

## تحریک بحرانی برای انرژی ورودی زلزله

ارسلان بذرافشان

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

a.bazrafshan@modares.ac.ir

ناصر خاجی

استاد مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

nkhaji@modares.ac.ir

کلید واژه‌ها: تحریک بحرانی، ارتعاشات تصادفی، انرژی ورودی زلزله، ورودی تصادفی غیرایستا، زلزله طرح

### چکیده

حرکات زمین دارای عدم قطعیت‌های ذاتی زیادی هستند. به همین دلیل پیش‌بینی یک رویداد در یک سایت مشخص، بسیار دشوار است. علی‌رغم وجود این عدم قطعیت‌ها، استفاده از رکوردهای ثبت شده موجود در طراحی اجتناب‌ناپذیر است. اما رکوردهای موجود تنها بخشی از واقعیت را نشان می‌دهند. حرکات با پیرو بلند که اخیراً مورد توجه قرار گرفته‌اند به خوبی نشان می‌دهند که در کنار استفاده از داده‌های پرویدادهای گذشته، باید از روشهای جایگزین برای ارزیابی عدم قطعیت‌ها استفاده نمود. روش‌های تحریک بحرانی برای غلبه بر این عدم قطعیت‌ها ابزار مناسبی فراهم می‌کنند. در این مقاله یک مسئله تحریک بحرانی با انتخاب متوسط انرژی ورودی کل زلزله در واحد جرم سیستم یک‌درجه‌آزاد به عنوان تابع هدف معرفی می‌شود و با ثابت کردن حد بالای انرژی ورودی، تحریک بحرانیبه نحوی که با داشتن حد بالای انرژی یکسان، انرژی ورودی به سازه را بیشینه نماید تعیین می‌گردد. این مطالعه نشان می‌دهد که انرژی ورودی کل در واحد جرم می‌تواند به‌عنوان یک معیار منطقی برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌های موردنیاز برای تحلیل دینامیکی مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، در حالتی که رکوردهای موجود از نظر انرژی با سازه موردنظر سازگاری نداشته باشند با استفاده از روش تحریک بحرانی می‌توان رکوردهای لازم را به نحوی که بر حسب هدف طراحی سازگاری مناسبی با سازه موردنظر داشته باشند، تعیین نمود.

### مقدمه

در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، طراح با عدم قطعیت‌های زیادی مواجه می‌شود. یکی از مهمترین این عدم قطعیت‌ها انتخاب زلزله طرح مناسب است. برای سازه‌های با اهمیت متوسط و کم، معمولاً زلزله طرح توسط آیین‌نامه‌های زلزله به‌صورت طیف طرح فراهم می‌شود. اما برای سازه‌های مهم، با توجه به لزوم انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه‌زمانی، استفاده از حرکات ثبت شده زمین به‌عنوان ورودی اجتناب‌ناپذیر است. روش متداول استفاده از شتاب‌نگاشت زلزله‌هایی است که شرایط زلزله طرح را ارضا نموده و از نظر شرایط ساختگاه تا حد امکان با سایت موردنظر مشابهت داشته باشند. در این بین عامل مهمی نادیده گرفته شده است و آن خود سازه است. هر سازه مشخصات دینامیکی خاص خود را دارد لذا پاسخ آن در برابر یک زلزله مشخص متفاوت خواهد بود. به عبارت دیگر، هر سازه باید برای زلزله طرح مخصوص خود طراحی شود. از طرف دیگر عدم رعایت ملاحظات کافی در استفاده از رکوردهای موجود نیز می‌تواند گمراه‌کننده باشد. چرا که اگر زلزله را به‌صورت یک فرآیند تصادفی در نظر بگیریم، رکوردهای موجود تنها چند نمونه از تحقق این فرآیند هستند. تجربیات زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که اتکال صرف به داده‌های موجود هرگز تمام مسئله را حل نخواهد کرد و آسیب‌ها و مشکلات، حتی در زلزله‌های اخیر، همواره خود را نشان می‌دهند. برای غلبه بر این مسئله، باید از مفهوم جدیدی استفاده شود. روش تحریک بحرانی و طراحی سازه بر مبنای آن می‌تواند چنین مفهومی باشد.

روش تحریک بحرانی برای نخستین بار توسط درنیک برای سیستم یک‌درجه‌آزاد الاستیک خطی با میرایی ویسکوز و به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ذاتی حرکات زمین ارائه شد. این روش در پی یافتن تحریکی است که از میان دسته‌ای از ورودی‌های مجاز، کمیت دلخواهی از پاسخ سازه را بیشینه نماید. این کمیت دلخواه تابع هدف نامیده می‌شود. تا کنون توابع هدف مختلفی از سوی محققین برای حل مسائل مختلف



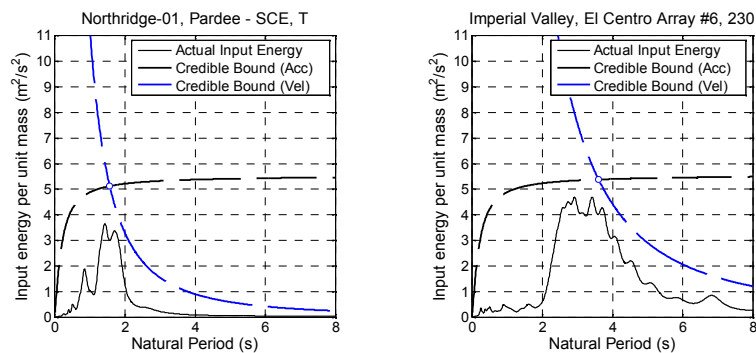
تحریک بحرانی در نظر گرفته شده است. تاکاواکی (۲۰۰۱) روش تحریک بحرانی جدیدی را برای ورودی‌های ایستا و غیرایستا توسعه داد. وی با در نظر گرفتن متوسط مربعات جابه‌جایی سیستم یک‌درجه‌آزاد به عنوان تابع هدف، تحریک بحرانی را به صورت یک تابع چگالی طیفی توان مستطیلی تعیین نمود. تفاوت عمده روش وی با روش‌های قبلی در انتخاب یک شاخص تصادفی از کمیت پاسخ به عنوان تابع هدف می‌باشد.

در این مقاله کاربرد روش تحریک بحرانی برای تابع هدف انرژی ورودی کل زلزله در واحد جرم سیستم یک‌درجه‌آزاد بر مبنای روش تاکاواکی (۲۰۰۱) مورد مطالعه قرار گرفته است. با مقایسه مسئله تحریک بحرانی برای تابع هدف انرژی و تابع هدف جابه‌جایی نشان داده می‌شود که حداکثر جابه‌جایی یک سیستم یک‌درجه‌آزاد به انرژی ورودی آن مرتبط است. علاوه بر این، این موضوع از طریق بررسی طیف پاسخ جابه‌جایی حرکات مختلف زمین نیز نشان داده شده است. سپس رفتار سه مدل چنددرجه‌آزاد با زمان‌های تناوب طبیعی مختلف تحت اثر هفت رکورد انتخابی با سطوح انرژی ورودی متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که انرژی ورودی کل در واحد جرم می‌تواند به عنوان یک معیار منطقی برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مورد نیاز برای تحلیل دینامیکی مورد توجه قرار گیرد. در نهایت، رکوردیکه از نظر انرژی با مدل‌های مورد نظر سازگاری ندارد انتخاب شده و با استفاده از روش پیشنهادی، رکوردهای مصنوعی لازم به نحوی تولید می‌شوند که با داشتن حد بالای انرژی یکسان، انرژی ورودی به سازه را بیشینه نمایند.

## حد بالای انرژی ورودی زلزله

تمام مسائل تحریک بحرانی به طور کلی دارای یک یا چند قید هستند. این قیدها برای اینکه مدل تحریک ارائه شده از نظر فیزیکی واقعی و قابل قبول باشد ضروری‌اند. از این رو پاسخ یک مسئله تحریک بحرانی به شدت به نحوه انتخاب قیدهایی آن بستگی دارد. یک انتخاب نامناسب می‌تواند به نتایج غیرمنطقی و یا دست‌پایین منجر شود. بنابراین انتخاب قیدی که بتواند شرایط واقعی را در نظر بگیرد ضروری است.

تاکاواکی (۲۰۰۴) با در نظر گرفتن قیدهایی بر روی شتاب و سرعت، یک حد بالا برای انرژی ورودی واحد جرم یک سیستم الاستیک خطی میرا تعیین نمود. حد بالای انرژی حاصل از قید شتاب تنها به دو مقدار سطح زیر منحنی چگالی طیفی حرکت زمین (توان) و حداکثر مقدار آن (شدت) وابسته است. بنابراین، این دو پارامتر می‌توانند معرف یک دسته از حرکات زمین باشند که رکورد مورد نظر تنها یک نمونه از تحقق آنهاست. به عبارت دیگر حد بالای انرژی می‌تواند یک قید بسیار مناسب برای یک مسئله تحریک بحرانی باشد. بررسی زلزله‌های مختلف نشان می‌دهد که حتی برای رکوردهای دارای حد بالای انرژی حاصل از قید شتاب یکسان مقدار حداکثر انرژی رکورد ثابت نیست. بعلاوه این مقدار حداکثر می‌تواند در پیوندهای مختلف رخ دهد (شکل ۱). به این ترتیب می‌توان یک مسئله تحریک بحرانی جدید برای انرژی ورودی تعریف کرد به نحوی که به ازای یک حد بالای انرژی معین، متوسط انرژی ورودی به سازه را بیشینه نماید.



شکل ۱: انرژی کل واحد جرم زلزله امپریال ولی (سمت راست) و زلزله نورتریج (سمت چپ)

## تحریک بحرانی برای انرژی ورودی زلزله

یک سیستم یک‌درجه‌آزاد الاستیک خطی با میرایی ویسکوز را که تحت شتاب پایه  $\ddot{u}_g(t)$  قرار دارد در نظر بگیرید. شتاب پایه ورودی را در حالت غیرایستا می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\ddot{u}_g(t) = c(t)w(t) \quad (1)$$

که در آن  $c(t)$  یک تابع پوش تعینی داده شده و  $w(t)$  یک فرآیند تصادفی ایستا با میانگین صفر است. انرژی ورودی حاصل از شتاب افقی حرکت زمین از  $t = 0$  تا  $t = t_0$  را می‌توان به صورت کار انجام شده توسط زمین بر روی سیستم تعریف نمود:

$$E_I/m = - \int_0^{t_0} \ddot{u}_g \dot{x} dt \quad (2)$$



که در آن  $\dot{x}(t)$  پاسخ سرعت سیستم تحت شتاب پایه می‌باشد که برابر است با:

$$\dot{x}(t) = \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) \dot{g}(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

در رابطه فوق  $\dot{g}(t)$  پاسخ ارتعاش آزاد سیستم در اثر ضربه واحد است. بنابراین  $\dot{g}(t)$  برابر است با:

$$\dot{g}(t) = \frac{h\omega}{\omega_d} e^{-h\omega t} \sin \omega_d t - e^{-h\omega t} \cos \omega_d t \quad (4)$$

بنابراین:

$$E_I/m = - \int_0^t \int_0^\tau c(\tau) c(\xi) \dot{g}(\tau-\xi) w(\tau) w(\xi) d\xi d\tau \quad (5)$$

اگر  $S_w(\omega)$  چگالی طیفی توان تابع  $w(t)$  باشد می‌توان نشان داد:

$$E[w(\tau)w(\xi)] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_w(\omega) e^{i\omega(\tau-\xi)} d\omega \quad (6)$$

بنابراین متوسط انرژی ورودی واحد جرم یک سیستم الاستیک خطی برابر است با:

$$\begin{aligned} E[E_I/m] &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \int_0^t \int_0^\tau c(\tau) c(\xi) \dot{g}(\tau-\xi) e^{i\omega(\xi-\tau)} d\xi d\tau \right) S_w(\omega) d\omega \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} H_E(t, \omega) S_w(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن:

$$H_E(t, \omega) = \int_0^t c(\tau) e^{-i\omega\tau} \left( \int_0^\tau c(\xi) \dot{g}(\tau-\xi) e^{i\omega\xi} d\xi \right) d\tau \quad (8)$$

اکنون می‌توان مساله تحریک بحرانی را چنین تعریف نمود: با داشتن درصد میرایی و فرکانس طبیعی یک سیستم یک درجه آزاد الاستیک، و همچنین داشتن تابع پوش  $c(t)$ ، PSDF بحرانی تابع  $w(t)$  را به نحوی بیابید که تابع هدف  $f = E[E_I/m]$  را تحت دو قید زیر بیشینه نماید:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S_g(\omega) d\omega \leq \bar{S}_g \quad (9)$$

$$\sup S_g(\omega) \leq \bar{s}_g \quad (10)$$

در رابطه فوق  $S_g(\omega)$  چگالی طیفی توان تابع  $\ddot{u}_g(t)$  است.

### تحریک بحرانی برای جابه‌جایی

بر اساس روش تاکواکی (۲۰۰۱) اگر متوسط مربعات پاسخ تغییر مکانیک سیستم یک درجه آزاد الاستیک خطی با میرایی ویسکوز را به عنوان تابع هدف در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$\sigma_D^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} H(t, \omega) S_w(\omega) d\omega \quad (11)$$

که در آن:

$$H(t, \omega) = \left( \int_0^t c(\tau) g(t-\tau) \cos \omega \tau d\tau \right)^2 + \left( \int_0^t c(\tau) g(t-\tau) \sin \omega \tau d\tau \right)^2 \quad (12)$$

در این حالت مساله تحریک بحرانی چنین است: با داشتن درصد میرایی و فرکانس طبیعی یک سیستم یک درجه آزاد الاستیک، و همچنین داشتن تابع پوش  $c(t)$ ، PSDF بحرانی تابع  $w(t)$  را به نحوی بیابید که تابع هدف  $f = \sigma_B^2$  را تحت دو قید زیر بیشینه نماید:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S_w(\omega) d\omega \leq \bar{S}_w \quad (13)$$

$$\sup S_w(\omega) \leq \bar{S}_w \quad (14)$$

در رابطه فوق  $S_w(\omega)$  چگالی طیفی توان تابع  $w(t)$  است.

## مثالهای عددی

### سیستم یک درجه آزاد

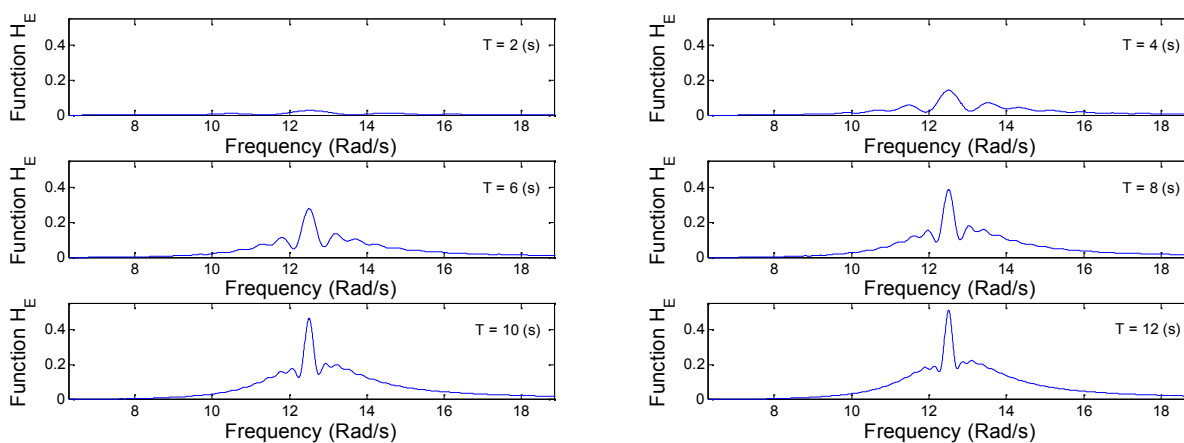
یک سیستم یک درجه آزاد با زمان تناوب  $T = 0.5$  s و میرایی  $h = 0.1$  را در نظر بگیرید. یک تابع پوش به فرم تابع شینوزوکا-ساتو انتخاب می‌گردد:

$$c(t) = e^{-\alpha t} - e^{-\beta t} \quad (16)$$

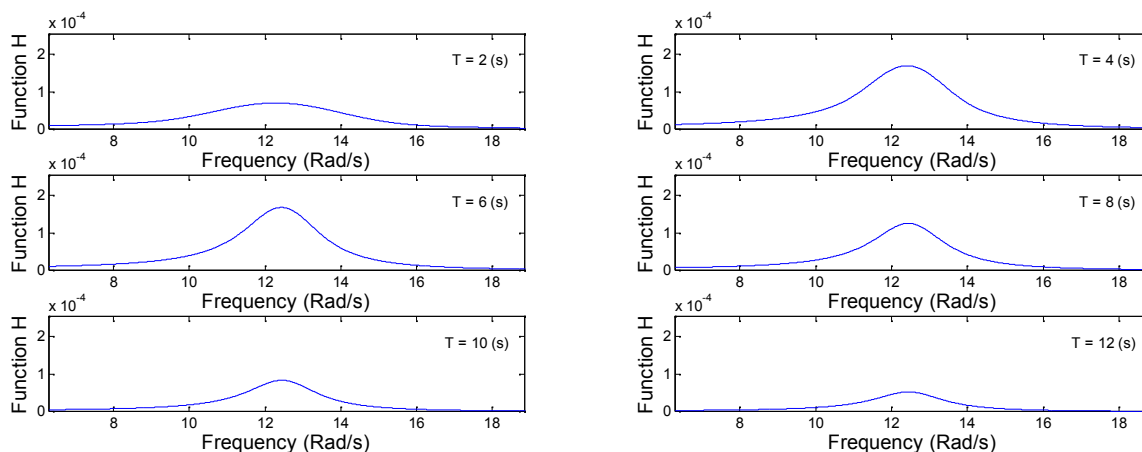
پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  برابر 0.13 و 0.45 انتخاب می‌شوند تا مدت زمانی برابر 30 ثانیه حاصل گردد. با استفاده از این مقادیر، تابع  $H_E(t, \omega)$  برای سیستم مذکور برای فواصل زمانی 2 ثانیه‌ای در شکل 2 رسم شده است. مشاهده می‌شود که پیک تابع  $H_E(t, \omega)$  به‌طور مشخص در نزدیکی فرکانس طبیعی سیستم قرار دارد. همچنین دیده می‌شود مقدار پیک با افزایش زمان بطور مداوم افزایش می‌یابد. این ویژگی نشان می‌دهد که متوسط بیشینه انرژی ورودی در انتهای بازه زمانی رخ می‌دهد.

به منظور مقایسه، تابع  $H(t, \omega)$  نیز در شکل 3 رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو تابع مقدار پیک در نزدیکی فرکانس طبیعی سیستم قرار دارد. با توجه به اینکه PSDF بحرانی در این روش با یک تابع مستطیلی در اطراف فرکانس طبیعی مدل بیان می‌شود، بنابراین تحریکی که انرژی ورودی به سیستم را بیشینه کند جابه‌جایی آن را نیز با یک تقریب قابل قبول بیشینه خواهد کرد.

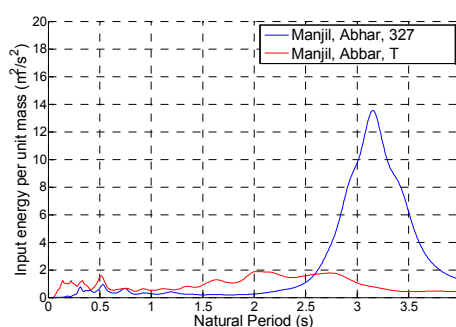
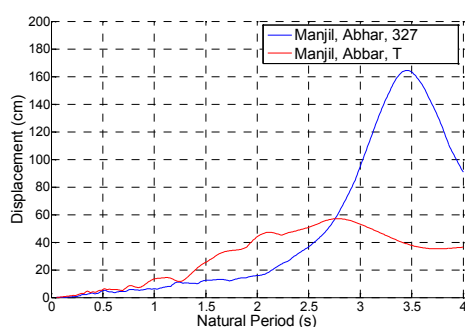
برای بررسی رابطه انرژی و جابه‌جایی در رکوردهای واقعی، انرژی کل واحد جرم زلزله و طیف پاسخ جابه‌جایی برای دو رکورد مختلف از 4 زلزله منجیل، طبس، کوبه و لوماپریتا در شکل‌های 4 تا 7 رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود انطباق نسبتاً مناسبی بین مقادیر متناظر وجود دارد.



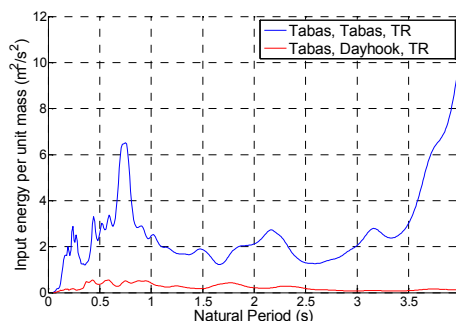
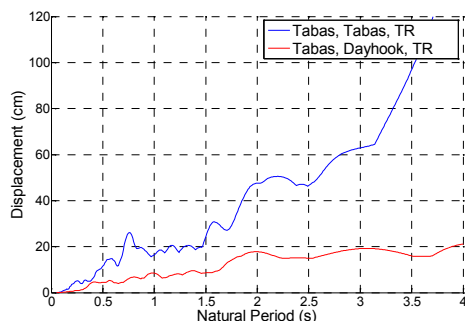
شکل 2: تغییرات تابع  $H_E(t, \omega)$  در فواصل زمانی 2 ثانیه‌ای



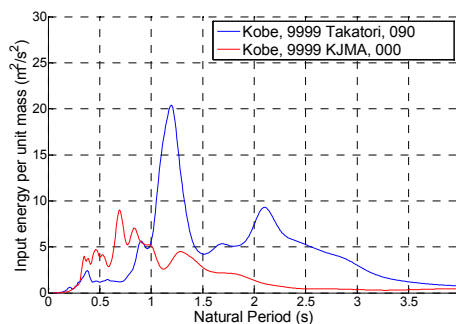
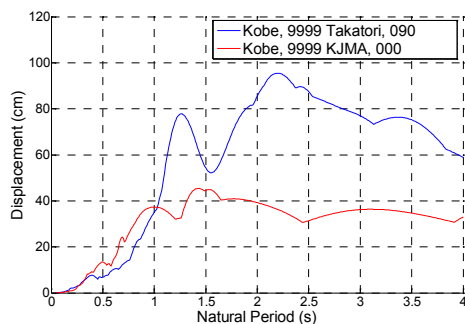
شکل ۳: تغییرات تابع  $H(t, \omega)$  در فواصل زمانی ۲ ثانیه‌ای



شکل ۴: مقایسه انرژی کل واحد جرم زلزله (راست) و طیف پاسخ جابه‌جایی (چپ) برای زلزله منجیل

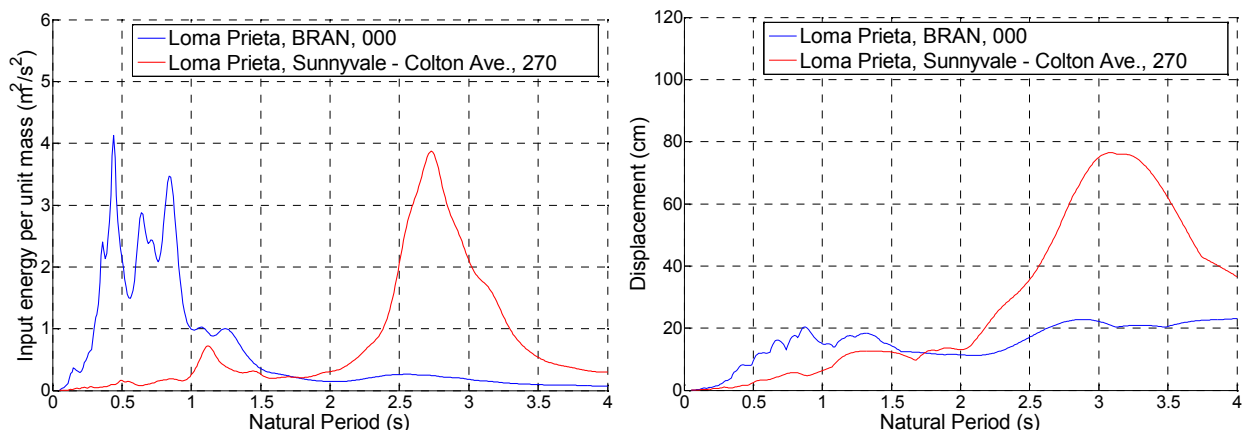


شکل ۵: مقایسه انرژی کل واحد جرم زلزله (راست) و طیف پاسخ جابه‌جایی (چپ) برای زلزله طبس



شکل ۶: مقایسه انرژی کل واحد جرم زلزله (راست) و طیف پاسخ جابه‌جایی (چپ) برای زلزله کوبه





شکل ۷: مقایسه انرژی کل واحد جرم زلزله (راست) و طیف پاسخ جابه‌جایی (چپ) برای زلزله لوما پریتا

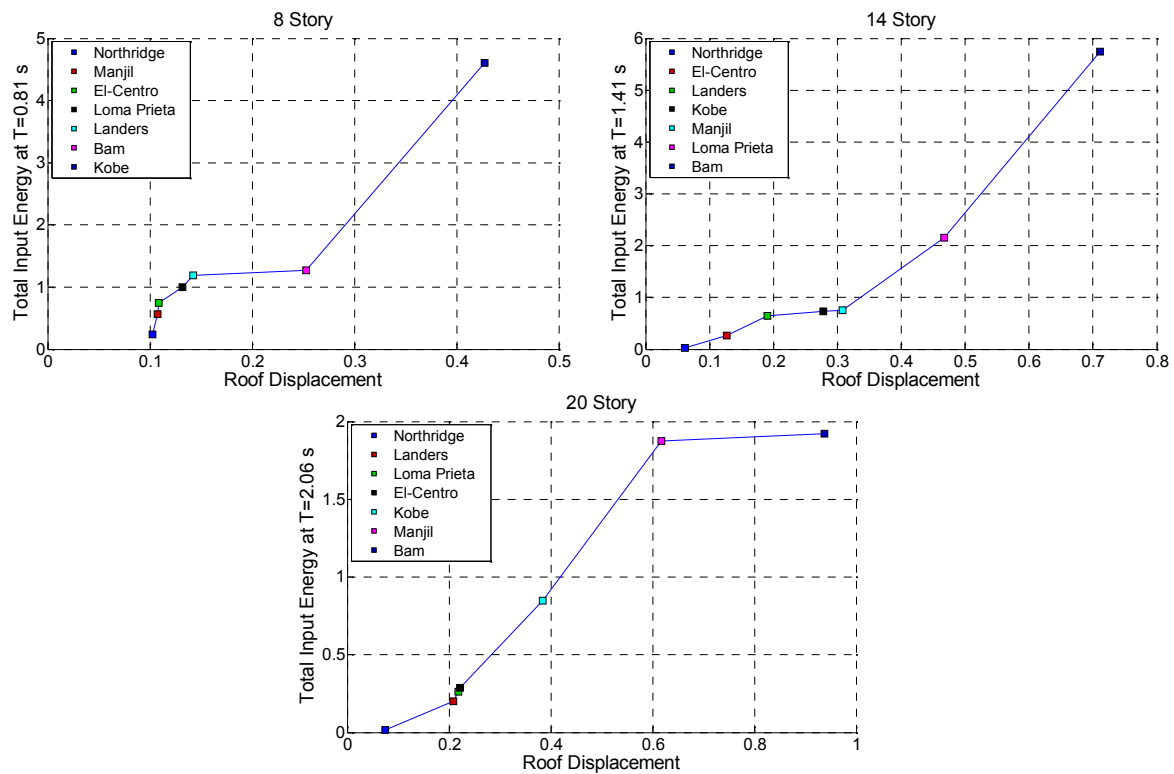
### سیستم چنددرجه آزاد

ایده مطرح شده در قسمت قبل می‌تواند برای سیستم‌های چند درجه آزاد نیز مورد استفاده قرار گیرد. اگر رفتار سازه به‌طور عمده متأثر از مد اول باشد می‌توان با تقریب قابل‌قبولی از انرژی کل واحد جرم زلزله برای پیش‌بینی رفتار سازه استفاده نمود. به منظور بررسی اثر انرژی ورودی کل زلزله بر جابه‌جایی حداکثر سیستم چنددرجه‌آزاد الاستیک، رفتار سه مدل ۸، ۱۴ و ۲۰ طبقه تحت اثر ۷ زلزله مختلف مورد بررسی قرار گرفت. طراحی مدل‌ها به‌صورت قاب خمشی فولادی توسط نرم‌افزار ETABS انجام شد. سپس جرم و سختی طبقات تعیین و مدل MDF منطبق با آن برای انجام تحلیل دینامیکی خطی به‌کار گرفته شد. زمان تناوب مد اصلی برای سه مدل به‌ترتیب برابر ۰.۸۱، ۱.۴۱ و ۲.۰۶ ثانیه می‌باشد. مشخصات رکوردهای مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. رکوردها به نحوی انتخاب شده‌اند که محدوده نسبتاً وسیعی از سطح انرژی ورودی را در بر گیرند.

در شکل ۸ نمودار جابه‌جایی طبقه آخر در مقابل انرژی ورودی کل برای مد اول رسم شده است. مشاهده می‌شود که هرچه انرژی ورودی بیشتر باشد جابه‌جایی حداکثر سازه بیشتر خواهد بود. بنابراین، اگر رفتار سازه به‌طور عمده متأثر از مد اول باشد می‌توان با تقریب قابل‌قبولی روش تحریک بحرانی برای انرژی کل را برای سازه‌های چند درجه‌آزاد نیز به‌کار برد. مثال بسیار مناسبی از این نوع سازه‌ها، ساختمان‌های دارای جداسازی لرزه‌ای هستند. در ساختمان‌های جداسازی شده در صورتی که نسبت زمان تناوب سیستم جداسازی شده به سیستم پایه‌ثابت به اندازه کافی بزرگ باشد می‌توان از اثر مدهای بالاتر صرف‌نظر نمود. به این ترتیب روش ارائه شده می‌تواند به‌طور موثری برای تعیین تحریک بحرانی در این سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۱: رکوردهای مورد استفاده در تحلیل دینامیکی

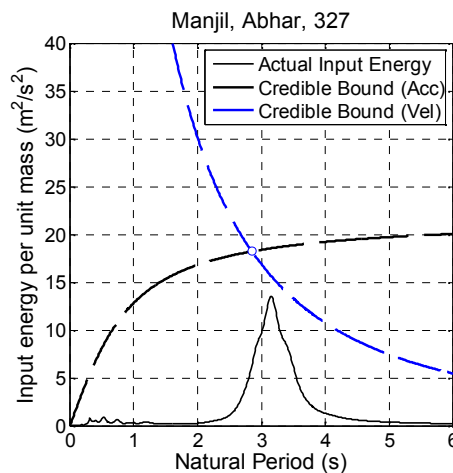
ردیف	زلزله	ایستگاه	مولفه	بیشینه شتاب (g)	بیشینه سرعت (m/s)	بیشینه جابه‌جایی (m)
۱	Imperial Valley	El-Centro	N-S	۰.۳۱۹	۰.۳۶۲	۰.۲۱۵
۲	Bam	Bam	000	۰.۷۷۸	۱.۰۹۵	۰.۳۲۵
۳	Manjil	Abbar	T	۰.۴۹۶	۰.۵۲۱	۰.۲۰۸
۴	Kobe	KJMA	090	۰.۵۹۹	۰.۷۴۳	۰.۱۹۹
۵	Landers	Joshua Tree	000	۰.۲۷۴	۰.۲۷۴	۰.۰۹۵
۶	Northridge	Rinaldi Receiving Sta.	228	۰.۶۵۲	۰.۳۵۱	۰.۰۲۵
۷	Loma Prieta	Capitola	000	۰.۵۲۹	۰.۳۵۰	۰.۰۹۱



شکل ۸: نمودار تغییرات جابه‌جایی بام در مقابل انرژی ورودی کل برای مدل‌های ۸، ۱۴ و ۲۰ طبقه

## تحریک بحرانی

در عمل حالت‌هایی پیش می‌آید که رکوردهای موجود از نظر انرژی با سازه مورد نظر سازگاری ندارند. به عنوان نمونه زلزله منجیل را در نظر بگیرید. شکل ۹ طیف انرژی ورودی کل این زلزله را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این رکورد با هیچ کدام از سه مدل مورد نظر سازگاری ندارد. با در نظر گرفتن فرکانس و میرایی مدل‌های چنددرجه‌آزاد می‌توان با استفاده از روش ارائه شده تحریک بحرانی سازگار با این مدل‌ها را تعیین نمود. قیدهای لازم برای مسئله تحریک بحرانی ( $\bar{S}_g$  و  $\bar{S}_v$ ) برای رکورد منجیل به ترتیب عبارتند از: ۰.۴۵۵۸ و ۰.۷۶۱۰. با استفاده از این قیدها و با به کارگیری تابع پوش مورد استفاده در قسمت قبل تحریک بحرانی به صورت تابع مستطیلی تعیین شده و سپس سه رکورد مصنوعی سازگار با سه مدل یک‌درجه‌آزاد با زمان‌های تناوب ۰.۸۱، ۱.۴۱ و ۲.۰۶ ثانیه و میرایی ۵ درصد تولید شد. شکل ۱۰ تحریک‌های بحرانی تولید شده و همچنین انرژی ورودی کل آنها را نشان می‌دهد. مشخصات رکوردهای تولید شده در جدول ۲ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که حداکثر انرژی رکوردها،  $E_{Max}$ ، در فرکانس طبیعی مدل متناظر متمرکز شده است. بنابراین، با داشتن مشخصات یک نمونه حرکت زمین، می‌توان با استفاده از روش تحریک بحرانی رکوردهای لازم را به نحوی که بر حسب هدف طراحی سازگاری مناسبی با سازه مورد نظر داشته باشند، تعیین نمود.

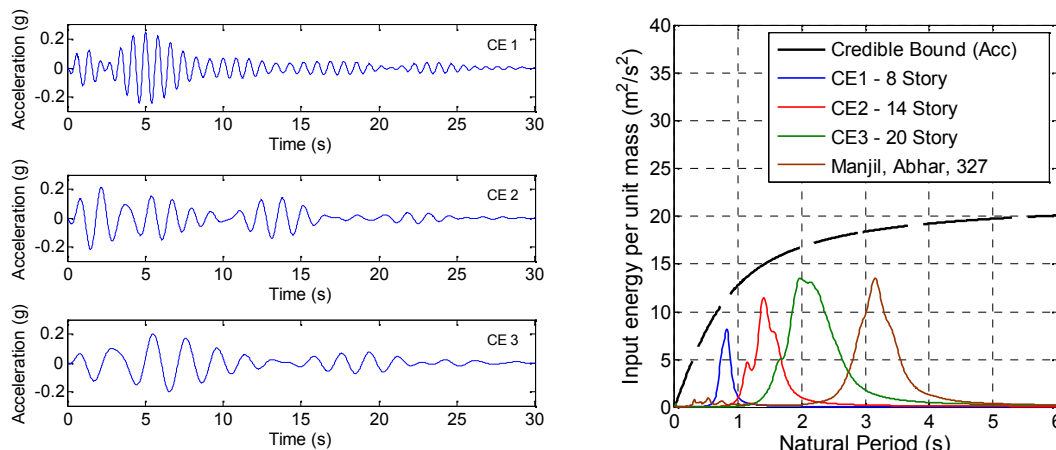


شکل ۹: انرژی ورودی کل واحد جرم زلزله برای زلزله منجیل



جدول ۲: مشخصات رکوردهای مصنوعی تولید شده و رکورد هدف

ردیف	رکورد	$\bar{S}_g$	$\bar{s}_g$	$E_{max}$	$T_{E_{max}}$
۱	Manjil	۰.۷۶۱	۰.۴۵۶	۱۳.۵۵	۳.۱۵
۲	CE 1	۰.۷۶۳	۰.۴۵۶	۷.۹۷	۰.۸۱
۳	CE 2	۰.۷۵۸	۰.۴۵۶	۱۱.۴۹	۱.۴۱
۴	CE 3	۰.۷۶۲	۰.۴۵۵	۱۳.۱۶	۲.۰۶



شکل ۱۰: انرژی ورودی کل واحد جرم زلزله رکوردهای مصنوعی تولید شده بر اساس روش تحریک بحرانی

## نتیجه گیری

در این مقاله کاربرد روش تحریک بحرانی برای انرژی ورودی کل زلزله در واحد جرم سیستم یک درجه آزاد مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعه نشان می‌دهد که حداکثر جابه‌جایی یک سیستم یک‌درجه‌آزاد به انرژی ورودی آن مرتبط است. با توجه به اینکه چگالی طیفی بحرانی در این روش با یک تابع مستطیلی در اطراف فرکانس طبیعی مدل بیان می‌شود، بنابراین تحریکی که انرژی ورودی به سیستم را بیشینه کند جابه‌جایی آن را نیز با یک تقریب قابل قبول بیشینه خواهد کرد. این موضوع از طریق بررسی طیف پاسخ زلزله‌های مختلف نیز نشان داده شده است. تحلیل دینامیکی خطی مدل‌های چنددرجه‌آزاد نشان می‌دهد که انرژی ورودی کل در واحد جرم می‌تواند به عنوان یک معیار منطقی برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مورد نیاز برای تحلیل دینامیکی مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، در حالتی که رکوردهای موجود از نظر انرژی با سازه مورد نظر سازگاری نداشته باشند می‌توان با استفاده از روش پیشنهادی، رکوردهای مصنوعی لازم را به نحوی تولید نمود که با داشتن حد بالای انرژی یکسان، انرژی ورودی به سازه را بیشینه نمایند.

## مراجع

Takewaki I (2001) A New Method for Non Stationary Random Critical Excitation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(4), 519–535

Takewaki I (2004) Bound of Earthquake Input Energy, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 130(9), 1289–1297

Takewaki I (2006) Probabilistic Critical Excitation Method for Earthquake Energy Input Rate, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 132(9), 990–1000