۳

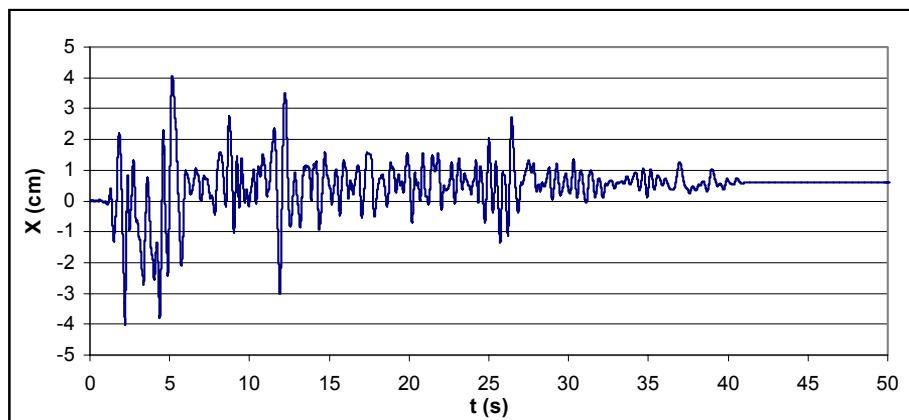
همانطور که قبلاً ذکر شد، نیروی کنترل واردہ تابعی از سرعت سازه است و بصورت یک میرایی معادل اضافی برای سازه عمل می کند. در این مقاله کنترل فعال دیوار آجری محصور برای حالت‌های میرایی معادل ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪، ۵٪، ۷٪، ۱۰٪، ۱۵٪ بکار برده شده است. نتایج این کنترلهای بصورت جابجایی ماکریم دیوار آجری محصور و نیروی کنترل بیشینه واردہ به ازای حالت‌های مختلف میرایی معادل، در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است.



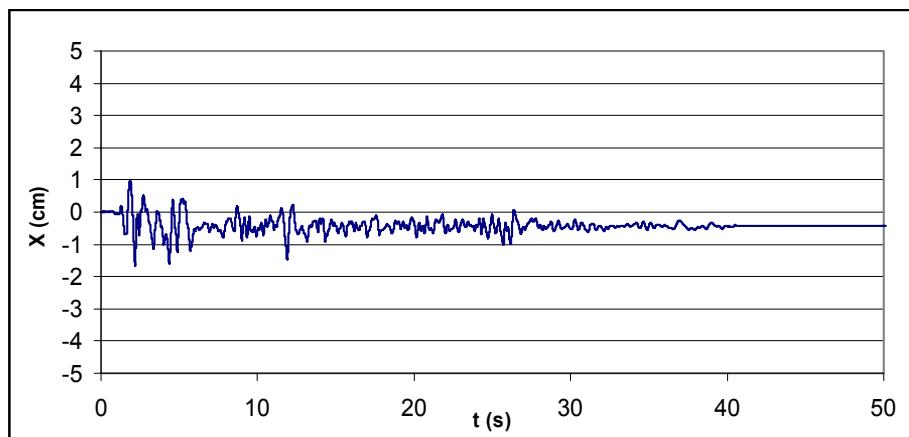
شکل ۴: جابجایی ماکریم دیوار آجری محصور به ازای حالت‌های مختلف میرایی معادل



شکل ۵: ماکریسم نیروی کنترل واردہ به ازایی حالت‌های مختلف میرایی معادل همانطور که در این شکلها دیده می‌شود پاسخ دیوار آجری محصور در برابر زلزله در اثر کنترل فعال بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. پاسخ دیوار آجری محصور در برابر زلزله بدون کنترل فعال و با کنترل فعال معادل میرایی ۱۵٪، در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶: پاسخ دیوار آجری محصور در برابر زلزله بدون کنترل فعال



شکل ۷: پاسخ دیوار آجری محصور در برابر زلزله با کنترل فعال معادل میرایی ۱۵٪

۶- نتیجه گیری :

همانطور که در نتایج عددی مشاهده شد ، با استفاده از روش کنترل فعال سازه ها و تغییر در پارامتر میرایی ، پاسخ دیوار آجری محصور در برابر زلزله بطور قابل ملاحظه ای کاهش یافت . البته برای بررسی کامل کنترل فعال دیوارهای آجری محصور باید موضوعات دیگری را نیز مورد بررسی قرار داد که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره کرد :

- ۱- ماکریزم نیروی کنترلی که می توان به سازه وارد کرد(ظرفیت محرکهای الکترو هیدرولیکی).
- ۲- اندر کنش دیوار آجری محصور و محرک الکترو هیدرولیکی .
- ۳- کنترل فعال یک سازه آجری محصور چند طبقه با در نظر گرفتن معیار خرابی دیوارها .
- ۴- بکارگیری مدل دقیقتری برای رفتار غیر خطی دیوار آجری محصور که کاهش مقاومت را نیز شامل شود .

که هر کدام از موضوعات فوق خود می تواند زمینه کارهای تحقیقاتی بعدی قرار گیرد .

۷- مراجع :

- [1] Moroni, M.-O., Astroza, M. and Tavonatti, S., "Nonlinear Models for Shear Failure in Confined Masonry Walls," *The Masonry Soc. J.*, V. 12, No. 2, 1994, pp. 72-78.
- [2] Tomazevic, M. and Klemenc, I., "Seismic Behaviour of Confined Masonry Walls," *Earthquake Engrg. and Struct. Dynamics*, V. 26, 1997, pp. 1059-1071.
- [3] Tomazevic, M. and Klemenc, I., "Verification of Seismic Resistance of Confined Masonry Buildings," *Earthquake Engrg. and Struct. Dynamics*, V. 26, 1997, pp. 1073-1088.
- [4] Yang, J.-N., Li, Z. and Vongchavalitkul, S., "Generalization of Optimal Control Theory : Linear and Nonlinear Control," *J. of Engrg. Mechanics*, V. 120, No. 2, 1994, pp. 266-283.
- [5] Ghaboussi, J. and Joghataie, A., "Active Control of Structures Using Neural Networks," *J. of Engrg. Mechanics*, V. 121, No. 4, 1995, pp. 555-567.
- [6] Bani-Hani, K. and Ghaboussi, J., "Nonlinear Structural Control Using Neural Networks," *J. of Engrg. Mechanics*, V. 124, No. 3, 1998, pp. 319-327.
- [7] Soong, T.-T., "Active Structural Control," Longman Scientific & Technical, New York, 1990, 191 pp.
- [8] Paz, M., "Structural Dynamics," Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1985, 561 pp.