

## بررسی عددی پارامترهای تاثیرگذار در پاسخ سیستم‌های کنترل شده غیرفعال ویسکوز

غلامرضا هوایی<sup>۱\*</sup>، علیرضا زارع<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
۲- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### چکیده

در این مقاله تمامی پارامترهای تاثیرگذار در پاسخ سیستم‌های کنترل شده غیرفعال ویسکوز مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا منظور از پاسخ، حداکثر دررفت و حداکثر شتاب مطلق وارد بر جرم طبقات می‌باشد. حداکثر دررفت به عنوان شاخص خرابی در اجزای سازه‌ای و حداکثر شتاب مطلق به عنوان شاخص خرابی در اجزای غیرسازه‌ای و ادوات حساس به شتاب در ساختمان‌ها محسوب می‌گردند. بر اساس بررسی‌های به عمل آمده پارامترهای تاثیرگذار در پاسخ این سیستم‌ها عبارت‌اند از سختی اولیه و مقاومت سازه، میزان میرایی الحاقی موجود در سیستم، سختی مهارنده‌های متصل کننده میراگر به سازه و تعداد طبقات. برای نشان دادن تاثیر هر یک از پارامترهای برشمرده، تعداد زیادی سیستم غیرفعال خطی و غیرخطی مورد آنالیز تاریخیچه زمانی قرار گرفت. در آنالیزهای بکاررفته برای کاهش تاثیر فرکانس‌های غالب در تحریک ورودی و همچنین برای جامع نمودن نتایج از دو تحریک نوفه سفید با شتاب حداکثر 1g به عنوان ورودی سیستم‌ها استفاده گردید. نتایج نشان داد، کاهش سختی و مقاومت به عنوان پارامترهای کلیدی در کاهش شتاب مطلق و افزایش سختی مهارنده‌ها و میرایی الحاقی به عنوان تاثیرگذارترین پارامترها در کاهش دررفت حداکثر طبقات محسوب می‌گردند. این بدان معناست که چنانچه در طراحی سازه‌های غیرفعال صرف افزایش میرایی الحاقی میراگرها مد نظر قرار گیرد احتمال افزایش شتاب مطلق وارد بر طبقات افزایش یافته و به تبع آن اجزای حساس به شتاب در ساختمان‌ها بیشترین خرابی را هنگام زلزله تجربه خواهند نمود.

کلمات کلیدی: سیستم غیرفعال، ویسکوز، میرایی، مقاومت، سختی، سختی مهاربند.

\* نویسنده مسئول: غلامرضا هوایی

پست الکترونیکی: havaei@aut.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2017.86867.1199

شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.86867.1199>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۴

## ۱- مقدمه

کاهش اثرات ناشی از تحریکات ورودی به سازه از دیرباز مورد توجه مهندسين عمران قرار گرفته است. افزایش سختی و مقاومت به عنوان رایج‌ترین روش‌ها در کاهش اثرات ناشی از این تحریکات محسوب می‌گردد. به طور نمونه آیین‌نامه‌های متداول بارگذاری لرزه‌ای [۱] برای مقابله با زلزله‌های با دوره بازگشت بالاتر نیروی طراحی بالاتر و به تبع سختی و مقاومت بالاتر در طراحی را ملزم می‌دارند. این روش‌ها به عنوان هدف طراحی، کاهش دریافت طبقات را به عنوان مهمترین پارامتر در نظر می‌گیرند.

استفاده از روش‌های کنترلی به عنوان ادوات مستهلک کننده انرژی ورودی به سازه، روشی موثر در مهندسی عمران محسوب می‌گردد که از بین این روش‌ها، کنترل کننده‌های غیرفعال از نوع میراگرهای ویسکوز به عنوان یکی از سیستم‌های موثر و متداول در کاهش پاسخ‌های وارده بر سازه شناخته شده اند. در این روش کنترلی به طور غالب میرایی سیستم افزایش یافته [۲] و به تبع آن استهلاک انرژی معطوف به زیاد شدن این پارامتر در سازه می‌باشد.

کاهش شتاب مطلق وارد بر جرم طبقات در هنگام تحریک سازه نیز به عنوان پارامتر تاثیر گذار جدیدتری در علم مهندسی سازه محسوب می‌گردد [۳-۶]. کاهش شتاب مطلق برای جلوگیری از آسیب به اجزای غیرسازه‌ای و به طور کلی تجهیزاتی که حساس به شتاب می‌باشند به عنوان پارامتری کلیدی محسوب می‌گردد [۷]. علاوه بر این موضوع، کاهش شتاب مطلق برای افزایش سطح آسایش ساکنین تحت ارتعاشات ورودی ضروری به نظر می‌آید [۶].

برخلاف دریافت طبقات، افزایش سختی و مقاومت و همچنین افزایش میرایی می‌تواند اثری منفی در شتاب مطلق وارد بر طبقات داشته باشد [۷]. این موضوع در مرجع [۷] برای سیستم یک درجه آزادی مورد واریسی قرار گرفته است.

علاوه بر موارد برشمرده، یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در طراحی سیستم‌های غیرفعال، سختی محدود مهاربندهای متصل کننده میراگر به سازه اصلی می‌باشد [۸، ۶]. این پارامتر در بدترین شرایط می‌تواند باعث بی‌اثر شدن اثر سیستم میراگر گردد و در شرایطی نیز افزایش شتاب وارد بر طبقات را به همراه خواهد داشت.

با توجه به توضیحات ارائه شده، در طراحی سازه‌های چند درجه آزادی پارامترهای بسیار زیادی وجود دارند که طراح بایستی در پروسه طراحی مورد توجه قرار دهد. موضوع زمانی پیچیده‌تر می‌گردد که رفتار سیستم مورد طرح به صورت غیرخطی در نظر گرفته شود. با تسلیم شدن طبقات معادله حرکت حاکم بر سیستم تغییر نموده و اثر هریک از پارامترهای برشمرده، به تبع تغییر خواهد نمود. چنانچه کاهش دریافت طبقات به همراه کاهش شتاب مطلق مدنظر باشد طراح ملزم به دارا بودن دید مناسب در خصوص تاثیرات ناشی از تغییر هر پارامتر در نتیجه نهایی می‌باشد.

در این پژوهش اثرات ناشی از تغییرات سختی اولیه طبقات (تغییرات ناشی از پیوند اول نوسان سیستم خطی)، اثرات ناشی از مقاومت طراحی طبقات (تغییرات ناشی از ضریب کاهش مقاومت)، اثرات ناشی از افزودن میرایی الحاقی به سیستم و اثرات ناشی از سختی مهاربند متصل کننده میراگر به سازه اصلی بر روی دریافت و شتاب مطلق حداکثر مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور سیستم‌های خطی و غیرخطی بی‌شماری تحت ۲ تحریک نوفه سفید مورد آنالیز قرار گرفته و نمودار تغییرات پاسخ‌های سیستم، شامل دریافت حداکثر و شتاب مطلق طبقات تحت این متغیرها در انتها ارائه گردیده است.

## ۲- معادلات نوسان

با توجه به این موضوع که در این مطالعه پاسخ سیستم‌های خطی و غیرخطی غیرفعال در سازه‌های با رفتار برشی مورد بررسی قرار می‌گیرد، معادله نوسان سیستم با توجه به در نظر گرفتن سختی مهاربندهای متصل کننده میراگر به سازه به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۹]. لازم به توضیح است که رفتار غیرخطی فنرهای سازه به صورت ایده آل خطی-پلاستیک در نظر گرفته شده است:

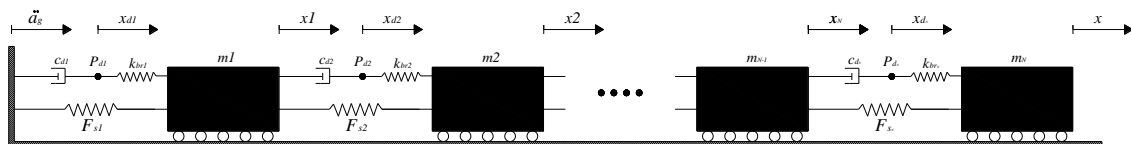
$$\mathbf{M}\mathbf{a}(t) + \mathbf{C}\mathbf{v}(t) + \mathbf{F}_s(t) = \mathbf{D}\mathbf{P}_d(t) - \mathbf{M}\mathbf{1}a_g(t) \quad (1)$$

در معادله فوق ماتریس‌های  $\mathbf{M}$  و  $\mathbf{C}$  به ترتیب ماتریس جرم و میرایی ذاتی سیستم،  $\mathbf{a}$  و  $\mathbf{v}$  بردار شتاب و سرعت طبقات،  $\mathbf{F}_s$  بردار نیروی فنر،  $\mathbf{D}$  ماتریس موقعیت نیروی کنترل،  $\mathbf{P}_d$  نیروی وارد از جانب سیستم میراگر به طبقات،  $\mathbf{1}$  بردار تاثیر شتاب زمین و  $a_g$  شتاب زمین می‌باشد.

بردار نیروی وارد از جانب سیستم میراگر در طبقه  $i$ ام را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود [۹]:

$$P_{di}(t) = c_{di} [v_{di}(t) - v_{i-1}(t)] = k_{bri} [x_i(t) - x_{di}(t)] \quad (2)$$

در رابطه بالا  $c_{di}$  و  $k_{bri}$  به ترتیب ضریب میرایی<sup>۱</sup> میراگر و سختی مهبان متصل کننده میراگر به سازه در طبقه  $i$ ام می‌باشد و بقیه پارامترها در شکل ۱ مشخص گردیده است.



شکل ۱: سیستم جرم فنر میراگر در سازه غیرفعال.

با توجه به این موضوع که ملاک بررسی‌ها، شتاب مطلق وارد بر طبقات می‌باشد، این بردار را می‌توان با توجه به معادله (۱) به صورت ذیل محاسبه نمود:

$$\mathbf{a}_r(t) = \mathbf{a}(t) + \mathbf{1}a_g(t) = \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{D}\mathbf{P}_d(t) - \mathbf{C}\mathbf{v}(t) - \mathbf{F}_s(t)] \quad (3)$$

در معادله بالا  $\mathbf{a}_r$  شتاب مطلق وارد بر جرم می‌باشد که به عنوان یکی از موارد مورد بررسی در این پژوهش می‌باشد.

### ۳- تعیین مشخصات دینامیکی سیستم

برای بررسی عددی تمامی پارامترهای تاثیرگذار در پاسخ سیستم کنترل شده غیرفعال تمامی موارد تاثیرگذار در معادله (۱) و (۲) به صورت پارامترهای مشخص شده در ذیل در نظر گرفته شده است:

#### ۳-۱- تاثیر سختی و جرم سیستم

برای بررسی تغییرات ناشی از ماتریس‌های سختی و جرم در پاسخ سیستم، پرپود خطی نوسان ( $T_{n0}$ ) به فرض میرایی کلاسیک به صورت یک متغیر در آنالیزها اعمال خواهد گشت. پرپود خطی نوسان در حقیقت با استفاده از ماتریس سختی اولیه (خطی) و جرم سیستم محاسبه می‌گردد.

در تمامی آنالیزها فرض بر آن بوده است که جرم تمامی طبقات یکسان باشد. علاوه بر این، برای توزیع ماتریس سختی اولیه برای نیل به پریود خطی نوسان  $T_{n0}$  فرض بر آن بوده است که توزیع نیروی وارد بر طبقات در تشکیل ماتریس سختی مطابق با توزیع نیروی طراحی استاتیکی آیین نامه بارگذاری آمریکا [۱] مطابق رابطه زیر باشد [۱۰]:

$$f_i = \frac{m_i h_i^\kappa}{\sum_{j=1}^N m_j h_j^\kappa} V \quad (4)$$

در این رابطه  $f_i$ ،  $m_i$  و  $h_j$  به ترتیب نیروی طراحی وارد بر طبقه  $i$ ام، جرم طبقه  $i$ ام و ارتفاع لرزه‌ای طبقه می‌باشد.  $V$  نیروی برش پایه لرزه‌ای و  $\kappa$  مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱]:

$$\kappa = \begin{cases} 1 & T_{n0} < 0.5 \\ 0.5T_{n0} + 0.75 & 0.5 < T_{n0} < 2.5 \\ 2 & T_{n0} > 2.5 \end{cases} \quad (5)$$

برای تعیین سختی طبقه فرض می‌گردد که سختی طبقه با توجه به رابطه زیر با برش طراحی طبقه داشته باشد:

$$k_i = \psi V_i \quad (6)$$

در رابطه بالا  $k_i$  و  $V_i$  به ترتیب سختی و برش طراحی طبقه  $i$ ام می‌باشند.  $\psi$  نیز ضریبی است که به مشخصات مصالح، روش طراحی و ازدیاد مقاومت مرتبط است. برای ساده‌سازی، ارتفاع تمامی طبقات ثابت در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این فرضیات سختی طبقه برای نیل به پریود نوسان  $T_{n0}$  برابر خواهد بود با:

$$k_i = \tau \frac{\sum_{r=i}^N r^\kappa}{\sum_{j=1}^N j^\kappa} = \tau k_i' \quad (7)$$

که در این رابطه  $\tau = \psi V$  می‌باشد. برای محاسبه ضریب  $\tau$  به منظور دستیابی به پریود نوسان  $T_{n0}$  ابتدا ماتریس سختی  $\mathbf{K}'$  مطابق رابطه زیر تشکیل می‌گردد:

$$\mathbf{K}' = \begin{bmatrix} k_1' + k_2' & -k_2' & \dots & 0 \\ -k_2' & k_2' + k_3' & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & -k_N' \\ 0 & \dots & -k_N' & k_N' \end{bmatrix} \quad (8)$$

چنانچه پریود اول نوسان مطابق ماتریس سختی رابطه (۸) برابر با  $T_{n0}'$  باشد، ضریب  $\tau$  مطابق زیر محاسبه خواهد شد:

$$\tau = \left( \frac{T_{n0}'}{T_{n0}} \right)^2 \quad (9)$$

در نهایت ماتریس سختی سیستم به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\mathbf{K} = \tau \mathbf{K}' \quad (10)$$

به عنوان مثال چنانچه سیستم مدنظر، سازه‌ای ۲ طبقه باشد و فرض شود جرم هر طبقه برابر ۲۰۰ تن و میرایی مد اول نوسان  $T_{n0}$  برابر ۰/۲ ثانیه باشد، ماتریس سختی محاسبه شده مطابق روش بالا به صورت ذیل خواهد بود:

$$\mathbf{K} = 10^5 \begin{bmatrix} 9.87 & -3.95 \\ -3.95 & 3.95 \end{bmatrix} \left( \frac{kN}{m} \right) \quad (11)$$

### ۳-۲- تاثیر میرایی ذاتی

در تمامی آنالیزها از تاثیر میرایی ذاتی سیستم صرف نظر گردیده است (به دلیل تاثیر کم این پارامتر).

### ۳-۳- تاثیر میرایی الحاقی (اثرات میراگر)

با توجه به سختی محدود مهاریندهای متصل کننده میراگر به سازه، تصور یک نسبت میرایی مشخص برای مجموعه سیستم ناممکن می‌باشد. بدین سبب و به منظور بررسی اثرات ناشی از تغییرات میرایی الحاقی، پارامتر بی‌بعد  $\xi_0$  به عنوان شبه نسبت میرایی سیستم معرفی می‌گردد. ضریب  $\xi_0$  به عنوان نسبت میرایی مد اول سیستم با ماتریس سختی  $\mathbf{K}$ ، ماتریس جرم  $\mathbf{M}$  و ماتریس میرایی الحاقی  $\mathbf{C}_d$  (به فرض کلاسیک بودن میرایی) و به فرض سختی بی‌نهایت مهاریندها در نظر گرفته شده است. در محاسبه ضریب میرایی میراگرها، فرض بر آن بوده است که ماتریس میرایی الحاقی سیستم به صورت رابطه زیر به ماتریس سختی مرتبط گردد (به فرض سختی بی‌نهایت مهاریندها):

$$\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} c_{d1} + c_{d2} & -c_{d2} & \dots & 0 \\ -c_{d2} & c_{d2} + c_{d3} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & -c_{dN} \\ 0 & \dots & -c_{dN} & c_{dN} \end{bmatrix} = \alpha \mathbf{K} \quad (12)$$

لازم به توضیح است رابطه بالا صرفاً برای ساده‌سازی و کم کردن پارامترهای متغیر در آنالیزهای انجام پذیرفته در نظر گرفته شده است. بدیهی است ماتریس میرایی الحاقی سیستم می‌تواند به هر فرمت غیر کلاسیک در آنالیزها مورد استفاده قرار گیرد. برای تعیین ضریب  $\alpha$  در رابطه (۱۲) به فرض سختی بی‌نهایت مهاریندها و کلاسیک بودن میرایی سیستم و با دانستن نسبت میرایی مد اول ( $\xi_0$ )، می‌توان از رابطه زیر بهره برد:

$$\alpha = \frac{\boldsymbol{\Phi}_1^T \mathbf{C}_d \boldsymbol{\Phi}_1}{\boldsymbol{\Phi}_1^T \mathbf{K} \boldsymbol{\Phi}_1} = \frac{2\xi_0 \frac{2\pi}{T_{n0}}}{\left( \frac{2\pi}{T_{n0}} \right)^2} = \xi_0 \frac{T_{n0}}{\pi} \quad (13)$$

در رابطه بالا  $\boldsymbol{\Phi}_1$  بردار شکل مد اول نوسان می‌باشد.

به عنوان مثال چنانچه سازه ۲ درجه آزادی با سختی رابطه (۱۱) در نظر گرفته شود، ماتریس میرایی الحاقی برای  $\xi_0 = 0.1$  به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_d = 10^3 \begin{bmatrix} 6.29 & -2.52 \\ -2.52 & 2.52 \end{bmatrix} \left( \frac{kN.s}{m} \right) \quad (14)$$

### ۳-۴- تاثیر سختی مهاربندها

به منظور بررسی اثرات ناشی از سختی مهاربندهای متصل کننده میراگر به سازه، فرض گرفته می‌شود که سختی مهاربند در هر طبقه  $b^2$  برابر سختی خطی آن طبقه باشد به عبارت دیگر:

$$k_{bi} = b^2 k_i \quad (15)$$

### ۳-۵- تاثیر نیروی تسلیم طبقات

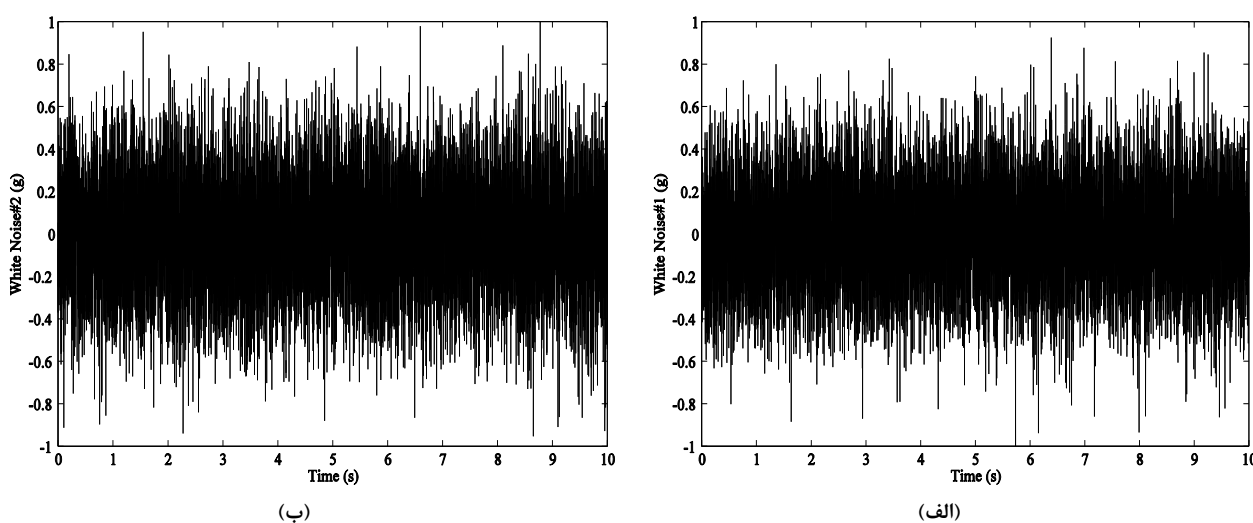
برای نشان دادن اثرات ناشی از تغییرات مقاومت سازه، نیروی تسلیم در طبقات با استفاده از رابطه زیر به نیروی برشی سیستم خطی مرتبط گردیده است:

$$R_{\mu} = \frac{f_l}{f_y} \quad (16)$$

در رابطه بالا  $f_l$  و  $f_y$  به ترتیب نیروی برش طبقه به فرض رفتار خطی و غیرخطی می‌باشد.

### ۴- تحریک ورودی

به منظور کاهش ناپذیرت‌های موجود در تحریک ورودی در آنالیزها و همچنین کاهش تشدید سیستم در محدوده‌ای از فرکانس‌های خاص، از ۲ سری شتاب پایه نوفه سفید به مدت زمان ۱۰ ثانیه و با مقدار حداکثر شتاب پایه 1g استفاده گردیده است. نمودار تاریخچه زمانی مربوط به این دو سری تحریک در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: تحریک، الف) نوفه سفید شماره ۱، ب) نوفه سفید شماره ۲.

## ۵- پارامترهای مورد بررسی

نظر به این موضوع که در این پژوهش پارامترهای تاثیرگذار در پاسخ سیستم‌های کنترل شده غیرفعال مورد واری قرار می‌گیرند، به تبع آن پارامترهای مورد بحث بایستی در بازه‌های منطقی و مورد انتظار در طراحی در نظر گرفته شود. در این راستا پارامترهای متغیر شامل تعداد طبقات سیستم، پریود اول نوسان، نسبت میرایی سیستم، سختی مهاربندهای متصل کننده میراگر به سازه اصلی و ضریب کاهش مقاومت به شرح جدول ۱ در آنالیزها مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱: بازه پارامترهای مورد بررسی

| پارامتر  | بازه مورد بررسی               |
|----------|-------------------------------|
| $N$      | ۴، ۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶    |
| $T_{n0}$ | ۰/۲، ۰/۴، ...، ۱/۸، ۲/۰ ثانیه |
| $\xi_0$  | ۰/۰۵، ۰/۱۵، ...، ۰/۳۵، ۰/۴۵   |
| $b^2$    | ۱، ۱/۵، ۲/۵، ...، ۶/۵، ۷/۵    |
| $R_\mu$  | ۱، ۳، ۹، ۱۱                   |

با توجه به مقادیر مشخص شده در جدول ۱ تعداد ۳۸۴۰۰ آنالیز غیرخطی برای ۲ تحریک ورودی انجام پذیرفته است. برای بررسی اثرات ناشی از هر یک از این پارامترها، نمودارهایی از میانگین تمامی نتایج، برای مقدار خاصی از پارامتر مشخص شده در محور افقی برای هر نمودار تهیه گردیده است که در بخش بعدی به تفصیل مورد بررسی واقع گردیده است.

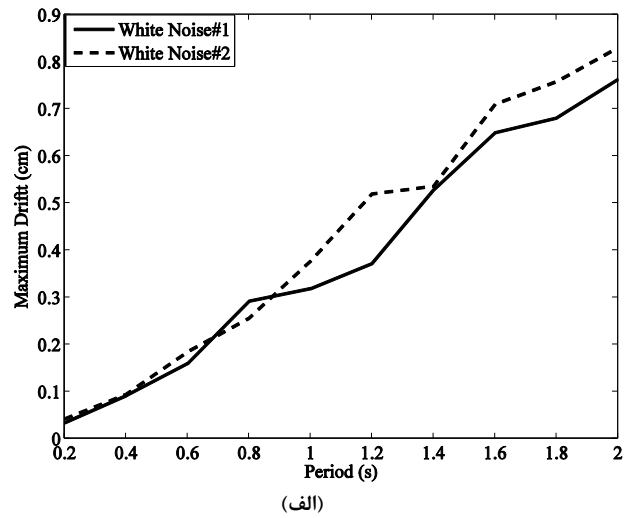
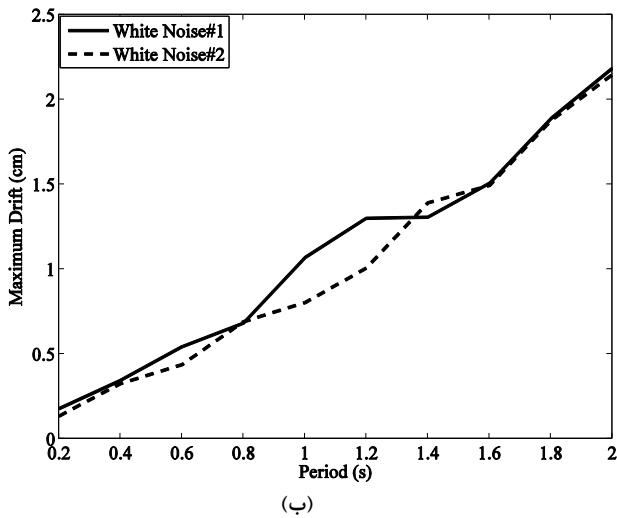
## ۶- بررسی نتایج آنالیز

## ۶-۱- تاثیرات ناشی از تغییرات پریود اول نوسان

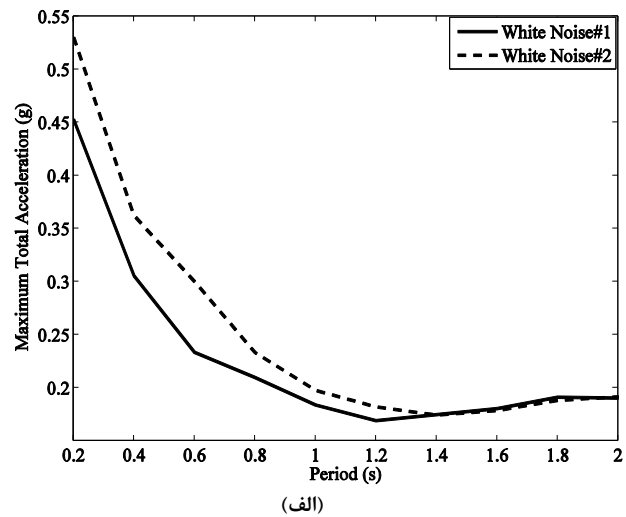
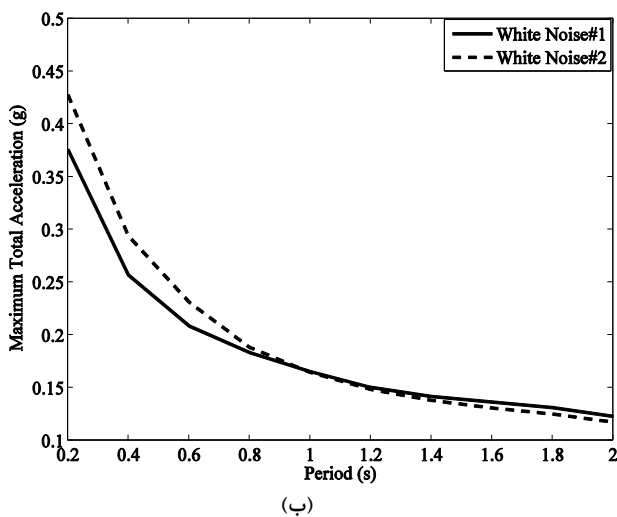
تاثیر ناشی از تغییرات پریود اول نوسان در پاسخ سیستم‌های خطی و غیرخطی در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. با افزایش پریود اول نوسان سختی کمتری در آنالیز سیستم مشارکت می‌نماید. همانگونه که در شکل ۳ الف و ب نشان داده شده است با کاهش سختی سیستم، جابه‌جایی‌های سازه روندی افزایشی را تجربه می‌نماید. بر خلاف این موضوع حداکثر شتاب مطلق با کاهش سختی رو به کم شدن رفته است. با غیرخطی شدن سیستم‌ها ماکزیمم دریفت سازه افزایش می‌یابد. برخلاف این موضوع، زمانی که سیستم رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد شتاب مطلق وارد بر سیستم نسبت به سیستم خطی کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان با مقایسه شکل ۴ الف با ب اثبات نمود. برای نشان دادن دلیل این موضوع و ساده‌سازی مساله، سیستم تک درجه آزادی با جرم  $m$ ، نیروی تسلیم  $f_y$  و ضریب میرایی میراگر  $c_d$  به فرض بی‌نهایت بودن سختی مهاربند در نظر گرفته شود. با توجه به این موضوع که در سیستم‌های غیرخطی شتاب مطلق حداکثر معمولاً در لحظه‌ای رخ می‌دهد که ماکزیمم نیروی ناشی از میرایی و نیروی فنر به ماکزیمم مقدار خود رسیده‌اند (برخلاف سیستم‌های خطی با میرایی ویسکوز که حداکثر نیروی میراگر با ماکزیمم نیروی فنر هیچگاه در یک لحظه به ماکزیمم مقدار خود نمی‌رسند) می‌توان ماکزیمم شتاب مطلق را با توجه به رابطه (۳) به صورت زیر نوشت:

$$\max(|a_t(t)|) = \frac{f_y + c_d \max(|v(t)|)}{m} \quad (17)$$

با توجه به رابطه بالا، با غیرخطی شدن سیستم، ماکزیمم نیروی فنر به  $f_y$  محدود گردیده و به تبع آن سطح نهایی شتاب مطلق محدودتر از سیستم‌های خطی خواهد شد. در سیستم‌های چند درجه آزادی نیز به تبع این توضیحات سطح شتاب مطلق در سیستم‌های غیرخطی نسبت به سیستم‌های خطی محدودتر خواهد بود.



شکل ۳: تاثیر تغییرات پریود اول نوسان بر روی: الف) دررفت حداکثر سیستم‌های خطی، ب) دررفت حداکثر سیستم‌های غیرخطی.

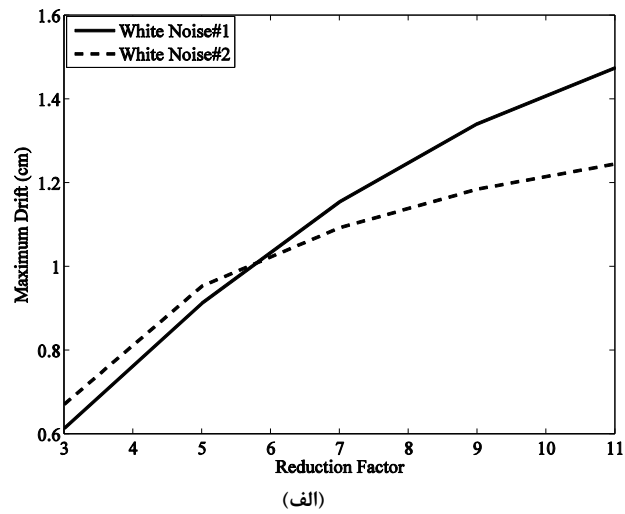
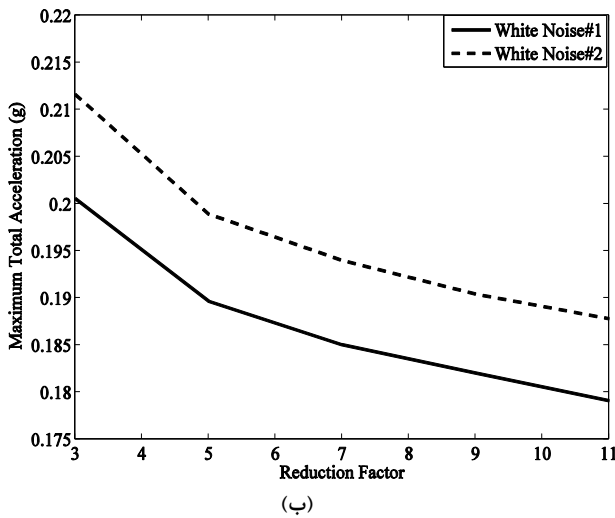


شکل ۴: الف) شتاب مطلق حداکثر سیستم‌های خطی، ب) شتاب مطلق حداکثر سیستم‌های غیرخطی.

## ۲-۶- تاثیرات ناشی از تغییرات مقاومت

اثر تغییرات مقاومت در سیستم‌های با رفتار غیرخطی در شکل ۵ نشان داده شده است. با کاهش مقاومت سیستم، دررفت حداکثر رو به فزونی نهاده است. در حقیقت با کاهش مقاومت شکل‌پذیری بیشتری به سیستم تحمیل گردیده است. اثر ناشی از کاهش مقاومت شباهت زیادی به اثر کاهش سختی سیستم داشته است. در مورد شتاب مطلق حداکثر نیز، کاهش مقاومت باعث کاهش شتاب مطلق وارد بر طبقات گردیده است. با کاهش مقاومت سیستم، سطح نیروی فنر کاهش یافته و طبق رابطه (۱۷) ماکزیمم شتاب مطلق کاهش خواهد یافت.





شکل ۵: تاثیر تغییرات مقاومت بر روی: الف) دررفت حداکثر سیستم‌های غیرخطی، ب) شتاب مطلق حداکثر سیستم‌های غیرخطی.

### ۳-۶- تاثیرات ناشی از تغییرات میرایی الحاقی

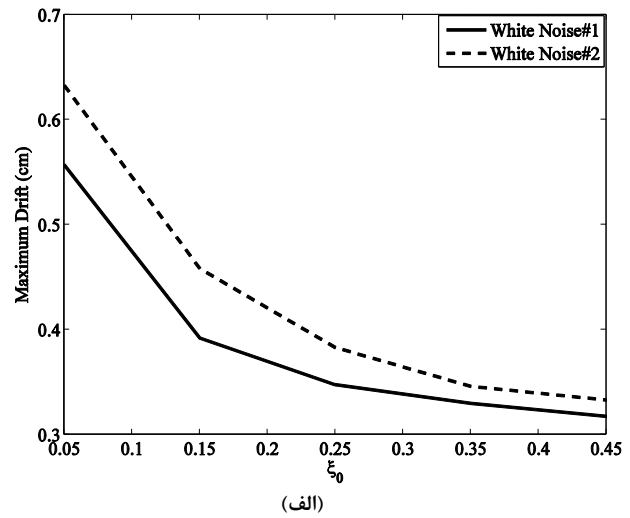
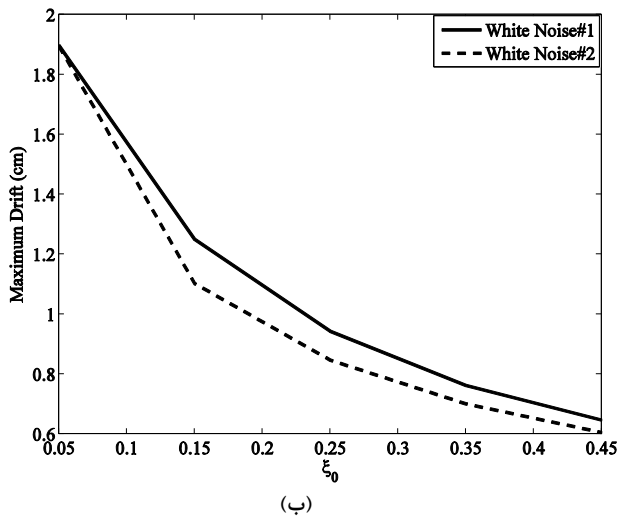
تاثیر افزایش میرایی الحاقی در پاسخ سیستم‌های خطی و غیرخطی در سیستم‌های چند درجه آزادی در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. تاثیر افزایش میرایی در تمامی حالات بر روی کاهش دررفتِ حداکثر، یکسان بوده است. با افزایش میرایی در تمامی حالات دررفت حداکثر کاهش پیدا نموده است. در حقیقت با افزایش میرایی، انرژی تحریک ورودی به جای متعادل شدن با نیروی فنر در میراگر متعادل گردیده است و نتیجتاً حداکثر جابه‌جایی وارد بر طبقات کاهش می‌یابد.

بر خلاف دررفت، اثر افزایش میرایی بر روی تغییرات شتاب مطلق در سیستم‌های خطی و غیرخطی اثری متفاوت از خود نشان داده است. در سیستم‌های خطی در میرایی‌های پایین با افزایش میرایی شتاب مطلق حداکثر کاهش می‌یابد. در همین سیستم‌ها و در میرایی‌های بالاتر، با افزایش بیشتر میرایی، شتاب مطلق حداکثر افزایش یافته است. این موضوع (افزایش میرایی) در سیستم‌های غیرخطی در تمامی حالات باعث افزایش شتاب مطلق حداکثر گردیده است. برای نشان دادن علت این نتایج سیستم تک درجه آزادی با مشخصات ارائه شده در بخش‌های قبل مدنظر قرار خواهد گرفت. در سیستم‌های خطی تک درجه آزادی با سختی مهاربند بی‌نهایت، ماکزیمم شتاب مطلق وارد بر جرم با توجه به رابطه زیر حاصل می‌گردد:

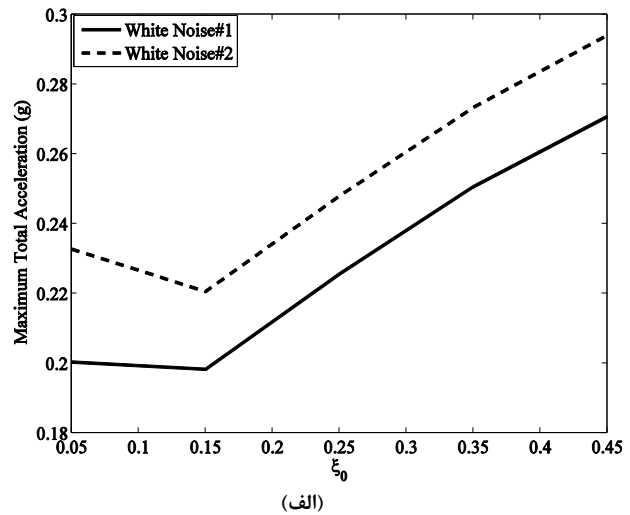
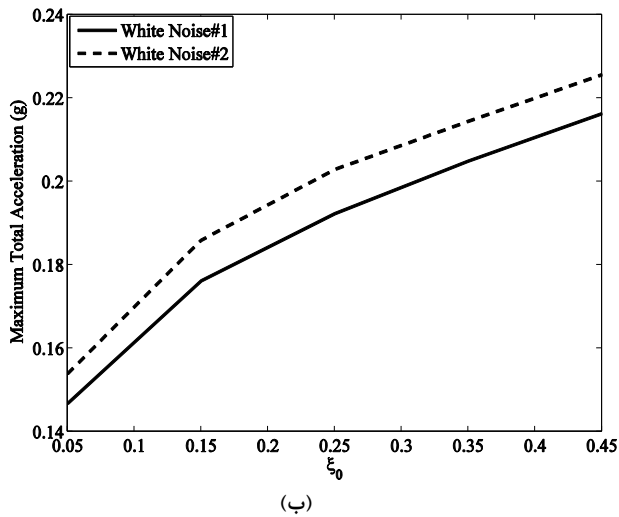
$$\max(|a_t(t)|) = \max\left(\frac{c_d}{m} \max(|v(t)|), \frac{k}{m} \max(|x(t)|)\right) \quad (18)$$

در میرایی‌های پایین، بخش  $\frac{k}{m} \max(|x(t)|)$  در رابطه بالا حاکم بوده و با افزودن میرایی میزان جابه‌جایی کاهش یافته و به تبع آن شتاب مطلق کاهش می‌یابد. در میرایی‌های بالا بخش  $\frac{c_d}{m} \max(|v(t)|)$  حاکم بوده و با افزایش میرایی شتاب مطلق افزایش پیدا خواهد نمود.

در سیستم‌های غیرخطی با توجه به اینکه رابطه (۱۷) در تشکیل شتاب حاکم است، افزایش میرایی در اکثر حالات منجر به افزایش شتاب مطلق می‌گردد.



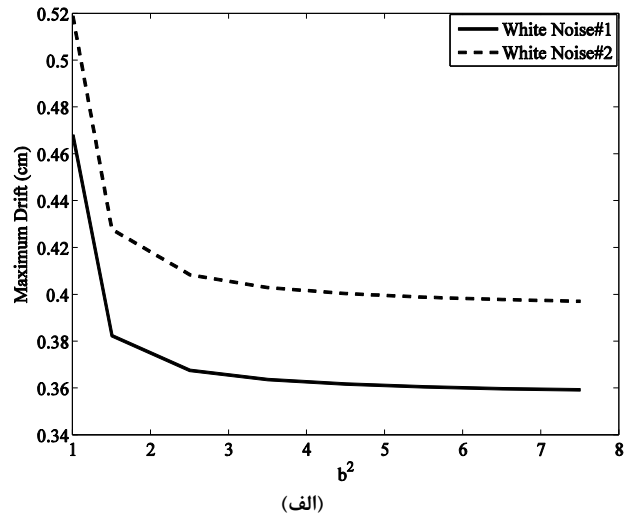
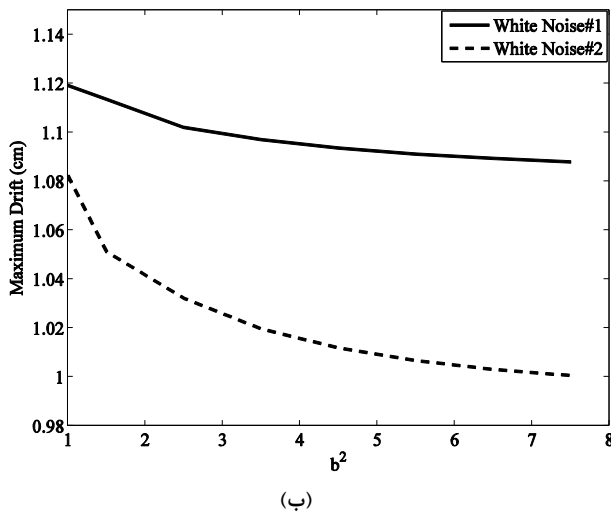
شکل ۶: تاثیر تغییرات میرایی بر روی: الف) دررفت حداکثر سیستم‌های خطی، ب) دررفت حداکثر سیستم‌های غیرخطی.



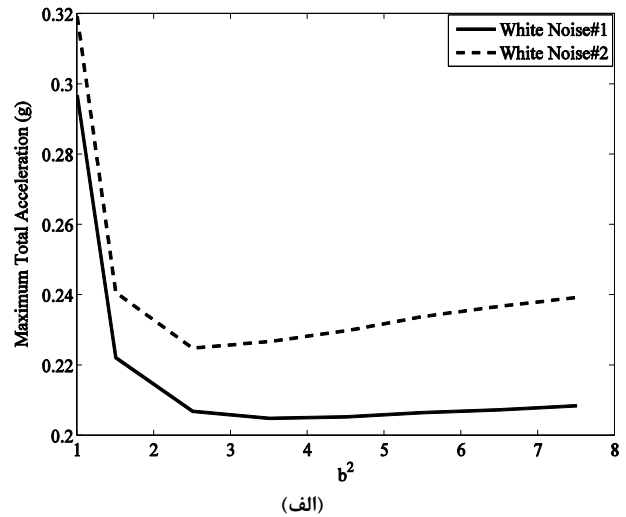
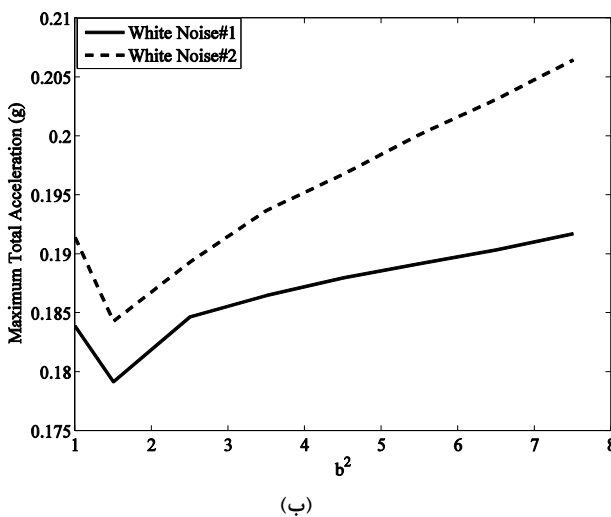
شکل ۷: الف) شتاب مطلق حداکثر سیستم‌های خطی، ب) شتاب مطلق حداکثر سیستم‌های غیرخطی.

#### ۶-۴- تاثیرات ناشی از تغییرات سختی مهاربند

تاثیر تغییرات سختی مهاربند متصل کننده میراگر به سازه اصلی در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است. با افزایش سختی مهاربند، میزان میرایی موثر وارد بر سازه افزایش یافته و به تبع آن میزان حداکثر دررفت در هر ۲ حالت خطی و غیرخطی کاهش می‌یابد. با شروع زیاد شدن میزان سختی مهاربندها، در ابتدا سختی موثر و میرایی وارد بر سازه اندکی افزایش می‌یابد و به تبع این موضوع در سختی‌های پایین‌تر مهاربند، افزایش سختی مهاربند باعث کاهش شتاب مطلق سیستم‌های خطی می‌گردد. در سختی‌های بالاتر، افزایش سختی مهاربندها در سیستم‌های خطی و غیرخطی به دلیل افزایش میرایی موثر باعث افزایش شتاب مطلق وارد بر طبقات می‌گردد.



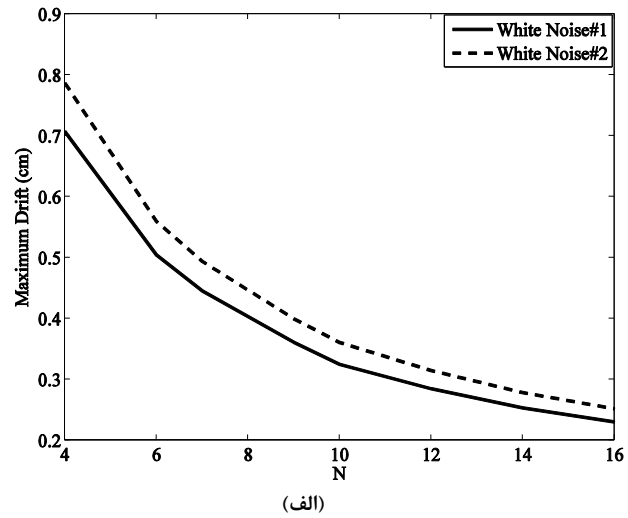
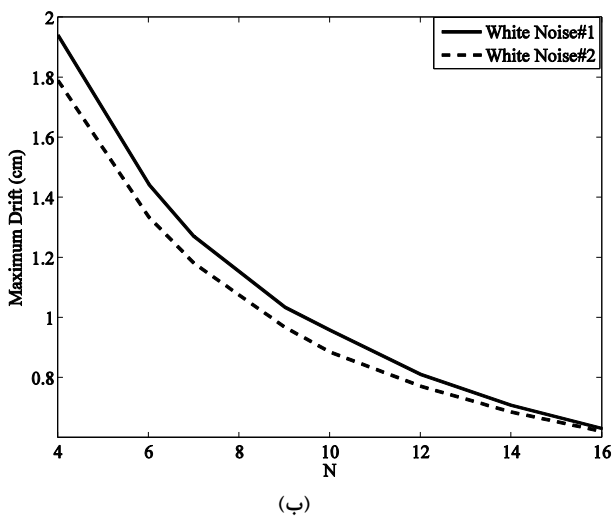
شکل ۸: تاثیر تغییرات سختی مهاربند بر روی: الف) دررفت حداکثر سیستم‌های خطی، ب) دررفت حداکثر سیستم‌های غیرخطی.



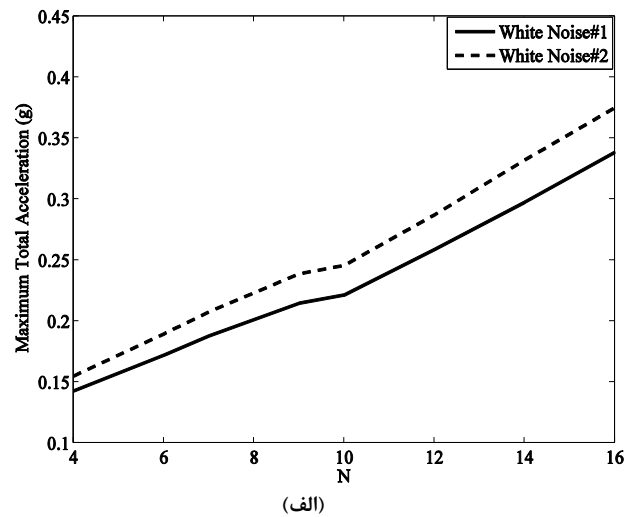
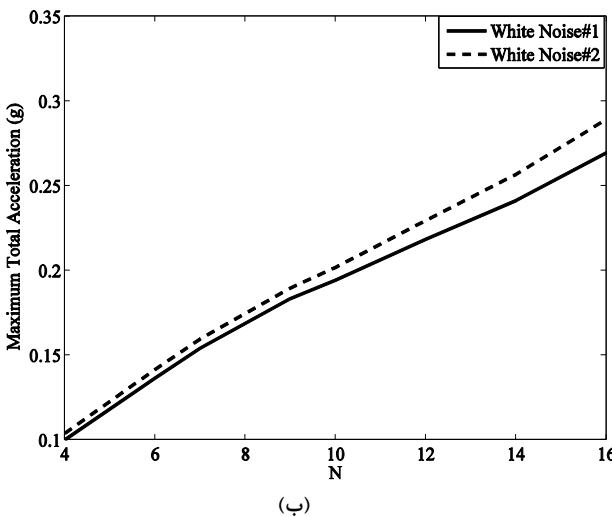
شکل ۹: الف) شتاب مطلق حداکثر سیستم‌های خطی، ب) شتاب مطلق حداکثر سیستم‌های غیرخطی.

## ۵-۶- تاثیرات ناشی از تغییرات تعداد طبقات

با افزایش تعداد طبقات برای دستیابی به یک پرپود نوسان و نسبت میرایی دلخواه، بایستی سختی موثر و به تبع آن میرایی الحاقی بالاتری در آنالیز مطابق با روابط، مورد استفاده قرار گیرد. با افزایش این دو بخش در آنالیزها و با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل دررفت حداکثر طبقات بایستی کاهش یابد. این موضوع در شکل ۱۰ نشان داده شده است. افزایش ماتریس‌های سختی و میرایی باعث افزایش شتاب مطلق حداکثر وارد بر طبقات خواهد گردید. این موضوع نیز به وضوح در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: تاثیر تعداد بر روی: الف) دررفت حداکثر سیستم‌های خطی، ب) دررفت حداکثر سیستم‌های غیرخطی.



شکل ۱۱: الف) شتاب مطلق حداکثر سیستم‌های خطی، ب) شتاب مطلق حداکثر سیستم‌های غیرخطی.

## ۱۰- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر پارامترهای طراحی در پاسخ سیستم‌های کنترل شده غیرفعال مورد بررسی قرار گرفت. دررفت طبقات و شتاب مطلق حداکثر وارد بر اجرام طبقات نیز به عنوان پاسخ سیستم کنترل شده در نظر گرفته شد. همچنین دررفت حداکثر به عنوان شاخصی در خرابی‌های سازه‌ای و شتاب مطلق به عنوان شاخصی در خرابی اجزای غیرسازه‌ای و ادوات حساس به شتاب در ساختمان‌ها لحاظ گردید و با توجه به پارامترهای موجود در طراحی سیستم‌های غیرفعال، پارامتر پریود اول نوسان، میرایی الحاقی سیستم، مقامت طبقات، سختی مهاربندهای متصل کننده میراگر به سازه اصلی و تعداد طبقات به عنوان متغیرها در آنالیزها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد، کاهش سختی و مقاومت به عنوان پارامترهای کلیدی در کاهش شتاب مطلق و افزایش سختی مهاربندها و افزایش میرایی به عنوان تاثیرگذارترین پارامترها در کاهش دررفت حداکثر طبقات محسوب می‌گردند. این بدان معناست که چنانچه در طراحی سازه‌های غیرفعال صرف افزایش میرایی الحاقی میراگرها مد نظر قرار گیرد احتمال افزایش شتاب مطلق وارد بر طبقات افزایش یافته و به تبع آن اجزای حساس به شتاب در ساختمان‌ها بیشترین خرابی را تجربه خواهند نمود.

## سپاسگزاری

این پژوهش در راستای طرح پژوهشی تعریف شده به عنوان طرح جایگزین خدمت سربازی تعریف گردیده است. بدین سبب نویسندگان این مقاله از حمایت‌های پدافند غیرعامل کشور و همچنین بنیاد نخبگان نیروهای مسلح کمال سپاسگزاری را دارند.

## مراجع

- [1] ASCE. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- [2] Soong, T.T. and G.F. Dargush. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. New York: Wiley, 368.
- [3] Lavan, O., G.P. Cimellaro, and A.M. Reinhom. (2008). Noniterative optimization procedure for seismic weakening and damping of inelastic structures. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 134(10), 1638-1648.
- [4] Cimellaro, G.P. (2009). Optimal weakening and damping using polynomial control for seismically excited nonlinear structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8(4), 607-616.
- [5] Cimellaro, G.P. and R. Retamales. (2007). Optimal softening and damping design for buildings. *Structural Control and Health Monitoring*, 14(6), 831-857.
- [6] Zare, A.R. and M. Ahmadizadeh. (2014). Design of viscous fluid passive structural control systems using pole assignment algorithm. *Structural Control and Health Monitoring*, 21(7), 1084-1099.
- [7] Karavasilis, T.L. and C.-Y. Seo. (2011). Seismic structural and non-structural performance evaluation of highly damped self-centering and conventional systems. *Engineering Structures*, 33(8), 2248-2258.
- [8] Lin, W.-H. and A.K. Chopra. (2003). Earthquake Response of Elastic Single-Degree-of-Freedom Systems with Nonlinear Viscoelastic Dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, 129(6), 597-606.
- [9] Ahmadizadeh, M. (2007). On equivalent passive structural control systems for semi-active control using viscous fluid dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, 14(6), 858-875.
- [10] Moghaddam, H. and R.K. Mohammadi. (2001). Ductility reduction factor of MDOF shear-building structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 5(3), 425-440.