

# تحلیل لرزه‌ی مخازن جداسازی شده‌ی ذخیره‌ی آب تحت اثر زلزله‌های با دوره‌های تناوب بلند با استفاده از روش تحریک بحرانی

Research Note

علی احمدی (کارشناس ارشد)

ناصر حاجی\* (استاد)

ارسلان بذرافشان (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

در نوشتار حاضر، رفتار لرزه‌ی مخازن جداسازی شده‌ی ذخیره‌ی آب، تحت اثر زلزله‌های با زمان تناوب بلند بررسی شده است؛ چرا که زمان تناوب نسبتاً بالای مخازن مذکور باعث می‌شود در برابر زلزله‌های با دوره‌های تناوب بلند حساس باشند. برای این منظور، از روش نوینی به نام تحریک بحرانی، برای اولین بار استفاده شده است که در آن زلزله‌های بحرانی هر سازه با توجه به مشخصات و پارامترهای آن، تولید و به سازه‌ی موردنظر اعمال می‌شوند، تا بتوان عملکرد لرزه‌ی سازه‌ی موردنظر را در حین زلزله و پس از آن بالا برد. برای بررسی رفتار مخازن تحت زلزله‌های با دوره‌های تناوب بلند، از سه نوع مخزن پهن، متوسط و لاغر مجهز به دو نوع جداگرهای لاستیکی با هسته‌ی سربی و اصطکاکی پاندولی استفاده شده است که تحت اثر زلزله‌های بحرانی قرار گرفتند. با توجه به این مفهوم که زلزله‌های بحرانی (به عنوان بیشینه‌ی زلزله‌ی که در منطقه‌ی موردنظر برای مخازن مذکور ممکن است رخ دهد) بسیار بزرگ‌تر و قوی‌تر از زلزله‌ی اصلی خواهند بود، نتایج به دست آمده نیز نشان می‌دهند که استفاده از روش تحریک بحرانی، سبب بحرانی‌تر شدن مخازن می‌شود و استفاده از آن موجب درک بهتر عملکرد مخازن ذخیره‌ی آب در برابر بیشینه‌ی زلزله در منطقه‌ی موردنظر می‌شود.

واژگان کلیدی: مخازن ذخیره‌ی آب، جداساز لرزه‌ی، روش تحریک بحرانی، زلزله‌های با دوره‌های تناوب بلند.

aliwman@yahoo.com  
nkhaaji@modares.ac.ir  
arsalan.bazr@yahoo.com

## ۱. مقدمه

مخازن ذخیره‌ی مایع از انواع سازه‌هایی هستند که در صنایع مختلف به صورت گسترده استفاده می‌شوند و بنابراین، لزوم تحلیل لرزه‌ی آن‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. همواره تحلیل رفتار دینامیکی سازه‌ها تحت زلزله به دلیل پیچیدگی‌های آن از چالش‌های مهندسان زلزله بوده است. این پیچیدگی‌ها در مورد مخازن و در بحث اندرکنش سیال و سازه بیشتر خواهد بود. از آنجایی که عملکرد مطلوب سازه‌های مخازن ذخیره‌ی مایع در حین زلزله و بلافاصله پس از آن موردنیاز است، پژوهش‌های زیادی بر روی آن‌ها انجام شده است. یکی از مدل‌های مهم و پایه برای بررسی رفتار دینامیکی مخازن که مبنای بسیاری از آیین‌نامه‌های معتبر کنونی نیز است، توسط هاوزنر (۱۹۶۳)<sup>[۱]</sup> پیشنهاد شده است. وی سیال درون مخزن را به دو قسمت جرم موج و سخت تقسیم کرد. فرض می‌شود که جرم

سخت با مخزن حرکت می‌کند و جرم موج بیانگر حرکت موج در قسمت‌های بالایی مخزن است. هاوزنر نشان داد که در بیشتر موارد، قسمت اعظم برش پایه‌ی لنگر واژگونی، در اثر جرم سخت است. براساس مشخصات جرم موج، حرکت نوسانی سیال داخل مخزن با سطح آزاد در نظر گرفته می‌شود. پژوهش مذکور سبب ارائه‌ی مدلی جهت سهولت در تحلیل مخازن شد. شریمالی و جانگید (۲۰۰۲) و (۲۰۰۳) پاسخ لرزه‌ی مخازن ذخیره‌ی مایع جداسازی شده با سیستم لاستیکی تحت تحریک زلزله‌ی دوجبهتی را بررسی کردند،<sup>[۲]</sup> که نوشتارهای مذکور پیشرو در تحلیل مخازن با استفاده از مدل ارائه شده‌ی جرم و فنر بودند. جداها و جانگید (۲۰۰۶)، پاسخ لرزه‌ی مخازن ذخیره‌ی مایع جداسازی شده توسط سیستم‌های الاستومری و لغزشی را تحت حرکت‌های نزدیک گسل بررسی کردند،<sup>[۳]</sup> که در آن مقایسه‌ی نیز بین دو سیستم جداساز اخیر جهت بررسی عملکرد آن‌ها انجام دادند.

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۱/۱، پذیرش ۱۳۹۷/۱/۲۸.

DOI:10.24200/J30.2018.4939.2187

سها و همکاران (۲۰۱۶)، اثر پارامترهای عدم قطعیت جداگر را بر روی پاسخ

## Archive of SID

تعیین یک حد بالا برای انرژی ورودی به‌کار رود. بنابراین با داشتن این حد، قید مناسب برای یک مسئله‌ی تحریک بحرانی با تابع هدف انرژی ورودی به‌دست می‌آید. اغلب این تصور وجود دارد که رفتار سازه‌های با دوره‌های تناوب کوتاه براساس PGA کنترل می‌شود. بنابراین استفاده از قید شتاب برای دوره‌های تناوب کوتاه منطقی خواهد بود. اما با توجه به اینکه در سازه‌های با دوره‌های تناوب متوسط و بلند، رفتار سازه توسط PGV کنترل می‌شود، مناسب‌تر است که برای تعیین حد بالای انرژی در ناحیه‌ی با دوره‌های تناوب متوسط و بلند، از قید سرعت استفاده شود. حد بالای انرژی حاصل از قیود، فقط به دو مقدار سطح زیر منحنی تابع چگالی طیفی توان مستطیلی (توان) و بیشینه مقدار آن (شدت) وابسته است. بنابراین، دو پارامتر اخیر می‌توانند معرف یک دسته از حرکات زمین باشند که رکورد موردنظر فقط یک نمونه از تحقق آن‌هاست. برای تأمین شرایط ذکر شده، کافی است پس از ایجاد نوبه‌ی سفید، دامنه‌ی فوریه‌ی متناظر با آن براساس محدوده‌ی بسامدی و دامنه‌ی تابع چگالی طیفی توان مستطیلی اصلاح شود و پس از آن عکس تبدیل فوریه گرفته شود. با توجه به این که در سازه‌های جداسازی شده، شرایط میرایی نامتناسب برقرار نیست، حل مسئله برای سازه با میرایی نامتناسب ارائه می‌شود.

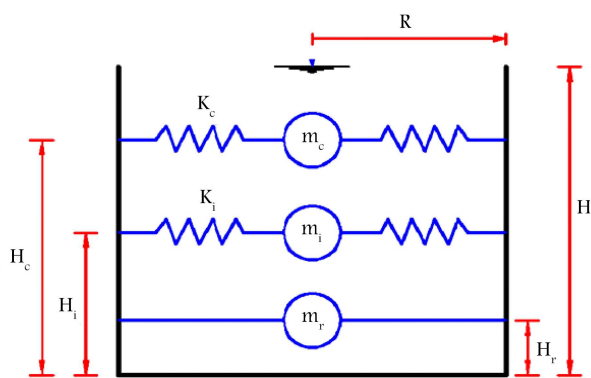
براساس بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان نوشتار حاضر، تلاش زیادی جهت کاربردی کردن روش تحریک بحرانی صورت نگرفته است. بنابراین، در نوشتار حاضر، توسعه و استفاده از روش تحریک بحرانی برای اولین بار در زمینه‌ی مخازن صورت گرفته است. همچنین، به دلیل ارائه شدن فرمول‌بندی تحریک بحرانی برای ساختمان‌ها، برای تعمیم فرمول‌بندی مذکور به حوزه‌ی مخازن، نیاز به تغییر در فرمولاسیون ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی و نیز در نظر گرفتن مشخصات جداساز خواهد بود.

## ۲. مدل‌سازی

### ۱.۲. مدل‌سازی مخازن

به منظور ارائه‌ی یک مدل با دقت مناسب برای کاربرد در مقاصد مهندسی، هارون یک مدل ۳ درجه آزاد مخزن انعطاف‌پذیر استوانه‌ی متصل به زمین را مطابق شکل ۱ معرفی کرد،<sup>[۱۲]</sup> که در ادامه به بررسی جزئیات آن پرداخته شده است.

در مدل هارون، فرض می‌شود سیال درون مخزن تراکم‌ناپذیر، غیرلزج و با جریان غیرچرخشی است. در هنگام تحریک زلزله، کل جرم مایع درون مخزن ( $m$ ) مطابق ۳ الگوی متفاوت مرتعش می‌شود:



شکل ۱. مدل ۳ جرمی هارون برای مدل‌سازی آثار اندرکنش سیال و مخزن.<sup>[۱۲]</sup>

لرزه‌ی مخازن ذخیره‌ی مایع جداسازی شده بررسی کردند و دریافتند که عدم قطعیت‌های جداگر به‌طور مشخصی در بیشینه‌ی کمیت‌های پاسخ مخازن ذخیره‌ی مایع جداسازی شده تأثیر می‌گذارند و تمرکز آن‌ها بر روی رفتار جداسازهاست.<sup>[۵]</sup> همچنین ایشان (۲۰۱۳) پاسخ مخازن ذخیره‌ی مایع جداسازی شده (که توسط مدل آنالوگ سه جرمی با جداگر لاستیکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در مشخصات پارامترها مدل شده بود) را تحت تحریک اتفاقی آنالیز و با تولید رکورد، رفتار مخازن را بررسی کردند.<sup>[۶]</sup> همچنین مندال و مایتی (۲۰۱۵) از روش اجزاء محدود غیرخطی برای آنالیز مخازن آب کسشان با در نظر گرفتن سیال و دیواره‌ی مخزن توسط المان‌های ایزوپارامتریک استفاده کردند و نشان دادند که موج مواج با افزایش بزرگی فشار هیدرودینامیک (هنگامی که بسامد تحریک به بسامد سازه‌ی مخزن آب نزدیک می‌شود)، به مقدار قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابد.<sup>[۷]</sup> همچنین موسی و ال‌داماتی (۲۰۱۶) اهمیت در نظر گرفتن مؤلفه‌ی قائم حرکات زمین (هنگامی که در طراحی مخازن مخروطی فولادی از مدل مکانیکی معادل که نیروهای نرمال عمل‌کننده با توجه به تحریک قائم استفاده می‌شود) را ارزیابی کردند،<sup>[۸]</sup> که از لحاظ متداول بودن موج قائم لرزه‌ی در خرابی‌های ناشی از بلندشدگی مخازن حائز اهمیت است.

از آنجایی که مخازن ذخیره‌ی سیال، جزء سازه‌های با دوره‌های تناوب بلند محسوب می‌شوند، اضافه کردن جداساز نیز باعث افزایش بیشتر و دور شدن زمان تناوب اصلی سیستم از زمان تناوب ابتدایی می‌شود. از این رو، رخداد زلزله‌های با دوره‌های تناوب بلند ممکن است سبب ایجاد پدیده‌ی تشدید در آن‌ها شود. شکاری و همکاران (۲۰۰۹)، نیز در ارزیابی رفتار لرزه‌ی مخازن جداسازی شده تحت حرکات لرزه‌ی با دوره‌ی تناوب بلند، ضمن بیان مشکلات پژوهش، به فرمول‌بندی نسبتاً پیچیده‌ی روش اجزاء مرزی اشاره کردند.<sup>[۹]</sup> همچنین مندال و مایتی (۲۰۱۶) از روش اجزاء محدود برای بررسی فشار هیدرودینامیکی بر روی دیواره‌ی مخزن استفاده کردند و نتیجه گرفتند که غیرخطی بودن سیال سخت (هنگامی که بسامد تحریک برابر یا کمتر از بسامد سازه‌ی مخزن و سیال باشد)، باعث افزایش فشار هیدرودینامیکی به مقدار قابل توجهی می‌شود که افزایش ایجاد شده در مخازن لاغر بیشتر مشهود است.<sup>[۱۰]</sup> در تمام پژوهش‌های صورت گرفته، جای خالی پژوهشی که در آن به‌طور هم‌زمان تحریک زمین، سازه و جداساز به شرایط بحرانی خود برسند و سبب بروز آسیب جدی به مخازن راهبردی و حیاتی شوند، کاملاً مشهود است.

یکی از روش‌های نسبتاً جدید برای بررسی رفتار لرزه‌ی سازه‌ها، روش تحریک بحرانی است.<sup>[۱۱]</sup> حرکات لرزه‌ی زمین، عدم قطعیت‌های فراوانی دارد. خیلی از عدم قطعیت‌های زلزله، شامل فقدان اطلاعات ناشی از کم اتفاق افتادن زلزله‌های بزرگ، مخصوصاً در مدل‌سازی حرکت زلزله‌های با دوره‌های تناوب بلند در مقایسه با زلزله‌های دیگر است. به منظور فائق آمدن بر مشکل اشاره شده، روش تحریک بحرانی برای لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها در طراحی ارائه شده است. با استفاده از روش تحریک بحرانی، بر حسب هدف طراحی می‌توان رکوردهای لازم را به صورتی که سازگاری مناسبی با سازه‌ی موردنظر داشته باشند، تعیین کرد. روش تحریک بحرانی در پی یافتن تحریکی است که از میان دسته‌ی از ورودی‌های مجاز، کمیت دلخواهی از پاسخ سازه‌ها (تابع هدف) را بیشینه سازد. به‌طور کلی، تمام مسائل تحریک بحرانی، تابع هدف و یک (یا چند) قید دارند. برای اینکه مدل تحریک ارائه شده از نظر فیزیکی واقعی و قابل قبول باشند، وجود قیود ضروری هستند. از این رو، پاسخ یک مسئله‌ی تحریک بحرانی به شدت به انتخاب قیودهای آن بستگی دارد. براساس روش تاکواکی (۲۰۰۴)،<sup>[۱۱]</sup> تحریک بحرانی می‌تواند برای

همچنین، مرکز ثقل جرم‌های معادل  $m_c$ ،  $m_i$  و  $m_r$  به ترتیب در ارتفاع‌های  $H_c$ ،  $H_i$  و  $H_r$  از پایین مخزن هستند که با استفاده از پارامترهای بدون بُعد مطابق روابط ۱۱ الی ۱۳ محاسبه می‌شوند: [۱۳]

$$\mu_c = 0.52410 - 0.10792S + 0.33958S^2 - 0.19357S^3 + 0.04791S^4 - 0.0045S^5 \quad (11)$$

$$\mu_i = 0.44086 - 0.11972S + 0.16752S^2 - 0.06089S^3 + 0.00751S^4 \quad (12)$$

$$\mu_r = 0.44233 + 0.08445S + 0.07916S^2 - 0.02677S^3 + 0.00326S^4 \quad (13)$$

بنابراین، ارتفاع‌های مؤثر  $H_c$ ،  $H_i$  و  $H_r$  برحسب ارتفاع مایع  $H$  به صورت روابط ۱۴ الی ۱۶ بیان می‌شوند:

$$H_c = \mu_c H \quad (14)$$

$$H_i = \mu_i H \quad (15)$$

$$H_r = \mu_r H \quad (16)$$

سختی‌ها و میرایی‌های معادل جرم‌های مایع و سخت به صورت روابط ۱۷ الی ۲۰ بیان می‌شوند:

$$K_c = m_c \omega_c^2 \quad (17)$$

$$K_i = m_i \omega_i^2 \quad (18)$$

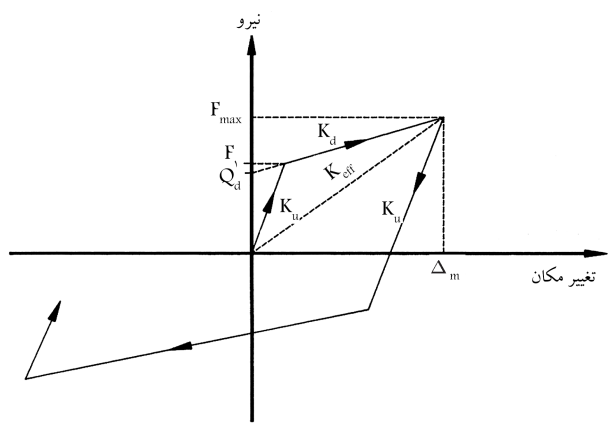
$$C_c = 2\zeta_c m_c \omega_c \quad (19)$$

$$C_i = 2\zeta_i m_i \omega_i \quad (20)$$

که در آن‌ها،  $\zeta_c$  و  $\zeta_i$  به ترتیب نسبت‌های میرایی جرم‌های مایع و سخت هستند. [۲]

### ۲.۲. مدل‌سازی جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی

مدل رفتاری جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی (LRB) به صورت شکل ۲ در نظر گرفته شده است. [۱۴] که در آن،  $Q_d$  مقاومت مشخصه،  $F$  نیروی تسلیم،  $K_{eff}$  سختی مؤثر و  $\Delta_m$  بیانگر بیشترین مقدار جابه‌جایی جداساز هستند.



شکل ۲. رفتار دوخطی جداگر LRB. [۱۴]

الف) جرم مایع ( $m_c$ ) که بیانگر جرم مایع بالایی است که سطح آزاد مایع را تغییر می‌دهد؛

ب) جرم سخت ( $m_i$ ) که نشانگر جرم مایع میانی است که به دیواره‌ی مخزن ضربه می‌زند؛

پ) جرم صلب ( $m_r$ ) که بیانگر جرم مایع زیرین است که به صورت صلب با دیواره‌ی مخزن تکان می‌خورد.

لازم به ذکر است که پایه‌ی فرض هارون، [۱۲] نوشتار هاووزنر، [۱] بوده است و وی سعی کرد مدل‌سازی هاووزنر را گسترش دهد. در نوشتار هاووزنر به صراحت قید شده است که روش مذکور با صرف‌نظر از آثار سقف ارائه شده است، و برای این منظور، سطح آزاد سیال از درصدی از حجم کل مخزن کمتر است.

از آنجایی که موده‌های گوناگونی در لرزش جرم‌های مایع و سخت وجود دارد، پاسخ را می‌توان با دقت مناسبی فقط با در نظر گرفتن اولین مود مایع و سخت تخمین زد. از این رو، مایع پیوسته با مخزن انعطاف‌پذیر می‌تواند به کمک ۳ جرم متمرکز مدل شود. جرم‌های مایع و سخت توسط فنرهای معادلی به مخزن وصل می‌شوند. جرم‌های معادل و بسامد طبیعی مایع مخزن به صورت رابطه‌های ۱ و ۲ بیان می‌شوند:

$$\omega_i = \frac{P}{H} \sqrt{\frac{E}{\rho_s}} \quad (1)$$

$$\omega_c = \sqrt{1.84 \left(\frac{g}{R}\right) \tanh(1.84S)} \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $H$  ارتفاع مایع،  $R$  شعاع مخزن،  $S = H/R$  نسبت لاغری مخزن،  $\omega_c$  و  $\omega_i$  بسامدهای مایع و سخت،  $E$  و  $\rho_s$  مدول کشسانی و چگالی دیواره‌ی مخزن،  $g$  شتاب گرانش و  $P$  یک پارامتر بدون بعد وابسته به بسامد جرم سخت است. همچنین در روابط ۳ الی ۶:

$$Y_c = m_c/m \quad (3)$$

$$Y_i = m_i/m \quad (4)$$

$$Y_r = m_r/m \quad (5)$$

$$m = \pi R^2 H \rho_w \quad (6)$$

پارامترهای بدون بعد  $Y_c$ ،  $Y_i$  و  $Y_r$  به ترتیب نسبت‌های جرم وابسته با جرم‌های مایع، سخت و صلب هستند. به عنوان نمونه، برای نسبت ضخامت دیواره‌ی مخزن به شعاع ۰.۰۴ روابط ۷ الی ۱۰ به دست می‌آیند: [۲]

$$Y_c = 1.01327 - 0.87578S + 0.35708S^2 - 0.06692S^3 + 0.00439S^4 \quad (7)$$

$$Y_i = -0.15467 + 1.21716S - 0.62839S^2 + 0.14424S^3 - 0.0125S^4 \quad (8)$$

$$Y_r = -0.01599 + 0.86356S - 0.30941S^2 + 0.04083S^3 \quad (9)$$

$$P = 0.037085 + 0.084302S - 0.05088S^2 + 0.012523S^3 - 0.00012S^4 \quad (10)$$

## Archive of SID

سختی مؤثر و معادل جداگر نیز از رابطه‌ی ۲۸ به دست می‌آید:

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\pi W}{g} \quad (28)$$

برای محاسبه‌ی درصد میرایی از رابطه‌ی ۲۹ استفاده می‌شود که در آن  $D$  میزان جابه‌جایی است:

$$\beta = \frac{\mu}{\pi \mu + D/R} \quad (29)$$

و در آخر، میرایی جداگر از رابطه‌ی ۲۴ به دست می‌آید.

### ۳. مشخصات مدل‌های مورد استفاده

در نوشتار حاضر، برای بررسی رفتار انواع گوناگون مخازن، از ۳ نوع مخزن لاغر، متوسط و پهن مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

لازم به ذکر است که سیال درون مخازن، آب است. نسبت‌های میرایی جرم موج و جرم سخت به ترتیب برابر ۰٫۰۰۵ و ۰٫۰۰۲ در نظر گرفته شده‌اند. دیواره‌ی مخزن فولادی با مدول کشسانی ۲۰۰ گیگاپاسکال و چگالی ۷۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب فرض شده است. طراحی سه بعدی بوده و از آثار سقف صرف‌نظر شده است. مشخصات مشترک هر دو نوع جداساز در جدول ۲ ارائه شده است. برای جداساز  $LRB$ ،  $K_d = 6200 t/m$  و  $\alpha = 0.1$  است. برای جداساز  $FPS$ ،  $\mu = 0.05$  است.

### ۴. تحریک بحرانی

حرکات زمین، عدم قطعیت‌های ذاتی زیادی دارند. به همین دلیل پیش‌بینی دقیق یک رویداد در یک سایت مشخص، بسیار دشوار است. با توجه به وجود عدم قطعیت‌های ذاتی در تعیین زلزله‌ی طرح، استفاده از رکوردهای ثبت شده اجتناب‌ناپذیر است. با استفاده از روش تحریک بحرانی، به‌خوبی می‌توان ثابت کرد که حد بالای انرژی می‌تواند یک قید بسیار مناسب برای یک مسئله‌ی تحریک بحرانی باشد. بنابراین، منطقی است که حد بالای انرژی را ثابت نگه داشت و در مقابل، به تحریک اعمالی، اجازه‌ی تغییر در دامنه و محتوای بسامدی داده شود. به عبارت دیگر، با داشتن فقط یک نمونه حرکت زمین، می‌توان با استفاده از روش تحریک بحرانی، رکوردهای لازم را به نحوی که بر حسب هدف طراحی، سازگاری مناسبی با سازه‌ی موردنظر داشته باشند، تعیین کرد. این، مزیت بزرگ روش تحریک بحرانی است. حد بالای انرژی حاصل از قید شتاب، فقط به دو مقدار سطح زیرمنحنی چگالی طیفی حرکت زمین

جدول ۱. مشخصات مخازن مورد بررسی.

نوع مخزن	$S$	$\omega_z (Hz)$	$\omega_c (Hz)$	$H (m)$
لاغر	۰٫۸۵	۱٫۷۱	۳٫۷۵	۱۱٫۳
متوسط	۱٫۰	۱٫۵۱	۵٫۴۹	۷٫۵
پهن	۱٫۶	۱٫۲۸	۶٫۷۸	۵٫۳

جدول ۲. مشخصات مشترک هر دو نوع جداساز.

$T (sec)$	$K_e (t/m)$	$D (m)$	$C (\frac{t \cdot sec}{m})$
۲٫۵	۸۳۶۵٫۶	۰٫۳	۱۰۹۸٫۴۳

برای انجام تحلیل غیرخطی، جداگرهای  $LRB$  اغلب به صورت دوخطی مدل می‌شوند که شامل سختی کشسانی ( $K_e$ ) و سختی خمیری ( $K_d$ ) هستند. سختی خمیری از رابطه‌ی ۲۱ به دست می‌آید که در آن  $G$  مدول برشی لاستیک و  $A$  سطح مقطع بالشتک است:

$$K_d = \frac{GA}{t_r} \quad (21)$$

همچنین، نیروی تسلیم جداگر با تقریب قابل قبولی از رابطه‌ی ۲۲ به دست می‌آید:

$$F_y = \frac{Q}{1 - K_d/K_e} \quad (22)$$

دوره‌ی تناوب اصلی جداگر نیز از رابطه‌ی ۲۳ به دست می‌آید که در آن  $M_t$  جرم کلی سازه است:

$$T^{iso} = 2\pi \sqrt{\frac{M_t}{K_{eff}}} \quad (23)$$

میرایی جداگر نیز از رابطه‌ی ۲۴ به دست می‌آید که در آن  $\xi$  میرایی بحرانی است:

$$C = 2\sqrt{K_{eff} M_t \xi} \quad (24)$$

### ۳.۲. مدل‌سازی جداگر اصطکاکی پاندولی

مدل رفتاری جداگر اصطکاکی پاندولی (FPS)،<sup>[۱۴]</sup> به صورت شکل ۳ در نظر گرفته شده است.<sup>[۱۴]</sup> برای انجام تحلیل غیرخطی، جداگرهای FPS نیز اغلب به صورت دوخطی مدل می‌شوند. سختی افقی از رابطه‌ی ۲۵ به دست می‌آید که در آن  $W$  وزن سازه و  $R$  شعاع انحناء جداگر است:

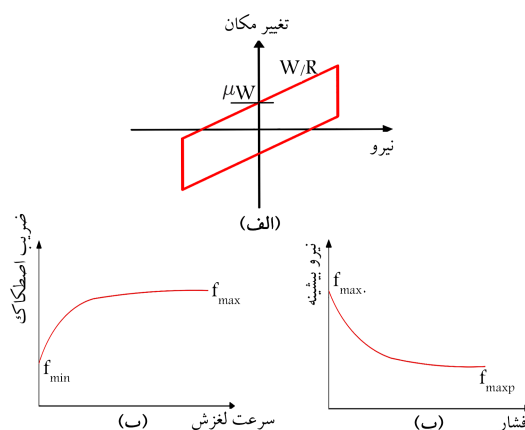
$$K_H = \frac{W}{R} \quad (25)$$

نیروی تسلیم جداگر نیز از رابطه‌ی ۲۶ به دست می‌آید که در آن  $\mu$  ضریب اصطکاک است:

$$F_y = \mu W \quad (26)$$

همچنین دوره‌ی تناوب اصلی جداگر از رابطه‌ی ۲۷ به دست می‌آید:

$$T^{iso} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (27)$$



شکل ۳. رفتار دوخطی جداگر FPS.<sup>[۱۴]</sup>

صورت  $\ddot{u}_g(t) = c(t)\omega(t)$  فرض شود که در آن  $c(t)$  یک تابع پوش تعیینی و  $\omega(t)$  یک تابع احتمالاتی معرف محتوای بسامدی تحریک است، می‌توان به اِزاء یک  $S_\omega(\omega)$  داده شده، تابع پوش  $c(t)$  را چنان تعیین کرد که تابع هدف انتخابی (که در اینجا متوسط مربعات دریافت یک مدل یک درجه آزاد است) را تحت قید  $E \left[ \int_0^T \ddot{u}_g(t)^2 dt \right] = \bar{C}$  بر روی متوسط انرژی کل، بیشینه سازد. با استفاده از قید  $\int_{-\infty}^{+\infty} S_\omega(\omega) d\omega = \bar{S}_\omega$  می‌توان قید نخست را به صورت رابطه‌ی ۳۴ خلاصه کرد: [۱۵]

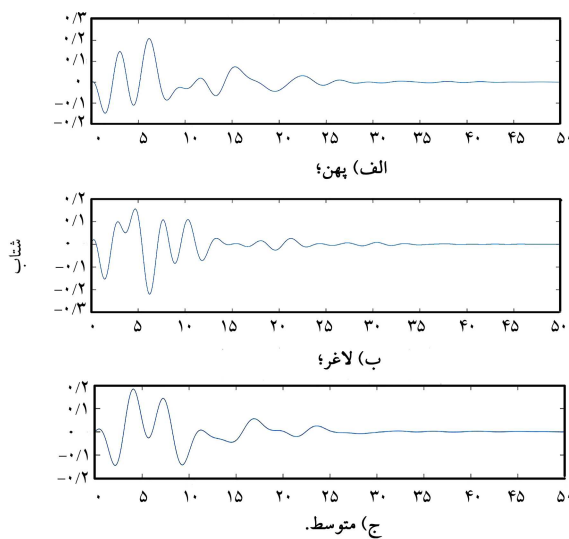
$$\int_0^T C(t)^2 dt = \frac{\bar{C}}{\bar{S}_\omega} \quad (34)$$

این مسئله شامل یک روند بیشینه‌سازی مضاعف نسبت به زمان و نسبت به تابع پوش است. راه‌حل کلیدی برای تعیین تابع پوش تغییر ترتیب بیشینه‌سازی است. تاکوکی همچنین نشان داد که در مسئله ذکر شده می‌توان با استفاده از نابرابری کوشی - شوارتز، یک حد بالا برای متوسط مربعات دریافت به دست آورد. وی نشان داد که حد بالای به‌دست آمده‌ی پاسخ نیز می‌تواند پاسخ دقیق تعیین شده توسط روش برنامه‌نویسی غیرخطی را با دقت مناسبی محدود کند.

در نوشتار حاضر، از رکورد زلزله‌ی منجیل برای تولید تحریک بحرانی استفاده شده است؛ و برای مخازن چاق، لاغر و متوسط با دو جداگر LRB و FPS، زلزله‌های تحریک بحرانی با کمک کد نگارش شده توسط نویسندگان در نرم‌افزار متلب ساخته شده‌اند. در شکل‌های ۴ و ۵، رکوردهای تولید شده مشاهده می‌شوند.

## ۵. تحلیل

در نوشتار حاضر، با استفاده از روش تحریک بحرانی سعی شده که با ثابت نگاه داشتن حد بالای انرژی ورودی، به تحریکات اجازه‌ی تغییر در دامنه و بسامد داده شود تا تحریک بحرانی متناسب با شرایط سازه‌ها تولید و به آن‌ها اعمال شود. برای این منظور از برنامه‌ی SAP۲۰۰۰ و ویرایش ۱۷/۳ جهت تحلیل استفاده شده است. در انتها، نتایج حاصل با نتایج زلزله‌ی اصلی مقایسه شده است. در شکل‌های ۶ الی ۱۲، انرژی ورودی کل زلزله در واحد جرم و حد بالای آن رسم شده است، که براساس



شکل ۴. رکوردهای تولید شده‌ی تحریک بحرانی برای انواع مخازن با جداساز FPS.

(توان) و بیشینه‌ی مقدار آن (شدت) وابسته است. بنابراین، این دو پارامتر می‌توانند معرف یک دسته از حرکات زمین باشند که رکورد موردنظر فقط یک نمونه از تحقق آن‌هاست. به این ترتیب می‌توان یک مسئله‌ی تحریک بحرانی جدید برای انرژی ورودی تعریف کرد، به نحوی که به اِزاء یک حد بالای انرژی معین، متوسط انرژی ورودی به سازه را بیشینه سازد. [۱۵]

این تصور وجود دارد که انرژی منتشر شده از یک گسل، محدود است. بنابراین مناسب است که برای تعیین حد بالای انرژی، شدت تحریک ورودی محدود شود. ظرفیت حرکات زمین اغلب به صورت انتگرال زمانی مربع شتاب مورد بحث است. یکی از کمیت‌های مذکور، که به عنوان شدت اریاس شناخته می‌شود، از رابطه‌ی ۳۰ به‌دست می‌آید: [۱۱]

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a^2(t) dt \quad (30)$$

اگر از ضریب  $\frac{\pi}{2g}$  صرف‌نظر شود، قید بر روی کمیت اخیر را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۳۱ بیان کرد:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} a^2(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |A(\omega)|^2 d\omega = \bar{C}_A \quad (31)$$

از طرف دیگر، واضح است که مقدار بیشینه‌ی طیف دامنه‌ی فوریه‌ی شتاب حرکت ورودی محدود است. طیف دامنه‌ی فوریه‌ی نامحدود ممکن است نشانگر یک تابع هارمونیک کامل باشد که این برای حرکات واقعی زمین غیرواقعی است. بنابراین خاصیت ذکر شده به صورت رابطه‌ی ۳۲ مقید می‌شود:

$$|A(\omega)| \leq \bar{A} \quad (32)$$

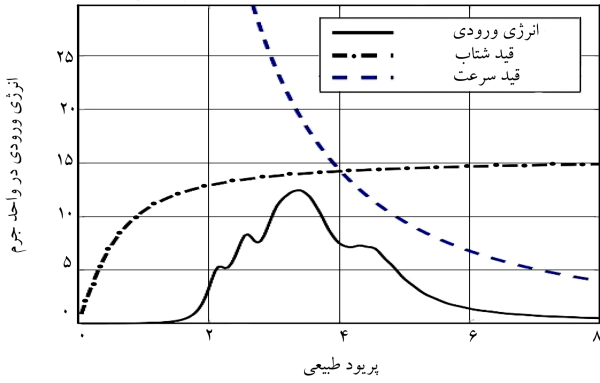
که در آن،  $\bar{A}$  محدود است. به این ترتیب، مسئله‌ی تحریک بحرانی برای انرژی ورودی زلزله با قید شتاب شامل تعیین  $|A(\omega)|$  به نحوی است که تابع هدف ۳۳ را تحت دو قید پیش گفته بیشینه سازد:

$$f = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) |A(\omega)|^2 d\omega \quad (33)$$

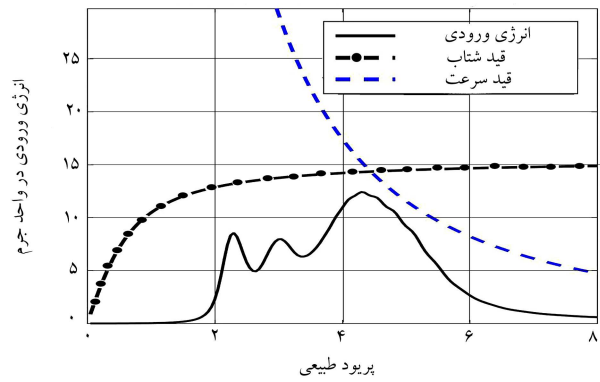
که در آن،  $|A(\omega)|^2$  را می‌توان با یک تابع مستطیلی به اندازه‌ی  $\bar{A}^2$  تقریب زد. پهنای باند بسامد این تابع برابر  $\Delta\Omega = \pi \bar{C}_A / \bar{A}^2$  است.

## ۱.۴. زلزله‌های تحریک بحرانی

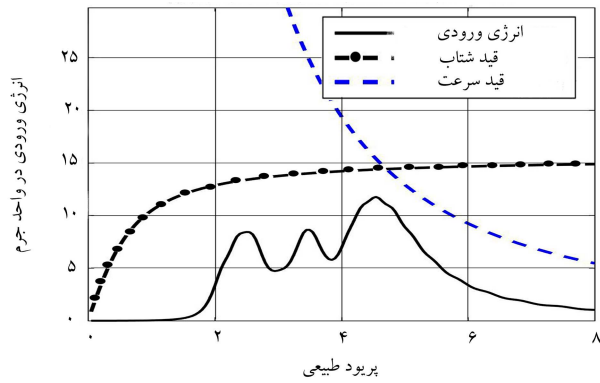
همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، با استفاده از روش تحریک بحرانی می‌توان با درنظر گرفتن حد بالای انرژی ورودی به عنوان قید مسئله، رکوردهای لازم را (به نحوی که بر حسب تابع هدف انتخابی، سازگاری مناسبی با سازه‌ی موردنظر داشته باشند) تعیین کرد. در روش تحریک بحرانی مورد استفاده، به یک تابع چگالی طیفی مستطیلی نیاز است که مقدار بیشینه و همچنین سطح زیر آن قابل کنترل باشد. برای تأمین شرایط بیان شده، کافی است پس از ایجاد نوفه‌ی سفید، دامنه‌ی فوریه‌ی متناظر با آن براساس محدوده‌ی بسامدی و دامنه‌ی تابع چگالی طیفی توان مستطیلی اصلاح شود و سپس از آن عکس تبدیل فوریه گرفته شود. تاکوکی (۲۰۰۴)، رده‌ی جدیدی از مسائل تحریک بحرانی را برای تعیین تابع پوش بحرانی برای ورودی تصادفی غیرایستا فرمول‌بندی کرد. اگر مدل غیرایستای شتاب حرکت ورودی به



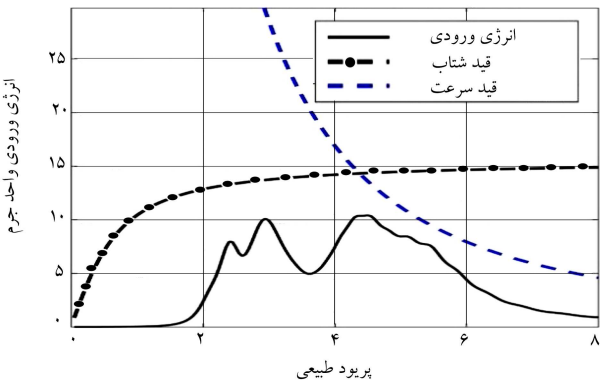
شکل ۸. مخزن لاغر با جداساز LRB.



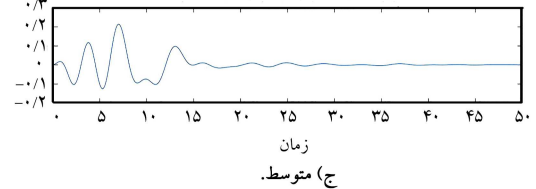
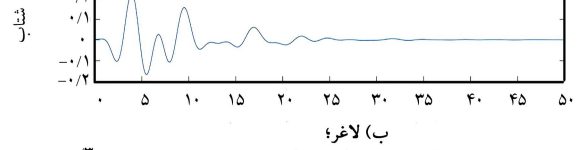
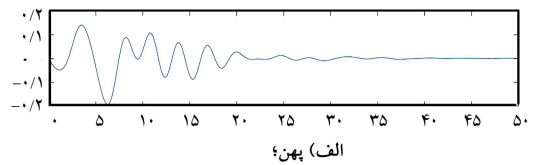
شکل ۹. مخزن متوسط با جداساز LRB.



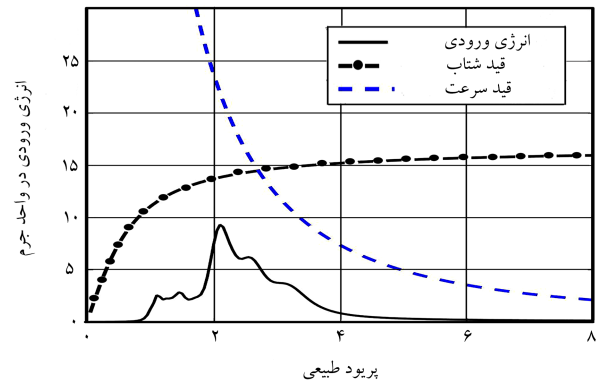
شکل ۱۰. مخزن پهن با جداساز FPS.



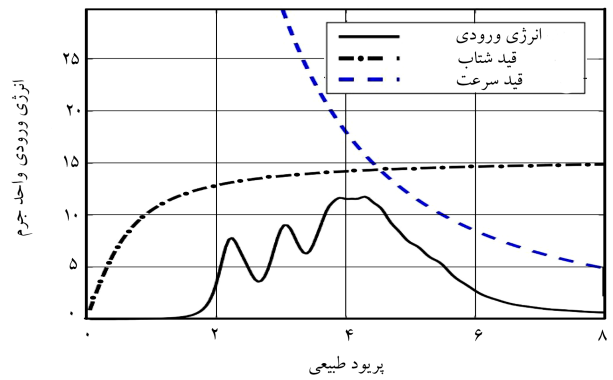
شکل ۱۱. مخزن لاغر با جداساز FPS.



شکل ۵. رکوردهای تولید شدهی تحریک بحرانی برای انواع مخازن با جداساز LRB.



شکل ۶. انرژی زلزله‌ی منجیل.

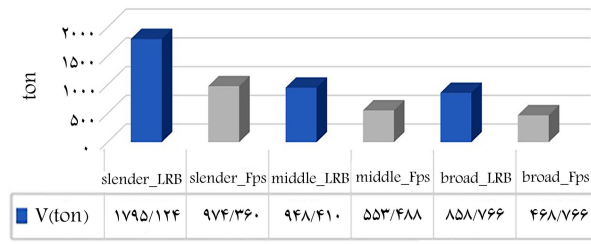


شکل ۷. مخزن پهن با جداساز LRB.

آن‌ها (محل تقاطع حدود انرژی)، می‌توان به خوبی حرکات دوره‌ی تناوب بلند را شناسایی کرد.

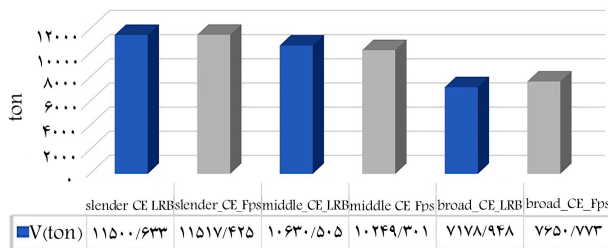
همان‌گونه که پیشتر بحث شد، در روش تحریک بحرانی، نقطه‌ی تقاطع دو قید سرعت و شتاب حائز اهمیت است؛ زیرا بیانگر بسامد غالب بدترین زلزله‌ی است که در آینده احتمال دارد رخ دهد. طبق تعریف زلزله‌های با دوره‌های تناوب بلند، این نقطه در محدوده‌ی زلزله‌ی با دوره‌ی تناوب بلند است (بزرگ‌تر از ۱ ثانیه). شکل‌های ۷ الی ۱۲ نیز تمام ویژگی روش تحریک بحرانی را بیان می‌کنند؛ به بیان

نیروی برشی تحت زلزله اصلی



الف) زلزله اصلی؛

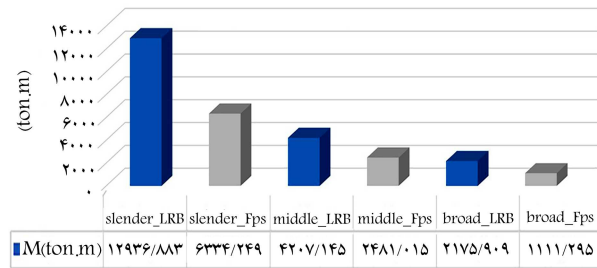
نیروی برشی تحت زلزله تحریک بحرانی



ب) زلزله تحریک بحرانی.

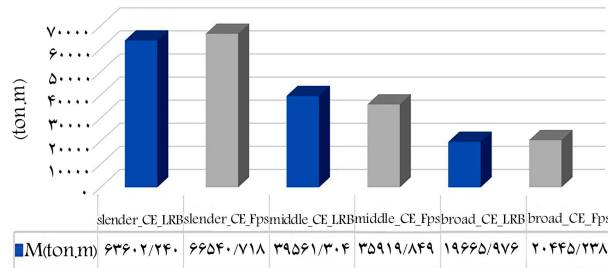
شکل ۱۴. نیروهای برشی در سه مخزن.

لنگر خمشی تحت زلزله اصلی



الف) زلزله اصلی؛

لنگر خمشی تحت زلزله تحریک بحرانی

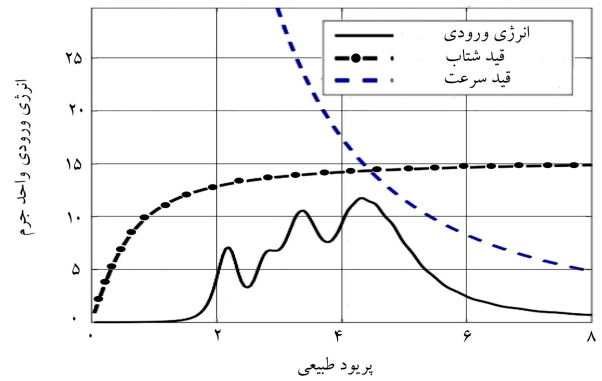


ب) زلزله تحریک اصلی.

شکل ۱۵. لنگرهای خمشی در سه مخزن.

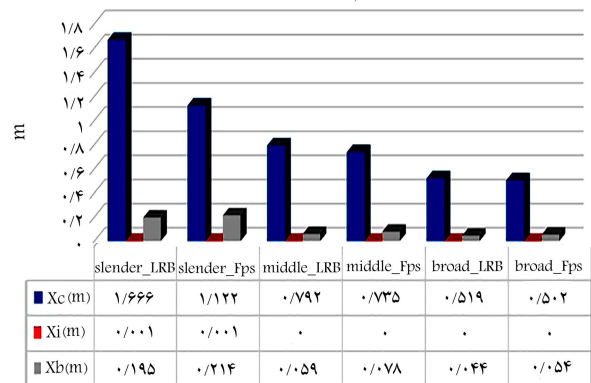
الف) تأثیر جداگرها در کنترل سازه‌ها کاملاً مشهود است و در بین جداگرها، جداگر اصطکاکی پاندولی نسبت به جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی عملکرد بهتری داشته است که می‌تواند به دلیل داشتن دوره‌ی تناوب متفاوت نسبت به سازه باشد و به دلیل نیروی برگشت‌پذیری موجود در جداسازهای اصطکاکی پاندولی باشد.

ب) از آنجایی که در روش تحریک بحرانی، سعی در یافتن تحریکی است که سازه را به شرایط بحرانی در آن منطقه‌ی خاص برساند (در این حالت، منطقه‌ی منجیل)، با توجه به قیود مطرح شده (حد بالای انرژی ورودی به سازه‌ی مرتبط با شدت



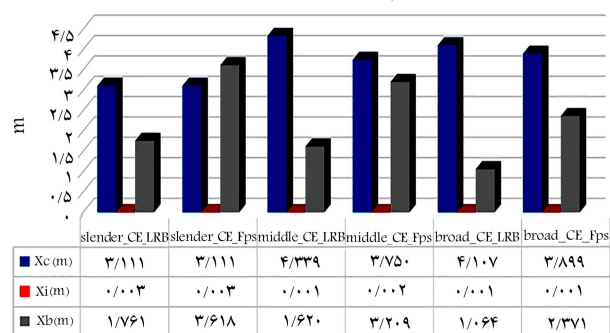
شکل ۱۲. مخزن متوسط با جداساز FPS.

جا به جایی جرم‌ها تحت زلزله اصلی



الف) زلزله اصلی؛

جا به جایی جرم‌ها تحت زلزله تحریک بحرانی



ب) زلزله تحریک بحرانی.

شکل ۱۳. جا به جایی جرم‌ها در سه مخزن.

دیگر، با توجه به مشخصات مخازن لاغر، متوسط و پهن تحت جداسازهای اصطکاکی و لاستیکی، و فرضیات اصلی روش تحریک بحرانی (مثل گسل مجازی حاصل از فقدان اطلاعات، شکاف اطلاعاتی از نحوه‌ی گسیختگی و پیش‌بینی‌سازی مضاعف)، زلزله‌ی بحرانی برای هر سازه با توجه به نوع سازه تولید و مشاهده می‌شود که بسامد غالب در محدوده‌ی با دوره‌ی تناوب بلند است و انرژی ورودی به سازه با توجه به ثابت بودن حد بالای انرژی، بحرانی‌ترین حالت را برای سازه را به وجود می‌آورد. همچنین در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵ می‌توان پاسخ جا به جایی‌ها، نیروها و لنگرها را تحت زلزله‌ی اصلی و تحریک بحرانی مشاهده کرد. با توجه به شکل‌های ۱۳ الی ۱۵ می‌توان مشاهده کرد که:

## Archive of SID

و با استفاده از روش تحریک بحرانی، سه نوع لرزه‌ی بحرانی با حفظ حد بالای انرژی ورودی لرزه‌ی اصلی متناسب با سازه‌ها تولید و به هر یک از آنها اعمال شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که:

- جداگرهای FPS و LRB باعث کاهش پاسخ Xc شده‌اند. تأثیر جداگر FPS نسبت به جداگر LRB مطلوب‌تر بوده است. بیشینه‌ی جابه‌جایی Xb جداگر FPS بیشتر از جداگر LRB است که این نشانگر جذب انرژی بیشتر جداگر FPS است.
- مشاهده شد که پاسخ لرزه‌های حاصل از تحریک بحرانی با توجه به حد بالای انرژی ورودی، بحرانی‌تر از لرزه‌ی اصلی است.
- در مورد خروجی‌های از جنس جابه‌جایی، تأثیر لرزه‌های تحریک بحرانی در Xb و Xc بیشتر بوده است. مدل‌های با مخازن لاغر، بیشترین جابه‌جایی‌ها را در لرزه‌های تحریک بحرانی از خود نشان می‌دهند.
- مدل‌های با مخازن لاغر، بیشترین برش پایه و نیروی Fi و کمترین نیروی Fc را در لرزه‌های تحریک بحرانی از خود نشان می‌دهند.
- مدل‌های با مخازن لاغر، بیشترین لنگرهای واژگونی را در لرزه‌های تحریک بحرانی از خود نشان می‌دهند.

اریاس) و تابع هدف برای سازه‌ها با میرایی نامتناسب (که به تابع چگالی طیفی توان مستطیلی در محدوده‌ی بیشینه‌ی تابع چگالی طیفی توان از لرزه‌ی اصلی منجر می‌شود)، می‌توان دریافت بیشینه‌ی لرزه‌ی بی که در آن منطقه برای سازه‌های ذکر شده ممکن است رخ دهد، بسیار بزرگ‌تر و قوی‌تر از لرزه‌ی اصلی خواهد بود. این امر به دلیل سطح زیادتر منحنی انرژی ورودی به سازه‌ها، سطح زیر تابع چگالی طیفی توان لرزه‌های تحریک بحرانی و مشاهده‌ی پاسخ نمودارهاست.

پ) برای بیان بهتر این مفهوم که بیشینه‌ی لرزه‌ی بی که در منطقه‌ی مشجیل برای سازه‌های فوق ممکن است رخ دهد، بسیار بزرگ‌تر و قوی‌تر از لرزه‌ی اصلی خواهد بود، می‌توان ملاحظه کرد که به عنوان مثال، لرزه‌ی تحریک بحرانی باعث افزایش موج متلاطم به میزان ۸۷٪، ۴۴۸٪ در مخزن متوسط و ۶۹۱٪ در مخزن پهن برای جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی شده است. برای جداگر اصطکاکی پاندولی، افزایش‌های مزبور به ترتیب ۱۷۷٪ در مخزن لاغر، ۴۱۰٪ در مخزن متوسط و ۶۷۷٪ در مخزن پهن بوده است.

## ۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، با بررسی سه نوع مخزن لاغر، متوسط و چاق با جداگر لاستیکی

## پانویس‌ها

1. lead rubber bearing
2. friction pendulum system

## منابع (References)

1. Housner, G. "The dynamic behavior of water tanks", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **53**(2), pp. 381-387 (1963).
2. Shrimali, M.K. and Jangid, R.S. "Seismic response of liquid storage tanks isolated by sliding bearings", *Engineering Structures*, **24**(7), pp. 907-919 (2002).
3. Shrimali, M.K. "Seismic response of isolated liquid storage tanks", Ph.D. Thesis, Indian Institute of Technology, Bombay (2003).
4. Jadhav, M.B. and Jangid, R.S. "Response of base-isolated liquid storage tanks to near-fault motions", *Structural Engineering and Mechanics*, **23**(6), pp. 615-634 (2006).
5. Saha, S.K., Matsagar, V. and Chakraborty, S. "Uncertainty quantification and seismic fragility of base-isolated liquid storage tanks using response surface models", *Probabilistic Engineering Mechanics*, **43**, pp. 20-35 (2016).
6. Saha, S.K., Sepahvand, K., Matsagar, V.A. and et al. "Stochastic analysis of base-isolated liquid storage tanks with uncertain isolator parameters under random excitation", *Engineering Structures*, **57**, pp. 465-474 (2013).
7. Mandal, K.K. and Maity, D. "Nonlinear finite element analysis of elastic water storage tanks", *Engineering Structures*, **99**, pp. 666-676 (2015).
8. Musa, A. and El Damatty, A.A. "Capacity of liquid-filled conical tanks under vertical excitation", *Thin-Walled Structures*, **103**, pp. 199-210 (2016).
9. Shekari, M.R., Khaji, N. and Ahmadi, M.T. "A coupled BE-FE study for evaluation of seismically isolated cylindrical liquid storage tanks considering fluid-structure interaction", *Journal of Fluids and Structures*, **25**(3), pp. 567-585 (2009).
10. Mandal, K.K. and Maity, D. "Nonlinear finite element analysis of water in rectangular tank", *Ocean Engineering*, **121**, pp. 592-601 (2016).
11. Takewaki, I. "Bound of earthquake input energy", *Journal of Structural Engineering*, **130**(9), pp. 1289-1297 (2004).
12. Haroun, M.A. "Vibration studies and tests of liquid storage tanks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **11**(2), pp. 179-206 (1983).
13. Seleemah, A.A. and El-Sharkawy, M. "Seismic response of base isolated liquid storage ground tanks", *Ain Shams Engineering Journal*, **2**(1), pp. 33-42 (2011).
14. Naeim, F., *The seismic design handbook (2nd Edition)*, Van Nostrand Reinhold, New York (2001).
15. Takewaki, I. "Critical excitation methods in earthquake engineering", Butterworth-Heinemann (2013).