

# کنترل ارتعاشات سازه‌ها با استفاده از سیستم‌های جاذب انرژی غیرخطی ارتعاشی - ضربه‌ای

مصطفی احمدی<sup>۱\*</sup> و نادر خواجه احمد عطاری<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی، دانشگاه خوارزمی، کرج

۲- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۲۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۰۴/۱۰)

**چکیده** - یکی از روش‌های جدید کنترل ارتعاش سازه‌ها و کاهش پاسخ لرزه‌ای آنها، استفاده از سیستم جاذب انرژی غیرخطی ارتعاشی - ضربه‌ای است. در این سیستم یک جرم بر روی کف سازه‌ای به گونه‌ای تنظیم شده است که فاصله مشخصی از دیواره غیرارتجاعی متصل به جرم طبقه دارد. جرم جابه‌جا شده در اثر تحریک سازه با دیواره غیرارتجاعی برخورد می‌کند که باعث ایجاد ضربه و جذب انرژی می‌شود. در تحقیق حاضر جاذب انرژی ارتعاشی - ضربه‌ای با بهینه‌یابی پارامترهای آن به‌طور هم‌زمان شامل نسبت سختی و فضای آزاد حرکت مورد مطالعه قرار گرفته است. الگوریتم جستجوی هماهنگی به‌عنوان یک روش فرااکتشافی جدید به‌طور مؤثری اختصاصی شده و برای مسئله بهینه‌یابی پیوسته فوق‌الذکر به کار گرفته شده است. نشان داده شده است که سیستم بهینه شده متصل به سازه قادر است که با سازه اولیه در بازه وسیع فرکانسی اندرکنش داشته باشد. پاسخ کنترل شده مورد نظر در مجموعه‌ای از قاب‌های خمشی فولادی کوتاه و میان مرتبه از طریق تحلیل‌های دینامیکی تاریخیچه زمانی غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفته است. توانایی این نوع جاذب انرژی در اتلاف انرژی لرزه‌ای ورودی به سازه‌ها و توانایی آنها در کاهش مؤثر پاسخ سازه‌ها از طریق ضربه‌های ارتعاشی بین جرم جاذب انرژی و جرم طبقه با استخراج شاخص‌های عملکردی متعدد و طیف‌های فوریه مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده بر روی مدل‌های سازه‌ای تعریف شده، سیستم کنترلی بهینه شده باعث باز توزیع انرژی از مودهای ارتعاشی پایین با فرکانس کم و دامنه ارتعاش زیاد به مودهای ارتعاشی بالاتر با فرکانس زیاد و دامنه ارتعاش کم می‌شود که منجر به کاهش مطلوب پاسخ‌های سازه‌ای شده است.

واژگان کلیدی: مدل کنترل غیرفعال ارتعاشات سازه‌ها، بارهای دینامیکی زلزله، رفتار دینامیکی غیرخطی، سیستم جاذب انرژی ارتعاشی - ضربه‌ای.

## Vibration Control of Structures using Vibro-Impact Nonlinear Energy Sinks

M. Ahmadi<sup>1\*</sup> and N. K. A. Attari<sup>2</sup>

1. Faculty of Engineering, Kharazmi University

2. Department of Structural Engineering, Building and Housing Research Center (BHRC)

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mahmadi.g.s@gmail.com

**Abstract:** Using Vibro-Impact Nonlinear Energy Sinks (VI NESs) is one of the novel strategies to control structural vibrations and mitigate their seismic response. In this system, a mass is tuned on the structure floor, so that it has a specific distance from an inelastic constraint connected to the floor mass. In case of structure stimulation, the displaced VI NES mass collides with the inelastic constraint and upon impacts, energy is dissipated. In the present work, VI NES is studied when its parameters, including clearance and stiffness ratio, are simultaneously optimized. Harmony search as a recent meta-heuristic algorithm is efficiently specialized and utilized for the aforementioned continuous optimization problem. The optimized attached VI NES is thus shown to be capable of interacting with the primary structure over a wide range of frequencies. The resulting controlled response is then investigated, in a variety of low and medium rise steel moment frames, via nonlinear dynamic time history analyses. Capability of the VI NES to dissipate seismic input energy of earthquakes and their capability in reducing response of structures effectively, through vibro-impacts between the energy sink's mass and the floor mass, is discussed by extracting several performance indices and the corresponding Fourier spectra. Results of the numerical simulations done on some structural model examples reveal that the optimized VI NES has caused successive redistribution of energy from low-frequency high-amplitude vibration modes to high-frequency low-amplitude modes, bringing about the desired attenuation of the structural responses.

**Keywords:** Passive control of structural vibration, dynamic loading of earthquakes, dynamic nonlinear behavior, Vibro-Impact, Nonlinear Energy Sink (VI NES.)

## فهرست علائم

معیار ارزیابی حداکثر نرُم شتاب مطلق طبقه (نسبت به زمین)	$J_v$	ضرایب تناسب در روش رایلی برای مجاسبه ماتریس میرایی	$a_0, a_1$
معیار ارزیابی حداکثر نرُم نیروی اینرسی در هر درجه آزادی	$J_A$	ماتریس میرایی کل سازه (شامل سازه اصلی و سیستم جاذب انرژی)	$C$
ماتریس سختی کل سازه (شامل سازه اصلی و سیستم جاذب انرژی)	$K$	ماتریس میرایی سازه خطی (بدون جاذب انرژی)	$C^*$
ماتریس سختی سازه خطی (بدون جاذب انرژی)	$K^*$	جابه‌جایی مطلق تجمعی	CAD
ماتریس جرم کل سازه (شامل سازه اصلی و سیستم جاذب انرژی)	$M$	ضریب برجهندگی	$c_r$
جرم طبقات ۱ تا n	$m_{1...n}$	رانس بین طبقه‌ای در هر لحظه	$d_i$
ماتریس جرم سازه خطی (بدون جاذب انرژی)	$M^*$	مجموع انرژی تلف شده توسط میرایی سازه خطی و برخوردهای غیرارتجاعی تا لحظه وقوع هر برخورد	$E_{SD}$
حداکثر شتاب زمین	PGA	مجموع انرژی نسبی ورودی به سازه از زلزله تا هر لحظه	$E_I$
حداکثر سرعت زمین	PGV	انرژی تلف شده حین هر برخورد	$E_{SP}$
حداکثر جابه‌جایی زمین	PGD	مجموع انرژی تلف شده توسط میرایی سازه خطی تا لحظه هر برخورد	$E_D$
مدت زمان حرکت زمین	rd	مجموع انرژی تلف شده توسط برخوردهای غیرارتجاعی تا لحظه هر برخورد	$E_S$
مدت زمان حرکت قوی زمین	$T_D$	فضای آزاد حرکت	e
بردار جابه‌جایی طبقات سازه نسبت به زمین	$u$	حداکثر برش پایه کنترل نشده	$F_b^{max}$
جابه‌جایی زمین در هر لحظه	$u_g$	بردار نیروی بازگرداننده	$f_s$
شتاب تحریک زمین در هر لحظه	$\ddot{u}_g$	ارتفاع طبقه	$h_i$
جابه‌جایی طبقات ۱ تا n نسبت به زمین	$u_{1...n}$	شدت آریاس	$I_A$

$v$	سرعت جرم قبل از برخورد	$I$	زمان تناوب متوسط
$v'$	سرعت جرم پس از برخورد	$J_1$	معیار ارزیابی حداکثر جابه‌جایی طبقات (نسبت به زمین)
$V_{rms}$	جذر میانگین مربعات سرعت	$J_2$	معیار ارزیابی حداکثر رانش بین طبقه‌های
$x_{1...n}$	جابه‌جایی کل طبقات ۱ تا $n$	$J_3$	معیار ارزیابی حداکثر شتاب مطلق طبقه (نسبت به زمین)
$\eta$	تعداد درجات آزادی سازه	$J_4$	معیار ارزیابی حداکثر نیروی اینرسی در هر درجه آزادی
$\Gamma$	بردار شبه‌استاتیک	$J_5$	معیار ارزیابی حداکثر ترم جابه‌جایی طبقه نسبت به زمین
$\xi$	درصد میرایی مودی	$J_6$	معیار ارزیابی حداکثر ترم رانش بین طبقه‌های

## ۱- مقدمه

به طور کلی، اتلاف انرژی درون یک سازه با تبدیل انرژی جنبشی (ناشی از ارتعاش سازه) به گرما به وسیله روش‌هایی بر مبنای لغزش اصطکاکی، تسلیم و تبدیل فازی در فلزات و مایعات و تغییر شکل مایعات و جامدات ارتجاعی - لزج افزایش می‌یابد [۲]. فلسفه کنترل سازه‌ها محدود کردن تغییر شکل غیرارتجاعی سازه به وسیله اتلاف‌کننده‌های انرژی، به گونه‌ای است که سازه اصلی در حد امکان برای زلزله طراحی در محدوده ارتجاعی باقی بماند. انواع مختلفی از میراگرها مانند میراگرهای جاری شونده فلزی، اصطکاکی، ارتجاعی - لزج، مایع لزج، جرم تنظیم شده<sup>۱</sup> و مایع تنظیم شده<sup>۲</sup> از نظر تئوری توسعه یافته و در عمل در سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از انواع میراگرها، میراگرهای ضربه‌ای<sup>۳</sup> هستند که به عنوان جاذب ارتعاشات ناخواسته سازه‌ها و ماشین‌ها در طی سال‌های گذشته ابداع و توسعه یافته است. این سیستم‌ها در اثر انتقال انرژی از سیستم اصلی به جرم برخورد کننده به صورت جداسازهای ارتعاشی - ضربه‌ای عمل می‌کنند. مبنای عملکرد این میراگرها اتلاف انرژی و انتقال اندازه حرکت هنگام برخورد بین جرم‌های برخورد کننده است. مفهوم کاهش ارتعاش سیستم‌های مکانیکی با استفاده از جرم متحرک بین دو دیواره یک مخزن توسط لیبر و جنس [۳] بیان شد. انگلدر و همکاران [۴] از میراگرهای ضربه‌ای برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها و ساختمان‌ها در برابر زلزله

و ارتعاش ماشین‌آلات بهره بردند. اوگاوا و همکاران [۵] میراگر جرم ضربه‌ای را به عنوان میراکننده‌ای برای کاهش ارتعاشات تیر نگهدارنده پل‌های کابلی در برابر باد معرفی کردند. عملکرد این میراگرها به صورت عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی توسط محققین مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است [۶، ۷ و ۸].

مفهوم انتقال انرژی هدفمند<sup>۴</sup> توسط جندلمن [۹] برای کنترل سازه‌ها مطرح گردید. او رفتار دینامیکی گذرای<sup>۵</sup> یک سیستم دو درجه آزادی شامل نوسانگر خطی میرا (سیستم اولیه) که با سیستم الحاقی غیرخطی میرا دارای درگیری ضعیفی<sup>۶</sup> بود را مطالعه کرد. وجود رفتار غیرخطی شدید<sup>۷</sup> در سیستم مورد تأکید قرار گرفت زیرا که در سیستم‌های خطی انتقال انرژی از مودی به مود دیگر امکان‌پذیر نیست. او نشان داد که اگر میزان انرژی ورودی به نوسانگر خطی از حد مشخصی فراتر باشد، یک مود نرمال غیرخطی در سیستم الحاقی غیرخطی تحریک می‌شود. در نتیجه انتقال انرژی هدفمند اتفاق می‌افتد و بخش عمده‌ای از انرژی ورودی به نوسانگر خطی جذب و به صورت موضعی توسط سیستم الحاقی غیرخطی، که به عنوان یک جاذب انرژی غیرخطی<sup>۸</sup> عمل می‌کند، تلف می‌شود. در مطالعات نوسرا و همکاران [۱۰]، سیستم‌های الحاقی ارتعاشی - ضربه‌ای به سازه اولیه دو و سه درجه آزادی از نقطه نظر انتقال انرژی هدفمند برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعات آنها به جای اینکه به سیستم‌های ارتعاشی - ضربه‌ای تنها به عنوان میراگر نگاه شود، ظرفیت آن در جذب و

اتلاف انرژی لرزه‌ای از سازه اولیه و باز توزیع این انرژی بین موده‌های سازه اصلی و لذا افزایش ویژگی‌های کاهش پاسخ لرزه‌ای آن مورد مطالعه قرار گرفت.

انتقال انرژی هدفمند بیانگر انتقال یک‌طرفه و برگشت ناپذیر انرژی ارتعاش از سازه اصلی به سیستم الحاقی موضعی دارای سختی غیرخطی و میرایی است که انرژی در آن به‌طور موضعی تلف می‌شود. مکانیزم دینامیکی که موجب انتقال انرژی هدفمند می‌شود وقوع رزونانس داخلی در طی ارتعاش است [۱۱] که نوعی تشدید داخلی لحظه‌ای بین سیستم کنترلی غیرخطی موضعی و یکی از موده‌های سازه اصلی است و شرایط لازم و کافی برای انتقال یک طرفه انرژی از سازه به سیستم الحاقی را، که اساساً به صورت یک جاذب انرژی غیرخطی عمل می‌کند، فراهم می‌آورد. هم‌زمان با کاهش انرژی ناشی از میرایی، شرایط وقوع رزونانس از بین می‌رود و تشدید پایان می‌یابد.

مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده [۱۰ و ۱۲] تأیید می‌کنند که جاذب‌های انرژی غیرخطی با رفتار غیرخطی سختی ناپیوسته<sup>۹</sup> قادرند انرژی شوک را (از طریق انتقال انرژی هدفمند) از سازه اصلی در مقیاس‌های زمانی سریع تلف کنند. هدف این تحقیق بررسی عملکرد جاذب انرژی غیرخطی ارتعاشی-ضربه‌ای (VI NES)<sup>۱۰</sup> متصل به قاب چند طبقه خطی با ارتفاع کوتاه و متوسط (چهار، هفت و ده طبقه) از طریق شبیه‌سازی عددی است. این نوع جاذب انرژی غیرخطی با توجه سختی ناپیوسته آن، رفتار غیرخطی شدیدی از خود بروز می‌دهد و سازه یکپارچه حاصل (متشکل از سازه خطی اولیه و جاذب انرژی غیرخطی متصل به آن) یک سیستم مرحله‌ای خطی<sup>۱۱</sup> می‌شود یعنی در بازه زمانی بین برخوردها سیستم خطی است و برخوردها موجب به وجود آمدن رفتار غیرخطی شدید در دینامیک سیستم می‌شوند [۱۳]. یادآوری می‌شود که پنج عامل موجب بروز رفتار غیرخطی در دینامیک سیستم می‌شود که عبارتند از: غیرخطی بودن هندسی ناشی از تغییر مکان‌های بزرگ، غیرخطی بودن اینرسی ناشی از عبارات غیرخطی شامل سرعت و شتاب در معادلات حرکت، رفتار

غیرخطی ناشی از مصالح، اتلاف انرژی میرایی که ذاتاً پدیده‌ای غیرخطی است و هنوز کاملاً شناخته شده نیست و نهایتاً غیرخطی بودن ناشی از شرایط مرزی. رفتار غیرخطی موجود در دینامیک سیستم مورد بحث (Vibro-Impact) ناشی از شرایط مرزی است [۱۴]. در تحقیق حاضر ظرفیت جاذب‌های انرژی غیرخطی در جذب و باز توزیع انرژی لرزه‌ای در سازه اصلی مورد مطالعه قرار گرفته و کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه اصلی ارزیابی شده است. پارامترهای سیستم کنترلی از طریق بهینه‌یابی بر مبنای معیارهای ارزیابی تعیین شده و به منظور بررسی دامنه و گستره این بهینه‌یابی، جاذب انرژی بهینه شده برای یک زلزله خاص تحت زلزله‌های دیگر مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- معادلات حاکم بر حرکت سازه خطی اولیه و جاذب انرژی غیرخطی ارتعاشی ضربه‌ای

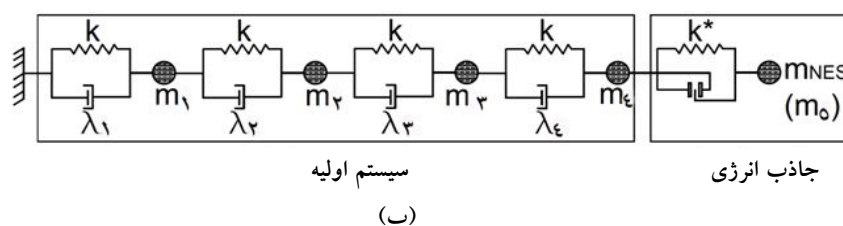
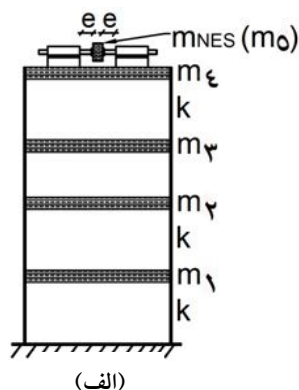
به عنوان نمونه یک سیستم چهار درجه آزادی خطی میرا که یک VI NES به بالاترین طبقه آن متصل شده است در شکل (۱) نشان داده شده است. جرم NES از طریق یک فنر خطی نرم به سازه اصلی متصل شده است، به علاوه دو قید صلب جابه‌جایی نسبی جرم طبقه آخر و جرم NES را طوری محدود کرده‌اند که کوچک تر یا مساوی با فضای آزاد حرکت تعیین شده (e) باشد. معادلات حرکت سیستم نشان داده شده در شکل (۱) بر حسب جابه‌جایی نسبت به زمین به این صورت هستند:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\Gamma\ddot{u}_g \quad (1)$$

که  $\mathbf{M}$ ،  $\mathbf{K}$  و  $\mathbf{C}$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی کل سازه هستند، همچنین:

$$\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n]^T = [x_1 - u_g \ x_2 - u_g \ \dots \ x_n - u_g]. \quad (2)$$

بردار جابه‌جایی طبقات نسبت به زمین است به طوری که  $x_1$ ،  $x_2$ ، ... و  $x_n$  به ترتیب جابه‌جایی‌های مطلق طبقه اول، دوم، ... و  $n$ ام هستند و  $u_g$  جابه‌جایی زمین است،  $\ddot{u}_g$  شتاب تحریک زمین در هر لحظه و  $\Gamma = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$  بردار شبه‌استاتیک است. ماتریس میرایی سازه



شکل ۱- الف) قاب چهار طبقه نمونه و سیستم جاذب انرژی ارتعاشی - ضربه‌ای متصل به آن، ب) مدل مکانیکی قاب و سیستم کنترلی

معادلات (۱) با شرایط اولیه جدید پس از برخورد تا هنگام برخورد مجدد برقرار است. پاسخ دینامیکی سیستم با VI NES متصل به آن با استفاده از نرم‌افزار MATLAB شبیه سازی شده است که با حل عددی معادلات حرکت، لحظات زمانی وقوع برخوردها را با دقت بالا پیدا می‌کند. این نوع از مسائل دینامیکی از نقطه نظرهای تحلیلی و محاسباتی دشواری خاص خود را دارند زیرا لحظاتی که برخوردها در آن اتفاق می‌افتند از طریق خود حل مسئله تعیین می‌شود و نمی‌توان آنها را پیش از حل مسئله تعیین نمود. به علاوه، رفتار غیرخطی شدید سیستم دقیقاً در همین لحظات به وجود می‌آید (بر اثر تحریک ضربه‌ای اعمال شده به سیستم یکپارچه) و همچنین، دقیقاً در همین لحظات بخش عمده‌ای از انرژی به علت برخوردهای غیرارتجاعی بین جرم NES و جرم متصل به آن (از آنجا که  $C_r < 1$  ضریب برجهنگی) تلف می‌شود. بنابراین برای مدل سازی محاسباتی صحیح این نوع از مسائل دینامیکی، محاسبه دقیق لحظات وقوع ضربه‌های ارتعاشی و نیز میزان انرژی تلف شده در هر برخورد

خطی اولیه طبق روش رایلی و بر مبنای ماتریس‌های جرم و سختی از طریق رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\hat{C} = a_1 \hat{M} + a_2 \hat{K} \quad (3)$$

که در این رابطه  $\hat{M}$ ،  $\hat{K}$  و  $\hat{C}$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه خطی اولیه هستند. همچنین  $a_1$  و  $a_2$  ضرایب تناسب رایلی هستند که با فرض میرایی مودی یکسان برای مودهای ارتعاشی اول و سوم سازه و با استفاده از فرکانس این دو مود به دست می‌آیند. با توجه به اینکه از میرایی جاذب انرژی غیرخطی ارتعاشی - ضربه‌ای صرف نظر شده است، ماتریس میرایی کل سازه (C) از افزودن یک سطر و یک ستون صفر به سطر و ستون آخر ماتریس  $\hat{C}$  به دست می‌آید.

این دستگاه معادلات تا برقراری شرایط برخورد یعنی  $|x_{n-1} - x_n| = e$  حاکم بر حرکت سیستم هستند. در لحظه برخورد دو قید پیوستگی جابه‌جایی‌ها و عدم پیوستگی سرعت‌ها به علت اتلاف انرژی ناشی از برخورد غیرکشسان به سیستم اعمال می‌شود. برخوردهای غیرارتجاعی بین جرم و دیواره با استفاده از ضریب برجهنگی مدل شده‌اند. دستگاه

اهمیت زیادی دارد.

### ۳- تحریک‌های لرزه‌ای

در این مطالعه عملکرد VI NES در برابر سه تحریک لرزه‌ای شناخته شده مورد مطالعه قرار گرفته است. لذا پاسخ قاب کنترل نشده و کنترل شده با جاذب انرژی غیرخطی در برابر این سه زلزله تاریخی بررسی شده است:

۱. طبس، مولفه شمال-جنوب، ۱۶ سپتامبر ۱۹۷۸
۲. نورث ریج، مولفه شمال-جنوب، ۱۷ ژانویه ۱۹۹۴
۳. کوبه، مولفه شمال-جنوب، ۱۷ ژانویه ۱۹۹۵.

زلزله‌های مورد استفاده در این تحقیق از بین معروف‌ترین زلزله‌های شدیدی که در زلزله‌خیزترین نقاط دنیا (مناطق ایران، آمریکا و ژاپن) به وقوع پیوسته‌اند انتخاب شده‌اند. البته می‌توان تعداد رکوردهای لرزه‌ای بیشتری را برای اظهارنظر جامع‌تر در مورد عملکرد جاذب انرژی غیرخطی ارتعاشی-ضربه‌ای در کنترل ارتعاش سازه به‌کار گرفت. اما از آنجا که استفاده از این نوع سیستم جاذب انرژی برای کاهش پاسخ لرزه‌ای در مراحل اولیه توسعه در دنیا قرار دارد، در تحقیق حاضر از سه رکورد ذکر شده جهت اعمال آن بر سازه‌های با ۴، ۷ و ۱۰ طبقه استفاده شده است. از آنجایی که توصیف پدیده پیچیده‌ای چون پتانسیل زلزله در تخریب سازه‌ها تنها با بیان مقدار حداکثر شتاب زمین به‌طور ذاتی غیرممکن است و بر مبنای تحقیقات صورت گرفته مقیاس قابل اطمینانی برای تعیین پتانسیل تخریب زلزله نیست، مقیاس‌های شدت<sup>۱۲</sup> مختلفی برای یک زلزله تعریف شده است. از بین تمامی مقیاس‌های شدت موجود، آنهایی که به‌طور مستقیم از تاریخچه زمانی ثبت شده زلزله قابل استخراج باشند انتخاب شده‌اند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- حداکثر شتاب زمین :

$$PGA = \max |\ddot{u}_g(t)| \quad (6)$$

- حداکثر جابه‌جایی و حداکثر سرعت زمین :

$$PGV = \max |\dot{u}_g(t)|, \quad PGD = \max |u_g(t)| \quad (7)$$

- شدت آریاس<sup>۱۳</sup> (مقیاس وابسته به انرژی):

$$I_A = (\pi/2g) \int_0^{rd} [\ddot{u}_g(t)]^2 dt \quad (8)$$

ضریب برجهندگی که مقادیر مطلق سرعت جرم‌های برخورد کننده قبل و بعد از هر برخورد را به هم مرتبط می‌کند با عبارت زیر تعریف می‌شود:

$$v'_{n-1} - v'_n = c_r (v_n - v_{n-1}) \quad (4)$$

که در آن  $v'_{n-1}$  و  $v_{n-1}$  نمایانگر سرعت جرم  $m_{n-1}$  به ترتیب قبل و پس از برخورد،  $v'_n$  و  $v_n$  نمایانگر سرعت جرم  $m_n$  به ترتیب قبل و پس از برخورد و  $c_r$  نمایانگر ضریب برجهندگی هستند. واضح است که ضریب برجهندگی در بازه  $0 < c_r < 1$  قرار دارد که مقدار واحد متناظر با برخوردهای کاملاً ارتجاعی و مقدار صفر متناظر با برخوردهای کاملاً خمیری است. ضریب برجهندگی به نوع ترکیب اجسام و سطوح برخورد کننده و بزرگی سرعت اجسام حین برخورد بستگی دارد، اما در این مطالعه فرض می‌شود که در هر شبیه‌سازی عددی ثابت باقی می‌ماند. انرژی دو جرم برخورد کننده در حین برخورد پایستار نیست زیرا  $c_r < 1$  اندازه حرکت کل یک سیستم جدا شده (ایزوله)، سیستمی با اندرکنش قابل صرف‌نظر با محیط، تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند. در اینجا دو جرم برخورد کننده با یکدیگر به‌عنوان سیستمی که اصل بقای اندازه حرکت برای آن اعمال می‌شود در نظر گرفته می‌شود. با فرض اینکه آثار مقاومت هوا، اصطکاک و نیروهایی که از طرف جرم بقیه طبقات به سیستم اعمال می‌شود، در طول زمان بی‌نهایت کوچک اندرکنش جرم‌های برخورد کننده با یکدیگر قابل صرف‌نظر کردن است، نیروی خالص خارجی اعمال شده به سیستم تقریباً صفر است. این با اصل بقای اندازه حرکت که در ادبیات فنی برای این نوع مسائل طبق رابطه زیر به‌کار رفته مطابقت دارد:

$$m_{n-1} v_{n-1} + m_n v_n = m_{n-1} v'_{n-1} + m_n v'_n \quad (5)$$

با استفاده از دو رابطه (۴) و (۵) با داشتن سرعت دو جرم قبل از برخورد و ضریب برجهندگی، سرعت آنها پس از برخورد به‌دست می‌آید.

- جابه‌جایی مطلق تجمعی:

$$CAD = \int_0^{rd} |\ddot{u}_g(t)| dt \quad (9)$$

- جذر میانگین مربعات سرعت:

$$v_{rms} = \sqrt{(1/T_D) \int_0^{rd} [\dot{u}_g(t)]^2 dt} \quad (10)$$

- مدت زمان حرکت قوی زمین:

$$T_D = t(0.95I_A) - t(0.05I_A) \quad (11)$$

- زمان تناوب متوسط:

$$I = PGV(T_D^{0.25}) \quad (12)$$

که  $u_g$ ،  $\dot{u}_g$  و  $\ddot{u}_g$  به ترتیب جابه‌جایی، سرعت و شتاب حرکت زمین،  $rd$  مدت زمان حرکت زمین و  $T_D$  مدت زمان حرکت قوی زمین یعنی بازه زمانی که در آن انرژی منتقل شده از زلزله به سازه از ۹۵ درصد به ۵ درصد مقدار کل آن می‌رسد هستند. این مقادیر برای سه رکورد زلزله انتخابی در جدول (۱) ارائه شده‌اند. همان‌طور که از مقادیر مقیاس‌های شدت مشخص است، دو زلزله نورث ریچ و کوبه دارای مدت زمان حرکت زمین مؤثر کوتاه و مقادیر بزرگ PGA و PGV هستند. زلزله طبس دارای حداکثر شتاب زمین تقریباً مساوی با دو زلزله دیگر است اما مدت زمان حرکت زمین مؤثر آن حدود دو برابر کوبه است. با مقایسه این سه زلزله از لحاظ محتوای انرژی و ظرفیت تخریب، معلوم است که زلزله طبس در بین رکوردهای انتخاب شده دارای بیشترین محتوای انرژی و بالاترین پتانسیل تخریب است.

#### ۴- بهینه‌یابی، معیارهای ارزیابی و نسبت انرژی اتلافی

پارامترهای VI NES، شامل سختی  $k_n$  و فضای آزاد حرکت  $e$ ، با استفاده از مجموعه‌ای از معیارهای ارزیابی بهینه‌یابی شده‌اند. معیارهایی که برای اختصاص مقیاس‌های کمی به پاسخ لرزه‌ای سیستم به‌کار می‌روند، توسط اسپنسر و همکاران [۱۵] برحسب کمیت‌های پاسخ حداکثر تعریف شده‌اند. تعریف این معیارهای ارزیابی به‌طور اجمالی در جدول (۲) آورده شده است. در تمامی این شاخص‌ها هدف بهینه‌سازی تعیین حداقل مقدار

خروجی ممکن برای هر معیار است. این شاخص‌ها به‌طور جداگانه برای هر زلزله مورد مطالعه محاسبه می‌شود. همچنین، در تمامی معیارها صورت کسر نمایانگر کمیت‌های کنترل‌شده پاسخ سازه و مخرج کسر نمایانگر کمیت‌های کنترل نشده پاسخ سازه است.

روش به کار گرفته شده برای بهینه‌سازی پارامترهای NES، روش جستجوی هماهنگی<sup>۱۴</sup> است که یک الگوریتم آزمون و خطای مرتبه بالا<sup>۱۵</sup> است. این روش یک الگوریتم تکاملی<sup>۱۶</sup> است که نیاز به مقادیر اولیه ندارد و به جای جستجوی گرادیانی از جستجوی تصادفی استفاده می‌کند؛ لذا، نیازی به اطلاعات وابسته به مشتق‌گیری ندارد. این الگوریتم یک روش بهینه‌یابی قدرتمند در مقایسه با روش‌های متداول ریاضی یا شیوه‌های با مبنای الگوریتم ژنتیک<sup>۱۷</sup> برای مسائل مهندسی سازه است [۱۶]. بازه تغییرات فضای آزاد حرکت  $e$  بین ۰/۰۵ و ۱ متر در نظر گرفته شده و VI NES با یک فنر خطی نرم به سازه اصلی متصل شده است که مقادیر نسبت سختی،  $k_n / k_1$ ، از ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۷۵ متغیر است. با وجود اینکه هر معیار ارزیابی طبق تعریف بیانگر حداکثرهای کمیت‌های مشخص محاسبه شده متناظر با همه زلزله‌های مورد نظر است، اما در این تحقیق هر یک از آنها به ازای یک زلزله مشخص محاسبه می‌شوند تا پارامترهای مورد نظر برای هر زلزله بهینه شوند. تابع هدف در نظر گرفته شده برای حداقل‌سازی با بهینه‌یابی به این صورت انتخاب شده است:

$$OF = J_1 + J_2 + J_5 + J_e \quad (13)$$

این تابع هدف که با بهینه‌یابی حداقل می‌شود طبق تعریف مجموع نسبت‌های جابه‌جایی حداکثر کنترل شده به کنترل نشده ( $J_1$ )، جابه‌جایی نسبی جانبی حداکثر کنترل شده به کنترل نشده ( $J_2$ )، نرم جابه‌جایی حداکثر کنترل شده به کنترل نشده ( $J_5$ ) و نرم جابه‌جایی نسبی جانبی حداکثر کنترل شده به کنترل نشده ( $J_e$ ) است. بنابراین هدف از بهینه‌یابی یافتن پارامترهای جاذب انرژی به گونه‌ای است که باعث بیشترین کاهش در پاسخ‌های مرتبط با جابه‌جایی سازه کنترل شده نسبت

جدول ۱- مشخصات رکوردهای لرزه‌ای مورد استفاده

مقیاس‌های شدت										
$T_D$ (s)	PGA (g)	PGD (cm)	PGV (cm/s)	$I_A$ (cm/s)	CAD (cm)	$V_{rms}$ (cm/s)	I (cm/s <sup>0.75</sup> )	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	بزرگی	زلزله
۵/۳۱	۰/۸۴	۳۱/۹۲	۱۲۹/۳۷	۵۰۱/۳۰	۲۴۰/۸۳	۴۰/۱۶	۱۹۶/۴۲	۴۴۰/۵	۶/۷	نورث‌ریچ
۸/۳۳	۰/۸۲	۱۷/۸۶	۸۱/۳۰	۸۳۹/۰۷	۲۵۴/۸۵	۳۰/۱۹	۱۳۸/۱۱	۳۱۲	۶/۹	کوبه
۱۶/۱۵	۰/۸۵	۹۵/۴۷	۱۲۱/۳۸	۱۱۵۳/۲	۷۲۶/۰۵	۴۵/۹۸	۲۴۳/۳۲	۷۶۶/۸	۷/۴	طبس

جدول ۲- تعریف معیارهای ارزیابی

تعریف ریاضی	کمیت پاسخ سازه‌ای مربوطه	معیار ارزیابی
$J_1 = \max_{i \in \eta} t \left  u_i(t) \right  / u^{\max}$	حداکثر جابه‌جایی طبقات (نسبت به زمین)	$J_1$
$J_2 = \max_{i \in \eta} t \left( \left  d_i(t) \right  / h_i \right) / d_n^{\max}$	حداکثر رانش بین طبقه‌ای	$J_2$
$J_3 = \max_{i \in \eta} t \left  \ddot{u}_{ai}(t) \right  / \ddot{u}_a^{\max}$	حداکثر شتاب مطلق طبقه (نسبت به زمین)	$J_3$
$J_4 = \max_{i \in \eta} t \left  \sum_{i \in \eta} m_i \ddot{u}_{ai}(t) \right  / F_b^{\max}$	حداکثر نیروی اینرسی در هر درجه آزادی	$J_4$
$J_5 = \max_{i \in \eta} t \left\  u_i(t) \right\  / \left\  u^{\max} \right\ $	حداکثر نُرم جابه‌جایی طبقه نسبت به زمین	$J_5$
$J_6 = \max_{i \in \eta} t \left( \left\  d_i(t) \right\  / h_i \right) / \left\  d_n^{\max} \right\ $	حداکثر نُرم رانش بین طبقه‌ای	$J_6$
$J_7 = \max_{i \in \eta} t \left\  \ddot{u}_{ai}(t) \right\  / \left\  \ddot{u}_a^{\max} \right\ $	حداکثر نُرم شتاب مطلق طبقه (نسبت به زمین)	$J_7$
$J_8 = \max_{i \in \eta} t \left\  \sum_{i \in \eta} m_i \ddot{u}_{ai}(t) \right\  / \left\  F_b^{\max} \right\ $	حداکثر نُرم نیروی اینرسی در هر درجه آزادی	$J_8$

سازه از زلزله است. این نسبت انرژی در لحظات وقوع برخورد‌ها محاسبه می‌شود. انرژی ورودی به سازه از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود: [۱۹ و ۲۰]

$$E_I = \left[ \frac{1}{2} \dot{u}^T M \dot{u} \right]_0^t + \int_0^t \dot{u}^T C \dot{u} dt + \int_0^t f_s^T \dot{u} dt + \sum_{p=1}^n E_{SP} = - \int_0^t \dot{u}^T M \ddot{u}_g dt = - \int_0^t \left( \sum_{j=1}^n m_j \ddot{u}_g \ddot{u}_j \right) dt \quad (14)$$

به سازه کنترل نشده می‌شود. برای مطالعه ظرفیت VI NES در جذب و اتلاف انرژی از سازه اولیه نسبت انرژی  $E_{SD} / E_I$  لحاظ شده است که در آن  $E_{SD}$  انرژی تلف‌شده توسط میرایی سازه خطی و برخورد‌های غیرارتجاعی است و  $E_I$  انرژی نسبی ورودی به



ابتدای حرکت سازه صرف نظر شد.

### ۵- مقایسه مدل سازی با نتایج تحقیقات گذشته

به منظور صحت سنجی معادلات و روش حل مورد استفاده، نتایج تحلیل با نتایج به دست آمده از تحقیق نوسرا و همکاران [۱۰، ۱۷ و ۱۸] که با مطالعات آزمایشگاهی کالیبره شده اند مقایسه شده است. در تحقیق مذکور سازه دو درجه آزادی خطی به همراه VI NES متصل به آن تحت چند رکورد زلزله مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات سازه دو درجه آزادی به این شرح است:

$$m_1 = m_2 = 2/9 \times 10^6, k_1 \quad (16)$$

$$= k_2 = 2/5 \times 10^7, \xi_1 = \xi_2 = 0/01, k_3 / k_1 = 0/02$$

در شکل (۲) نتایج مربوط به شبیه سازی زلزله ال سترو برای مقایسه و صحت سنجی آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج تطابق بسیار خوبی دارند. در این شکل ها تاریخچه زمانی جابه جایی درجات آزادی سازه اولیه، جابه جایی نسبی بین VI NES و کف متصل به آن و میزان انرژی لرزه ای آنی تلف شده متناظر با هر ضربه ارتعاشی مقایسه شده اند.

### ۶- بررسی نتایج شبیه سازی عددی سازه خطی کنترل شده با

#### سیستم جاذب انرژی غیرخطی ارتعاشی - ضربه ای VINES

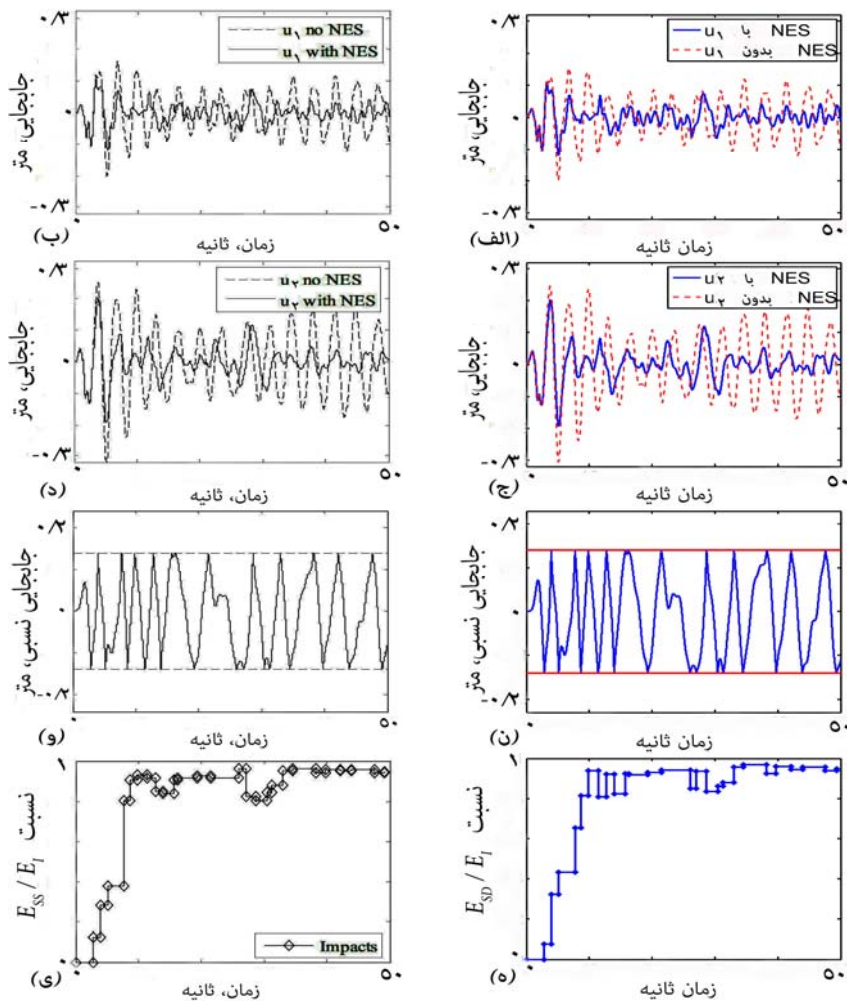
برای سادگی مسئله، فرض شده که جرم درجات آزادی سازه اصلی و سختی آنها با یکدیگر مساوی باشند یعنی  $k_1 = k_2 = k_3 = \dots = k_{n-1}$  و  $m_1 = m_2 = m_3 = \dots = m_{n-1}$  و سازه اصلی به طور متناسب و لزج میرا شده باشد. یک نسبت میرایی نسبتاً کوچک ۰/۰۲ برای موده های اول و سوم سازه در نظر گرفته شده است یعنی  $\xi_1 = \xi_3 = 0/02$ . سیستم دارای میرایی لزج اولیه و همچنین اتلاف انرژی غیرفعال اضافی ناشی از برخوردهای غیرارتجاعی جرم NES و جرم طبقه آخر است. مشخصات اولیه سازه در نظر گرفته شده به این شرح است: جرم طبقات  $m = 2/9 \times 10^5$  kg، سختی طبقات  $k = 1 \times 10^4$  N/m

که در آن  $\mathbf{u}$  و  $\dot{\mathbf{u}}$  به ترتیب بردارهای جابه جایی و سرعت نسبت به زمین درجات آزادی افقی طبقات ساختمان،  $\ddot{\mathbf{u}}_g$  بردار شتاب زمین در هر لحظه،  $\mathbf{f}_s$  بردار نیروی بازگرداننده،  $\mathbf{C}$  و  $\mathbf{M}$  ماتریس های میرایی و جرم سازه،  $m_j$  و  $\dot{u}_j$  جرم و سرعت نسبی هر طبقه و  $\ddot{u}_g$  شتاب زمین در هر لحظه،  $P_t$  تعداد برخوردهای حادث شده تا لحظه  $t$  و  $E_{SP}$  انرژی تلف شده حین برخورد  $p$  ام هستند. انرژی اتلافی نیز از رابطه زیر تعیین می شود:

$$E_{SD} = E_D + E_S = \int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} dt + \sum_{p=1}^{P_t} E_{SP} \quad (15)$$

از لحاظ طراحی سازه ای بهتر است که تعداد برخوردهای بین دو جرم کمتر و به ابتدای حرکت سازه محدود شود. بدین منظور اثر تعداد برخوردها نیز در تابع هدف در نظر گرفته شد و با بررسی نتایج مشخص شد که می توان به ازای حداقل تعداد برخورد در ابتدای حرکت به نتایج مطلوب برای یک زلزله خاص رسید اما این عمل موجب می شود که سیستم کنترلی عملکرد پهن باند خود را از دست داده و نتایج مطلوب آن محدود به زلزله ای شود که بهینه یابی برای آن انجام گرفته است. یعنی با حداقل کردن تعداد برخوردها برای یک زلزله، مقادیر فضای آزاد حرکت و نسبت سختی تا حدی افزایش می یابند که ممکن است سازه در برابر زلزله ای به غیر از زلزله مبنای بهینه یابی، هیچ برخوردی را تجربه نکند و عملکرد جاذب انرژی غیرخطی به عملکرد جاذب انرژی خطی (یا میراگر با جرم تنظیم شده TMD) تبدیل شود. لذا، برای حفظ عملکرد پهن باند سیستم جاذب انرژی غیرخطی، باید برخوردها تا حد ممکن تا انتهای حرکت وجود داشته باشند. البته دلیل دیگر لزوم افزایش تعداد برخوردها و توزیع شدن آنها تا پایان حرکت، حفظ عملکرد سیستم کنترلی در اتلاف انرژی لرزه ای و کاهش پاسخ تا انتهای حرکت سازه است زیرا که از اتلاف ناشی از میرایی سیستم جاذب انرژی غیرخطی صرف نظر شده است. با توجه به این توضیحات از اعمال تغییر در تابع هدف به منظور کاهش تعداد برخوردها و محدود کردن آنها به

روش های عددی در مهندسی، سال ۳۵، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۵



شکل ۲- نتایج زلزله ال سترو: الف) جابه‌جایی طبقه اول تحقیق حاضر، ب) جابه‌جایی طبقه اول [۱۰]، ج) جابه‌جایی طبقه دوم تحقیق حاضر، د) جابه‌جایی طبقه دوم [۱۰]، ن) جابه‌جایی نسبی جاذب انرژی و طبقه دوم تحقیق حاضر، و) جابه‌جایی نسبی جاذب انرژی و طبقه دوم [۱۰]، ه) نسبت انرژی اتلافی در لحظات برخورد تحقیق حاضر، ی) نسبت انرژی اتلافی در لحظات برخورد [۱۰]

مودهای ارتعاشی در پاسخ سازه همچنین با استفاده از طیف فوریه پاسخ سازه‌های کنترل شده و کنترل نشده مقایسه می‌شود.

در تحقیق نوسرا و همکاران [۱۰] برای یک سازه خطی به‌همراه یک جاذب انرژی ارتعاشی-ضربه‌ای متصل به بالاترین طبقه آن اینگونه گزارش شده است که مقدار فضای آزاد حرکت بهینه به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر مقدار ضریب برجهنگی قرار ندارد؛ در آن تحقیق بازه تغییرات ضریب برجهنگی بین ۰/۵ تا ۰/۸ در نظر گرفته شده بود. همچنین در تحقیق جندلن [۲۱] ضریب برجهنگی بهینه

زمان تناوب، درصد جرم مؤثر مودی و فرکانس مودهای ارتعاشی سازه خطی در جدول (۳) آورده شده است. درصد جرم مؤثر مودی از آن جهت آورده شده است که میزان اهمیت مود ارتعاشی را بیان می‌کند و هرچه بیشتر باشد نشان‌دهنده آن است که مود ارتعاشی به آسانی با تحریک پایه سازه تحریک می‌شود. جرم مؤثر مودی را می‌توان به‌عنوان قسمتی از جرم کل که در هر مود در مقابل زلزله پاسخ نشان می‌دهد تفسیر کرد. بالا بودن درصد جرم مؤثر مود اول سازه خطی کنترل نشده نشان‌دهنده آن است که مود اول بیشترین سهم را در پاسخ سازه دارد. میزان مشارکت

جدول ۳- زمان تناوب، فرکانس و جرم مؤثر مودی مودهای سازه خطی اصلی

تعداد طبقات	شماره مود									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۴	زمان تناوب (ثانیه)	۰/۹۷	۰/۳۴	۰/۲۲	۰/۱۸	-	-	-	-	-
	فرکانس (هرتز)	۱/۰۳	۲/۹۴	۴/۵۴	۵/۵۵	-	-	-	-	-
	درصد جرم مؤثر	۸۹/۳	۸/۴	۲	۰/۳	-	-	-	-	-
۷	زمان تناوب (ثانیه)	۱/۶۲	۰/۵۵	۰/۳۴	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۱۷	-	-
	فرکانس (هرتز)	۰/۶۲	۱/۸۲	۲/۹۴	۴	۴/۷۶	۵/۵۵	۵/۸۸	-	-
	درصد جرم مؤثر	۸۶/۲	۹	۲/۹	۱/۲	۰/۵	۰/۲	۰	-	-
۱۰	زمان تناوب (ثانیه)	۲/۲۶	۰/۷۶	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۲	۰/۱۹	۰/۱۸
	فرکانس (هرتز)	۰/۴۴	۱/۳۱	۲/۱۷	۲/۹۴	۳/۷	۴/۳۵	۵	۵/۲۶	۵/۵۵
	درصد جرم مؤثر	۸۴/۸	۹/۱	۳/۱	۱/۴	۰/۸	۰/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۱

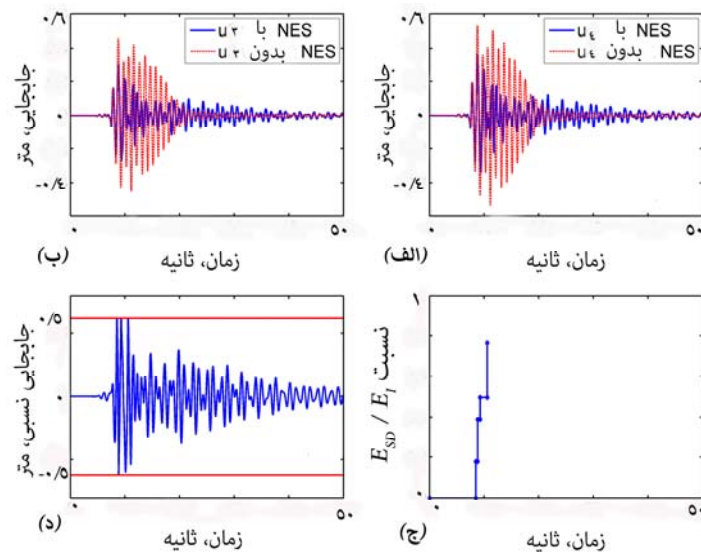
نسبت انرژی  $E_{SD} / E_I$  در طی زمان در لحظات وقوع برخوردها نشان داده شده است. در شکل (۵) پاسخ سازه چهار درجه آزادی بهینه شده برای زلزله نورث ریج به مجموعه زلزله‌ها ارائه شده است. در جدول (۵) مقادیر عددی معیارهای ارزیابی متناظر با مقادیر بهینه نسبت سختی و فضای آزاد حرکت ارائه شده‌اند. در شکل‌های (۶) تا (۸) پاسخ و نسبت انرژی اتلافی متناظر با ضربه‌های ارتعاشی برای قاب‌های هفت و ده طبقه ارائه شده است.

برای بررسی ویژگی پهن باند بودن سیستم VI NES، سازه چهار درجه آزادی مورد نظر با پارامترهای بهینه شده برای زلزله نورث ریج تحت رکوردهای طبس و کوبه مورد مطالعه قرار گرفته است. هشت معیار ارزیابی برای سیستم بهینه شده براساس زلزله نورث ریج، برای هر سه زلزله مورد نظر در جدول (۶) آورده شده است. برای سازه هفت درجه آزادی نسبت جرم VI NES به جرم سازه خطی برابر ۵ درصد در نظر گرفته شده است. لذا نسبت جرم سیستم کنترلی به جرم طبقه متصل به آن و جرم مؤثر مودی مود اول سازه به ترتیب ۳۵ و ۵/۸ درصد خواهد بود. برای سازه ده درجه آزادی، جرم سیستم کنترلی ۵ درصد و ۳/۵ درصد جرم سازه

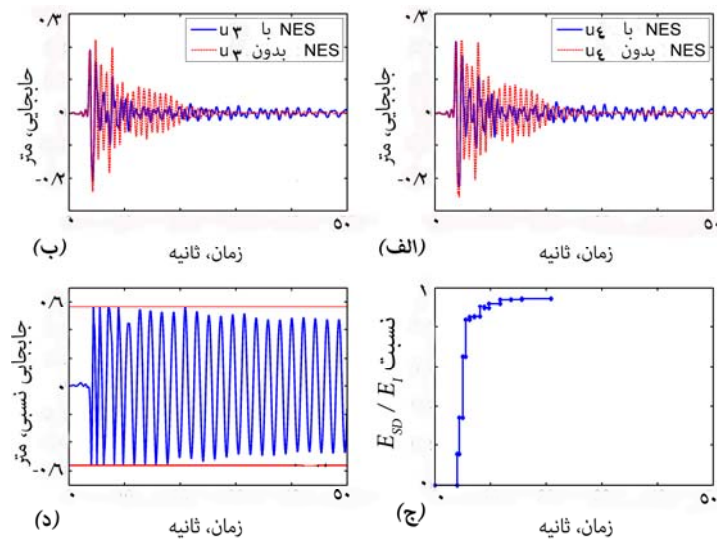
برروی مقدار ۰/۶۲ ثابت در نظر گرفته شده بود. به علاوه در تحقیق ال شودیفات و همکاران [۲۲] هم ضریب برجهندگی برروی مقدار ۰/۷ ثابت در نظر گرفته شده است. بر همین مبنا، در تحقیق حاضر تغییر و بهینه‌سازی ضریب برجهندگی اولویت‌دار در نظر گرفته نشده و برروی مقدار ۰/۵ ثابت شده است، یعنی مقداری بین حدود تئوریک ضریب برجهندگی که متناظر با برخوردهای کاملاً ارتجاعی و کاملاً خمیری است. برای سازه چهار درجه آزادی، جرم سیستم کنترلی ۵ درصد و ۷/۵ درصد جرم سازه خطی فرض شده است، لذا نسبت جرم VI NES به جرم طبقه متصل به آن و جرم مؤثر مودی مود اول سازه خطی در حالت اول به ترتیب ۲۰ و ۵/۶ درصد و در حالت دوم به ترتیب ۳۰ و ۸/۴ درصد است. خلاصه نتایج بهترین مقادیر فضای آزاد حرکت  $e$  و نسبت سختی  $k_0/k_1$  به ازای زلزله‌ها و مقادیر نسبت جرم مختلف برای سازه چهار درجه آزادی در جدول (۴) آورده شده است. در شکل‌های (۳) و (۴) پاسخ جابه‌جایی نسبی درجات آزادی سیستم کنترل نشده و سیستم کنترل شده با VI NES و جابه‌جایی نسبی بین جرم طبقه آخر و جرم NES برای سازه چهار درجه آزادی آورده شده‌اند. در این شکل‌ها همچنین

جدول ۴- مقادیر بهینه نسبت سختی و فضای آزاد حرکت برای سازه چهار درجه آزادی

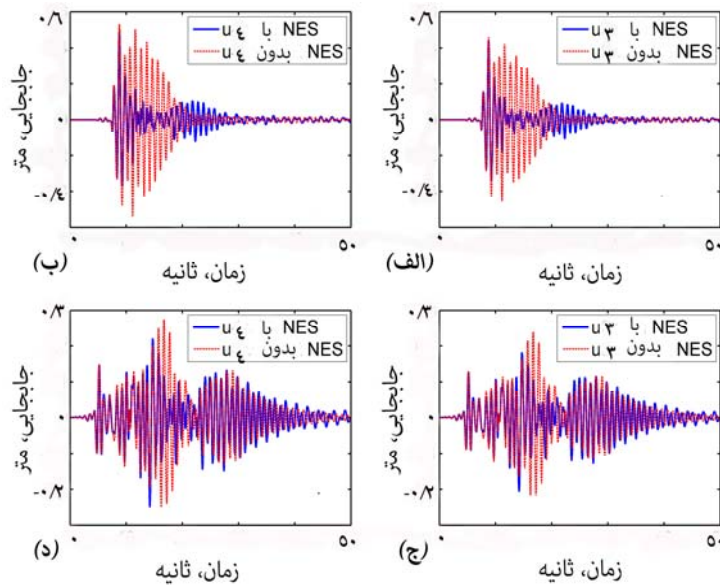
تحریک لرزه‌ای	نسبت جرم (جرم NES به جرم سازه خطی)	فضای آزاد حرکت $e$ (m)	نسبت سختی	تعداد برخورد	زمان آخرین برخورد
طیس	۰/۰۵	۰/۲۳۸۵	۰/۰۰۵۴	۳۸	۲۶/۸۴
	۰/۰۷۵	۰/۴۰۵۹	۰/۰۱۶۶	۲۰	۳۹/۷۳
کوبه	۰/۰۵	۰/۵۹۲۸	۰/۰۱۴۴	۱۶	۲۰/۳۷
	۰/۰۷۵	۰/۶۱۸۰	۰/۰۲۶۴	۴	۱۰/۵۷
نورث ریچ	۰/۰۵	۰/۵۶۰۹	۰/۰۰۵۲	۱۳	۲۰/۸۹
	۰/۰۷۵	۰/۶۳۷۹	۰/۰۰۰۵	۴	۶/۰۴



شکل ۳- سازه چهار درجه آزادی، زلزله کوبه- نسبت جرم ۰/۰۷۵ فضای آزاد حرکت ۰/۶۱۸- نسبت سختی ۰/۰۲۶۴: الف) جابه‌جایی طبقه چهارم، ب) جابه‌جایی طبقه سوم، ج) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخوردها، د) جابه‌جایی نسبی NES و طبقه چهارم



شکل ۴- سازه چهار درجه آزادی، زلزله نورث ریچ- نسبت جرم ۰/۰۵- فضای آزاد حرکت ۰/۵۶۰۹- نسبت سختی ۰/۰۰۵۲: الف) جابه‌جایی طبقه چهارم، ب) جابه‌جایی طبقه سوم، ج) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخوردها، د) جابه‌جایی نسبی NES و طبقه چهارم



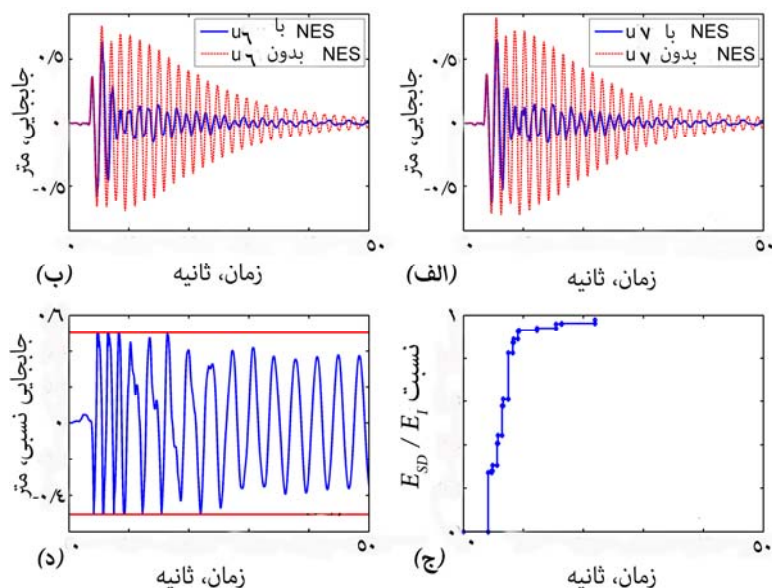
شکل ۵- سازه چهار درجه آزادی، پاسخ سازه با سیستم کنترلی بهینه شده با زلزله نورت ریج: الف) جابه جایی طبقه سوم، تحریک کوبه، ب) جابه جایی طبقه چهارم، تحریک کوبه، ج) جابه جایی طبقه سوم، تحریک طبس، د) جابه جایی طبقه چهارم، تحریک طبس

جدول ۵- معیارهای ارزیابی سازه چهار درجه آزادی، بهینه یابی برای یک زلزله و اعمال همان زلزله به سازه

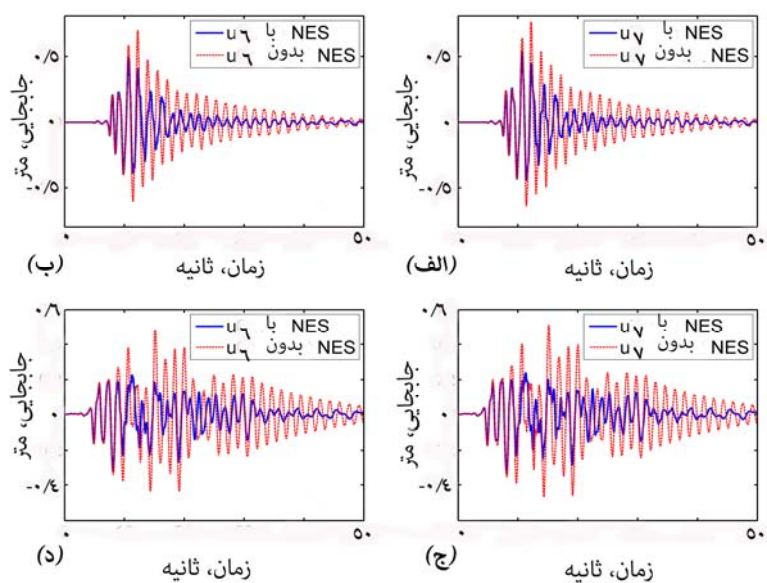
تحریک لرزه‌ای	نسبت جرم	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_7$	$J_8$
طبس	۰/۰۵	۰/۵۹	۰/۵۸	۱/۰۲	۰/۵۸	۰/۶۵	۰/۶۶	۰/۸۸	۰/۶۶
	۰/۰۷۵	۰/۶۱	۰/۵۵	۱/۲۲	۰/۵۵	۰/۶۴	۰/۶۴	۱/۳	۰/۶۴
کوبه	۰/۰۵	۰/۷۹	۰/۸۵	۱/۰۴	۰/۸۶	۰/۵۶	۰/۵۵	۱/۳۳	۰/۵۵
	۰/۰۷۵	۰/۶۸	۰/۷	۱/۱۲	۰/۶۹	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۸۱	۰/۵۵
نورت ریج	۰/۰۵	۰/۸۸	۰/۸۲	۱/۴۴	۰/۸۲	۰/۶۷	۰/۶۷	۱/۰۵	۰/۶۷
	۰/۰۷۵	۰/۸۴	۰/۸	۱/۱۴	۰/۸	۰/۶	۰/۶	۰/۷۶	۰/۶

از جدول (۴) مشخص است که با افزایش نسبت جرم تعداد برخوردهای دو جرم کاهش می یابد. با بررسی جدول (۵) معلوم می شود که افزایش نسبت جرم به میزان ۲/۵ درصد، کاهش قابل توجهی در معیارهای ارزیابی ایجاد نکرده است اما به ازای نسبت جرم کمتر، تعداد برخوردها یا به عبارت دیگر تعداد تحریکهای ضربه ای اعمالی به سازه تا پایان حرکت بیشتر می شود. می توان اینگونه نتیجه گرفت که بهبود نسبی نتایج با افزایش جرم VI NES یک محدودیت ذاتی برای این نوع سیستم های کنترلی است. اما کاهش تعداد برخورد خاصیت پهن بانندی سیستم را تحت شعاع قرار می دهد که

خطی فرض شده است، لذا نسبت جرم VI NES به جرم طبقه متصل به آن و جرم مؤثر مودی مود اول سازه خطی در حالت اول به ترتیب ۵۰ و ۵/۹ درصد و در حالت دوم به ترتیب ۳۵ و ۴/۱ درصد می باشد. در جدول (۷) پارامترهای بهینه قاب های هفت و ده درجه آزادی برای نسبت جرم های ذکر شده و زلزله های مختلف ارائه شده است. در جداول (۸) و (۹) مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم کنترل شده هفت درجه آزادی با نسبت جرم ۵ درصد و برای قاب ده درجه آزادی با نسبت جرم های ۵ و ۳/۵ درصد آورده شده است.



شکل ۶- سازه هفت درجه آزادی، زلزله نورت ریج- نسبت جرم  $0/05$  - فضای آزاد حرکت  $0/5044$  - نسبت سختی  $0/005$ :  
 الف) جابه‌جایی طبقه هفتم، ب) جابه‌جایی طبقه ششم، ج) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخوردها، د) جابه‌جایی نسبی NES و طبقه هفتم

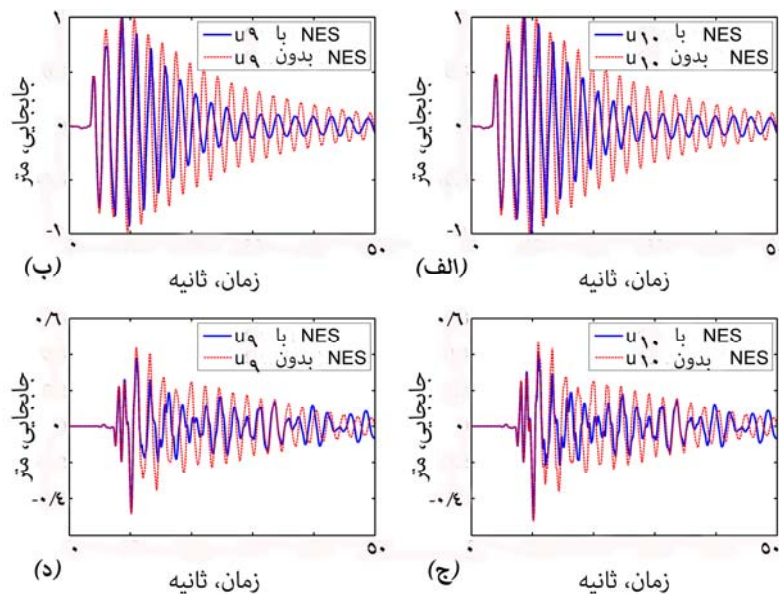


شکل ۷- سازه هفت درجه آزادی، پاسخ سازه با سیستم کنترلی بهینه‌شده با زلزله نورت ریج: الف) جابه‌جایی طبقه هفتم، تحریک کوبه، ب) جابه‌جایی طبقه ششم، تحریک کوبه، ج) جابه‌جایی طبقه هفتم، تحریک طبس، د) جابه‌جایی طبقه ششم، تحریک طبس

این مناسب نیست.

کرده است اما بر روی نرم جابه‌جایی و رانش بین طبقه‌ای اثر مطلوبی دارد (کاهش حداکثر جابه‌جایی، حداکثر رانش بین طبقه‌ای، نرم حداکثر جابه‌جایی و نرم حداکثر رانش بین طبقه‌ای برای زلزله کوبه به ترتیب ۹٪، ۳٪، ۴۵٪ و ۴۳٪ و برای زلزله طبس به ترتیب ۱۰٪، ۹٪، ۱۵٪ و ۱۳٪) که با کاهش‌های

با مشاهده جدول (۶) می‌توان نتیجه گرفت که NES VI طراحی شده براساس زلزله نورت ریج عملکرد نسبتاً مطلوبی در برابر رکوردهای کوبه و طبس دارد؛ به عبارت دقیق‌تر کاهش کوچکی در حداکثر جابه‌جایی‌ها و رانش‌های بین طبقه‌ای ایجاد



شکل ۸- سازه ده درجه آزادی، پاسخ سازه با سیستم کنترلی بهینه شده با زلزله طیس: الف) جابه جایی طبقه دهم، تحریک نورث ریج، ب) جابه جایی طبقه نهم، تحریک نورث ریج، ج) جابه جایی طبقه دهم، تحریک کوبه، د) جابه جایی طبقه نهم، تحریک کوبه

جدول ۶- معیارهای ارزیابی سازه چهار درجه آزادی، بهینه یابی برای زلزله نورث ریج با نسبت جرم ۰/۰۵ و

اعمال سه زلزله برای همان بهینه یابی

تحریک لرزه ای	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_7$	$J_8$
نورث ریج	۰/۸۸	۰/۸۲	۱/۴۴	۰/۸۲	۰/۶۷	۰/۶۷	۱/۰۵	۰/۶۷
کوبه	۰/۹۱	۰/۹۷	۱/۰۵	۰/۹۷	۰/۵۵	۰/۵۷	۰/۸۱	۰/۵۷
طیس	۰/۹	۰/۹۱	۱/۴	۰/۹۱	۰/۸۵	۰/۸۷	۱/۰۸	۰/۸۷

دارای ارتفاع های مختلف می توان دریافت که وقتی نسبت جرم NES VI به جرم سیستم خطی ثابت نگه داشته می شود، کاهش مقادیر پاسخ سازه به ازای تعداد برخوردهای بیشتری حاصل می گردد (مثلاً در بهینه یابی بر مبنای زلزله نورث ریج با نسبت جرم ثابت ۵ درصد، تعداد برخوردهای صورت گرفته بین جرم جاذب انرژی غیرخطی و جرم طبقه آخر قاب برای سازه های چهار، هفت و ده طبقه به ترتیب ۱۳، ۱۶ و ۲۹ برخورد است).

لازم به ذکر است که دو مکانیزم دینامیکی اصلی بر اندرکنش های انرژی بین سازه اولیه تحت تحریک لرزه ای و NES VI متصل به آن وجود دارد. اولین مکانیزم دینامیکی انتقال انرژی هدفمند است که منجر به اتلاف بخش عمده ای از انرژی ورودی لرزه ای در ابتدای حرکت (ناحیه با انرژی زیاد) می شود.

ایجاد شده در پاسخ سازه در برابر زلزله نورث ریج قابل رقابت هستند (به ترتیب ۱۲٪، ۱۸٪، ۳۳٪ و ۳۳٪). با مشاهده جدول (۷) می توان دریافت که در سازه های میان مرتبه (هفت و ده طبقه) مقدار نسبت سختی حاصل از بهینه یابی برابر با حداقل مقدار مجاز (۰/۰۰۵) شده است و با انتخاب مقدار فضای آزاد حرکت در محدوده مجاز نتایج مطلوبی برای هر سه تحریک به دست می آید. عملکرد پهن باند سیستم کنترل شده (جدول (۸) و (۹)) در قاب های میان مرتبه بسیار شبیه به سازه کوتاه مرتبه (چهار طبقه) و مطلوب است. در سازه ده طبقه نتایج به دست آمده با نسبت جرم ۳/۵ درصد تقریباً با نتایج مربوط به نسبت جرم ۵ درصد یکسان است اما باز هم افزایش نسبت جرم اثر مطلوبی بر کاهش پاسخ سیستم کنترل شده دارد. با مقایسه نتایج سازه های

جدول ۷- مقادیر بهینه نسبت سختی و فضای آزاد حرکت برای سازه هفت و ده درجه آزادی

درجات آزادی	زلزله	نسبت جرم (جرم NES به جرم سازه خطی)	فضای آزاد حرکت (m) e	نسبت سختی $k_n/k_1$	تعداد برخورد	زمان آخرین برخورد
۷	نورث ریج	۰/۰۵	۰/۵۰۴۴	۰/۰۰۵	۱۶	۲۱/۹۴
	نورث ریج	۰/۰۵	۰/۸	۰/۰۰۵	۲۹	۳۳/۶۸
۱۰	کوبه	۰/۰۵	۰/۱۹۱۰	۰/۰۰۵	۴۸	۴۵/۱۴
	طبس	۰/۰۵	۰/۷۳۰۵	۰/۰۰۵۲	۲۳	۳۵/۰۳
		۰/۰۳۵	۰/۸	۰/۰۰۵۵	۲۷	۳۳/۳۸

جدول ۸- معیارهای ارزیابی سازه هفت درجه آزادی، بهینه‌یابی با زلزله نورث ریج با نسبت جرم ۰/۰۵ و اعمال سه زلزله برای همان بهینه‌یابی

تحریک لرزه‌ای	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_7$	$J_8$
نورث ریج	۰/۷۹	۰/۸۸	۱/۹۵	۰/۸۳	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۸	۰/۴۲
کوبه	۰/۷۲	۰/۷۹	۱/۰۶	۰/۷۹	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۹۵	۰/۶۳
طبس	۰/۶۶	۰/۷۱	۱/۱۹	۰/۷۲	۰/۵۵	۰/۵۹	۰/۹۷	۰/۵۹

جدول ۹- معیارهای ارزیابی سازه ده درجه آزادی، بهینه‌یابی با زلزله نورث ریج با نسبت جرم ۰/۰۵ و زلزله طبس با نسبت جرم ۳/۵ درصد و اعمال سه زلزله برای همان بهینه‌یابی

مبنای بهینه‌یابی	نسبت جرم	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_7$	$J_8$	تحریک اعمال شده
نورث ریج	۰/۰۵	۰/۹۴	۰/۸۵	۲/۵	۰/۸۶	۰/۶۰	۰/۶۱	۱/۴	۰/۶۱	نورث ریج
نورث ریج	۰/۰۵	۰/۹۶	۰/۹۷	۱/۳۵	۰/۹۷	۰/۶۱	۰/۷۵	۰/۹۸	۰/۷۵	کوبه
نورث ریج	۰/۰۵	۰/۷۲	۰/۶۱	۱/۴۴	۰/۶۲	۰/۴۶	۰/۴۹	۰/۹۰	۰/۴۹	طبس
طبس	۰/۰۳۵	۱/۰۳	۰/۹۵	۲/۲۳	۰/۹۵	۰/۷۷	۰/۷۶	۱/۳۷	۰/۷۶	نورث ریج
طبس	۰/۰۳۵	۰/۹۹	۰/۹۵	۱/۲۲	۰/۹۵	۰/۷	۰/۸۱	۱/۰۲	۰/۸۱	کوبه
طبس	۰/۰۳۵	۰/۸۱	۰/۵۹	۱/۳۱	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۵۸	۰/۹۶	۰/۵۸	طبس

سازه و سیستم جاذب انرژی در مرحله اولیه بحرانی حرکت که انرژی لرزه‌ای سازه اولیه در بالاترین میزان خود قرار دارد اتفاق می‌افتد. مکانیزم دوم که بر انتقال انرژی از سازه اولیه به سیستم NES تأثیر دارد، بازتوزیع انرژی در بین مودها در سیستم یکپارچه (شامل سازه اولیه و سیستم کنترلی) ناشی از ضربه‌های

در واقع بازه زمانی وجود دارد که جاذب انرژی غیرخطی با فرکانسی تقریباً مساوی با فرکانس یکی از مودهای ارتعاشی سازه اولیه نوسان می‌کند تا مقدار انرژی کافی تلف شود و سپس حرکت از ناحیه تشدید گذرا<sup>۱۸</sup> خارج می‌شود. علاوه بر این، به علت واکنش بسیار سریع NES، شرایط تشدید داخلی بین



ارتعاشی است. برای سیستم‌های مورد نظر، این بازتوزیع انرژی به شکلی است که بخشی از انرژی لرزه‌ای از موده‌های پایین‌تر سازه اولیه با دامنه جابه‌جایی بیشتر و فرکانس کمتر به موده‌های با فرکانس بالاتر و دامنه جابه‌جایی کمتر منتقل می‌شود که موجب اتلاف مؤثر انرژی می‌گردد [۱۰]. در این تحقیق به منظور بررسی این دو مکانیزم از تبدیل فوریه گسسته استفاده شده است. در واقع همانگونه که از نمودارهای انرژی اتلافی در شکل‌های (۳)، (۴) و (۶) مشخص است، بخش عمده‌ای (تا ۸۰ درصد) از انرژی لرزه‌ای در طی پنج ضربه ارتعاشی ابتدایی حرکت اتلاف شده است. واضح است که این ضربه‌های ارتعاشی باعث تغییرات ناگهانی سرعت می‌شوند و شتاب‌های بزرگی را پدید می‌آورند. لذا، شتاب حداکثر کنترل‌شده غیرفعال (که در معیار  $J_3$  دیده شده است) می‌تواند در این سیستم نسبتاً زیاد باشد (جداول ۵، ۶، ۸ و ۹) و دلیل اینکه معیارهای ارزیابی  $J_3$  و  $J_4$ ، همین طور  $J_7$  و  $J_8$  در تابع هدف آورده نشده‌اند نیز همین است. شکل‌های (۵)، (۷) و (۸)، با نمایش پاسخ سازه دارای سیستم کنترلی بهینه‌شده برای یک زلزله به تحریک‌های لرزه‌ای دیگر، ویژگی پهن باند بودن سیستم جاذب انرژی ارتعاشی - ضربه‌ای به ترتیب در قاب‌های چهار، هفت و ده طبقه را نشان می‌دهند.

طیف فوریه پاسخ جابه‌جایی هر درجه آزادی نسبت به درجه آزادی قبل از آن برای دو سازه کنترل‌شده و کنترل نشده در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. با مشاهده این شکل‌ها مشخص است که در سازه‌های کنترل نشده، یک فرکانس اصلی (فرکانس مود اول ارتعاش) وجود دارد که دامنه هارمونیک آن در پاسخ بزرگ و قابل توجه است که موجب جابه‌جایی‌های نسبی بزرگ می‌شود. در مقابل در سازه کنترل شده، بر اثر وقوع ضربه‌های ارتعاشی، انرژی ورودی به سازه از مود اول به موده‌های با فرکانس بالاتر و دامنه جابه‌جایی کمتر توزیع شده است و به سهولت توسط میرایی داخلی این موده‌ها تلف شده است. در پاسخ سازه‌های کنترل شده فرکانس‌های بیشتری با دامنه کوچک‌تر در پاسخ سازه سهیم هستند و نشان‌گر پهن باند بودن تابع پاسخ و مشارکت موده‌های بالاتر

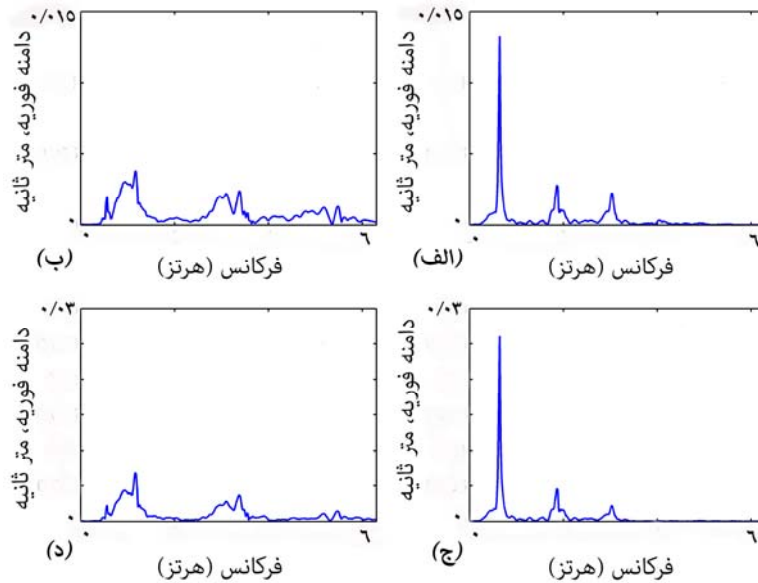
ارتعاشی با دامنه تقریباً یکسان در پاسخ است. با افزایش تعداد طبقات، اندرکنش‌های انرژی ذکر شده بهتر و واضح‌تر مشخص می‌شود.

#### ۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

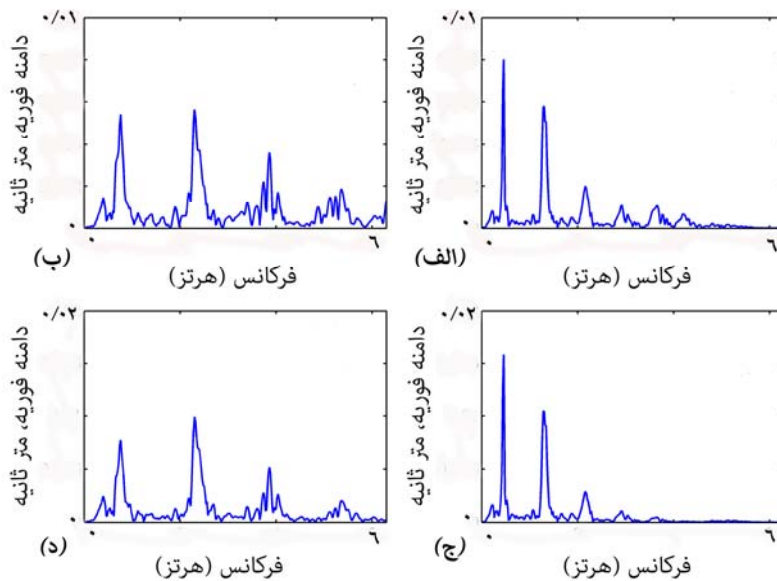
در تحقیق حاضر مفهوم انتقال انرژی هدفمند و جاذب انرژی (جاذب ارتعاش) غیرخطی برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سه سازه قاب برشی با چهار، هفت و ده طبقه در برابر سه زلزله تاریخی با شدت زیاد به کار گرفته شد. در حال حاضر روند طراحی تحلیلی معینی برای تعیین پارامترهای VI NES وجود ندارد (برخلاف TMD) و طراحی این سیستم کنترل ارتعاش به صورت عددی و با بهینه‌یابی انجام می‌شود. در تحقیق حاضر الگوریتم جستجوی هماهنگی در این مسئله بهینه‌یابی به کار گرفته شد. با شبیه‌سازی عددی نشان داده شد که می‌توان بخش عمده‌ای از انرژی لرزه‌ای سازه اصلی را به جاذب انرژی غیرخطی ارتعاشی - ضربه‌ای هدایت کرد که توسط این سیستم کنترلی به طور موضعی جذب و تلف می‌شود.

در تحقیق حاضر نشان داده شد که انتقال انرژی هدفمند که یک پدیده دینامیکی غیرخطی است راه حل عملی موفق‌تری برای کاهش پاسخ لرزه‌ای و کنترل ارتعاش ناشی از آن در قاب‌های کوتاه و میان مرتبه است و با طراحی مناسب سیستم کنترلی ارتعاشی - ضربه‌ای می‌توان نتایج مشابه با آنچه در مراجع برای سیستم‌های کنترلی فعال و مختلط گزارش شده است، به طور غیرفعال به دست آورد که بسیار مطلوب و قابل توجه است. به طور کلی رفتار سازه‌های کوتاه و میان مرتبه کنترل شده با جاذب انرژی غیرخطی در برابر رکوردهای لرزه‌ای به کار گرفته شده مشابه یکدیگر بود.

طراحی بهینه سیستم جاذب ارتعاش در این تحقیق مبتنی بر تعیین فضای آزاد حرکت، نسبت سختی و نسبت جرم بود و معلوم شد که هرچه نسبت جرم بیشتر باشد زمان عکس‌العمل و میزان تأثیر این سیستم کنترلی در برابر زلزله‌های شدید بهبود می‌یابد که محدودیتی ذاتی برای این نوع سیستم است. البته با



شکل ۹- طیف فوریه پاسخ نسبی قاب هفت درجه آزادی به زلزله نورث ریج، نسبت جرم ۰/۰۵ (الف) سازه کنترل نشده،  $u_7(t)-u_6(t)$  (ب) سازه کنترل شده،  $u_7(t)-u_6(t)$  (ج) سازه کنترل نشده،  $u_6(t)-u_5(t)$  (د) سازه کنترل شده،  $u_6(t)-u_5(t)$



شکل ۱۰- طیف فوریه پاسخ نسبی قاب ده درجه آزادی به زلزله کوبه، نسبت جرم ۰/۰۳۵ (الف) سازه کنترل نشده،  $u_{10}(t)-u_9(t)$  (ب) سازه کنترل شده،  $u_{10}(t)-u_9(t)$  (ج) سازه کنترل نشده،  $u_{10}(t)-u_9(t)$  (د) سازه کنترل شده،  $u_9(t)-u_8(t)$

۱- چهار یا پنج ضربه ارتعاشی ابتدای حرکت بیش از ۷۰ درصد انرژی ورودی به سازه تا زمان‌های وقوع این ضربه‌ها را تلف می‌کنند و تأثیر برخوردهای ابتدای حرکت در اتلاف انرژی سازه بیشتر از ضربات انتهایی حرکت است.

۲- الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی هماهنگی روش مناسبی از

نسبت جرم‌های کوچک (۳/۵ و ۵ درصد) هم نتایج مطلوب و قابل توجهی به دست آمد که در مقایسه با سایر سیستم‌های کنترل ارتعاش نسبتاً سبک است.

برخی از مهم‌ترین یافته‌های تحقیق حاضر را می‌توان در عناوین زیر برشمرد:

بین مودهای سازه و کاهش پاسخ لرزه‌ای آن شود (این سیستم دارای ویژگی پهن باند است).

۵- قابلیت اعتماد بهینه‌یابی انجام شده برای تعیین پارامترهای VI NES قابل توجه است چنانکه تأثیر مثبت این سیستم در کاهش پاسخ سازه با تغییر تحریک لرزه‌ای اعمال شده به سازه حفظ شد، البته تأثیر آن در کاهش نرُم‌های حداکثر پاسخ بیشتر از تأثیر آن در کاهش حداکثر پاسخ‌ها است. از بین مجموعه رکوردهای به کار رفته، رکوردی که بالاترین شدت طیفی را داشت به‌عنوان مناسب‌ترین زلزلهٔ مبنای بهینه‌یابی پیشنهاد شد.

لحاظ صرف زمان و کسب نتایج مطلوب برای تعیین پارامترهای طراحی VI NES است و در صورت به‌کار بردن این سیستم کنترل ارتعاش با پارامترهای بهینه نشده ممکن است پاسخ سازهٔ کنترل شده بدتر هم شود.

۳- زمان عکس‌العمل VI NES کوتاه است و این ویژگی باعث می‌شود سیستم مناسبی برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها باشد.

۴- وقوع ضربه‌های ارتعاشی باعث می‌شود که VI NES فرکانس اولویت‌دار تشدید نداشته باشد و بتواند با مودهای ارتعاشی مختلف سازه اندرکنش کند و موجب بازتوزیع انرژی

## واژه‌نامه

1. tuned mass damper
2. tuned liquid damper
3. impact dampers
4. targeted energy transfer
5. transient dynamics
6. weak coupling
7. essential (strong) nonlinearity
8. nonlinear energy sink
9. non-smooth stiffness nonlinearity
10. vibro-impact nonlinear energy sink
11. piecewise linear
12. intensity measures
13. Arias intensity
14. harmony search
15. metaheuristic algorithm
16. evolutionary algorithm
17. genetic algorithm
18. transient resonance

## مراجع

1. Ahmadi, M. K. A., Attari, N., and Shahrouzi, M., "Structural Seismic Response Mitigation using Optimized Vibro-Impact Nonlinear Energy Sinks", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 19(2), pp. 193-219, 2015.
2. Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., Skelton, R. E., Soong, T. T., Spencer, B. F., and Yao, J. T. P., "Structural Control: Past, Present and Future", *ASCE Engineering Mechanics*, Vol. 123(9), pp. 897-971, 1997.
3. Lieber, P., and Jensen, D. P., "An Acceleration Damper: Development and Design, and some Applications", *Transactions of American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, Vol. 67, pp. 523-530, 1945.
4. Engleder, T., Vielsack, P., and Spiess, H., "Damping by Impacts, an Application of Non-Smooth dynamics", In: *Proceedings of the Conference on Nonlinear Oscillations in Mechanical Systems*, St. Petersburg, Russia, pp. 134-144, 1998.
5. Ogawa, K., Ide, T., and Saitou, T., "Application of Impact Mass Damper to a Cable-Stayed bridge Pylon", *Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 72(1-3), pp. 301-312, 1997.
6. Peterka, F., "Contribution to the Investigation of Impact Dampers with Free Additional Mass", *Zagadnienia Drgan Nieliniowych/Nonlinear Vibration Problems*, pp. 315-325, 1974b.
7. Nigm, M. M., and Shabana, A. A., "Effect of an Impact Damper on a Multi-Degree of Freedom System", *Journal of Sound & Vibration*, Vol. 89(4), pp. 541-557, 1983.
8. Li, K., "Experiments on the Effect of an Impact Damper on a Multiple-Degree-of-Freedom System," *Vibration & Control*, Vol. 12(5), pp. 445-464, 2006.
9. Gendelman, O. V., "Transition of Energy to a Nonlinear Localized Mode in a Highly Asymmetric System of two Oscillators", *Nonlinear Dynamics*, Vol. 25, pp. 237-253, 2001.
10. Nucera, F., Vakakis, A. F., McFarland, D. M., Bergman, L. A., and Kerschen, G., "Targeted Energy Transfer in Vibro-Impact Oscillators for Seismic Mitigation", *Nonlinear Dynamics*, Vol. 50(3), pp.

- 651-677, 2007.
11. Quinn, D., and Rand, R. H., "The Dynamics of Resonance Capture", *Nonlinear Dynamics*, Vol. 8, pp. 1-20, 1995.
  12. Bergman, L. A., "Mitigation Strategies for Systems Subjected to Vibratory, Shock, and Seismic loads", CISM Courses and Lectures Vol. 518, Springer, Wien New York, 2010.
  13. Vakakis, A. F., Gendelman, O. V., Bergman, L. A., McFarland, D. M., Kerschen, G., and Lee, Y. S., "Nonlinear Targeted Energy Transfer in Mechanical and Structural Systems", Springer, The Netherlands, 2008.
  14. Kerschen, G., Worden, K., Vakakis, A. F., and Golinval, J., "Past, Present and Future of Nonlinear System Identification in Structural Dynamics", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, pp. 505-592, 2006.
  15. Spencer Jr. B. F., Christenson, R. E., and Dyke, S. J., "Next Generation Benchmark Control Problem for Seismically Excited Buildings", *Proceedings of 2nd World Conference on Structural Control*, New York, Vol. 2, pp. 1135-1360, 1999.
  16. Lee, K. S., and Geem, Z. W., "A New Structural Optimization Method Based on the Harmony Search Algorithm", *Computers & Structures*, Vol. 82, pp. 781-798, 2004.
  17. Nucera, F., Iacono, F. Lo, McFarland, D. M., Bergman, L. A., and Vakakis, A. F., "Application of Broadband Nonlinear Targeted Energy Transfers for Seismic Mitigation of a Shear Frame: Experimental Results", *Journal of Sound & Vibration*, Vol. 313, pp. 57-76, 2008.
  18. Nucera, F., McFarland, D. M., Bergman, L. A., and Vakakis, A. F., "Application of Broadband Nonlinear Targeted Energy Transfers for Seismic Mitigation of a Shear Frame: Computational Results", *Journal of Sound & Vibration*, Vol. 329, pp. 2973-2994, 2010.
  19. Kalkan, E., and Kunnath, S. K., "Relevance of Absolute and Relative Energy Content in Seismic Evaluation of Structures", *Advances in Structural Engineering*, Vol. 11, No. 1, 2008.
  20. Khashaee, P., Mohraz, B., Sadek, F., Lew, H. S., and Gross, J. L., "Distribution of Earthquake Input Energy in Structures", Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA, 2003.
  21. Gendelman, O. V., "Analytic Treatment of a System with a Vibro-Impact Nonlinear Energy Sink", *Journal of Sound & Vibration*, Vol. 331, pp. 4599-4608, 2012.
  22. Al-Shudeifat, M. A., Wierschem, N. E., Quinn, D. D., Vakakis, A. F., Bergman, L. A., and Spencer JR., B. F., "Numerical and Experimental Investigation of a Highly Effective Single-Sided Vibro-Impact Nonlinear Energy Sink for Shock Mitigation", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 52, pp. 96-109, 2013.
  23. Mollaioli, F., Lucchini, A., Cheng, Y., and Monti, G., "Intensity Measures for the Seismic Response Prediction of Base-Isolated Buildings", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 11, pp. 1841-1866, 2013.
  24. Taflampas, I. M., Spyarakos, C. C., and Maniatakis, Ch. A., "A New Definition of Strong Motion Duration and Related Parameters Affecting the Response of Medium-Long period Structures", *14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, China, 2008.