

اثر جداساز پایه در پاسخ لرزه‌ی مخازن بتنی هوایی تحت اثر همزمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک گسل

لیلاکلانی ساروکلائی (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، مؤسسه‌ی آموزش عالی طبری، بابل

لیلا خان‌محمدی (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران

بهرام نوایی‌نیا* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۷۳-۵۹، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، رفتار مخازن بتنی هوایی دارای شافت مرکزی و جداساز پایه‌ی لاستیکی هسته‌ی سربی، تحت تحریک همزمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌های حوزه‌های نزدیک و دور از گسل با استفاده از تحلیلی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی با احتساب اندرکنش آب و مخزن بررسی شده و نتایج نشان داده است که وجود جداساز پایه در تمامی حالت‌های بررسی شده سبب کاهش حدود ۴۰ تا ۶۰ درصدی برش پایه و ۶۰ تا ۹۰ درصدی تنش بلندشدگی می‌شود. با افزایش حجم مخزن، اثرکاهنده‌ی جداساز در تنش بلندشدگی مخازن کاهش می‌یابد، در حالی که عملکرد جداساز لرزه‌ی در کاهش برش پایه‌ی مخازن هوایی با افزایش حجم مخزن بهبود خواهد یافت. همچنین، افزایش شتاب زاویه‌ی مؤلفه‌ی دورانی زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، سبب تضعیف حدود ۲۰ تا ۳۰ درصدی اثرکاهشی جداساز پایه در پاسخ لرزه‌ی مخازن می‌شود. بنابراین، عدم اعمال مؤلفه‌ی دورانی زلزله در تحلیل مخازن واقع در نواحی نزدیک گسل که پتانسیل مؤلفه‌ی دورانی زلزله‌ها قابل توجه است، موجب بزرگ‌نمایی اثرکاهشی جداساز پایه در نتایج می‌شود.

واژگان کلیدی: مخازن بتنی هوایی، اندرکنش آب و سازه، جداساز لاستیکی هسته‌ی سربی، زلزله‌های حوزه‌های نزدیک و دور از گسل، مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله.

leila.kalani.s@gmail.com
l.khanmohammadi@pnu.ac.ir
navayi@nit.ac.ir

۱. مقدمه

ضروری به نظر می‌رسد. روش مرسوم طراحی لرزه‌ی مخازن، مبتنی بر افزایش ظرفیت سازه است، که در آن، ایجاد ظرفیت باربری جانبی در مخازن با افزایش مقاومت و تأمین شکل‌پذیری صورت می‌گیرد. در نتیجه‌ی اجرای روش اخیر، ابعاد اعضا سازه‌ی و اتصال‌ها افزایش می‌یابد و برای تحمل بارهای جانبی لازم است اعضا باربر جانبی در نظر گرفته شوند. همچنین در روش اخیر، به دلیل تغییرشکل‌های غیرخطی در اعضا سازه‌ی، امکان بروز خرابی در آن‌ها و وقوع آسیب در اعضا غیرسازه‌ی و تجهیزات به دلیل تغییرشکل‌های زیاد وجود دارد. بنابراین مخازن ساخته شده براساس روش‌های مرسوم طراحی، مقدار شتاب قابل توجهی را هنگام وقوع زلزله‌های شدید تجربه می‌کنند. با پیشرفت دانش فنی و تغییر فلسفه‌ی طراحی سازه‌ها، فناوری‌هایی همچون کنترل لرزه‌ی غیرفعال سازه‌ها استفاده می‌شود که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به جداسازی لرزه‌ی سازه‌ها اشاره کرد که در چند دهه‌ی اخیر بسیار به آن توجه شده است. با استفاده از جداسازی لرزه‌ی می‌توان با کاهش نیاز لرزه‌ی، پاسخ سازه را در محدوده‌ی ایمن قرار داد، که یک راه‌حل اقتصادی و عملی

مخازن هوایی ذخیره‌ی آب از جمله سازه‌های با اهمیت بسیار زیاد در هنگام وقوع زلزله محسوب می‌شوند، به طوری که ضریب اهمیت آن‌ها در استاندارد ۲۸۰۰ ایران، بیشینه بوده و برابر ۱/۴ در نظر گرفته شده است. نقش بسیار مهمی که در زمینه‌ی آب‌رسانی برای مصارف شرب، بهداشت و خاموش کردن آتش بعد از وقوع زلزله‌های شدید از سازه‌های مذکور موردانتظار است، لزوم عملکرد مطمئن و بی‌وقفه‌ی آن‌ها را روشن می‌سازد. همچنین با توجه به لرزه‌خیز بودن کشور ایران، وجود آب در تراز بالاتر از فونداسیون در مخازن، وجود اندرکنش بین آب و سازه و نیز ناشناخته بودن آثار ناشی از تحریک هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی حرکت زمین هنگام زلزله در نواحی دور و نزدیک گسل، بررسی دقیق رفتار این‌گونه سازه‌ها در برابر زلزله با استفاده از روش تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی با وجود پیچیدگی‌های موجود

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۹/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۲/۲۳، پذیرش ۱۴۰۰/۱/۲۱

DOI:10.24200/J30.2021.57110.2882

برای کاهش آسیب‌های لرزه‌یی سازه است.^[۱] از طرف دیگر، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تفاوت‌های قابل ملاحظه‌یی بین پاسخ‌های لرزه‌یی سازه در مجاورت گسل‌های مسیب زلزله و نواحی دور از گسل وجود دارد که عمدتاً ناشی از تغییرات در محتوای بسامدی شتاب زمین، مکانیزم گسلش، و وجود حرکات‌های پالس‌گونه در تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی و سرعت زمین در زلزله‌های مذکور است.^[۲] وجود جابه‌جایی‌های بزرگ در زلزله‌های نزدیک گسل می‌تواند سبب ایجاد اختلال در عملکرد سیستم‌های جداسازی شود. همچنین با توجه به ویژگی‌های زمین‌ساختی و تکتونیکی و تحلیل آماری زلزله‌های منطقه، ممکن است برخی از نواحی لرزه‌یی مستعد ایجاد مؤلفه‌های دورانی قابل توجهی باشند که این خود می‌تواند در نواحی دور و نزدیک گسل سبب ایجاد تغییراتی در عملکرد بهینه و اقتصادی جداساز شود.

یکی از مسائل مهم در تحلیل دینامیکی سازه‌ها، بررسی اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی حرکت زمین در پاسخ آن‌هاست که به این مسئله در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌یی سازه‌ها در برابر زلزله کمتر توجه شده است؛ که علت اصلی آن کوچک بودن دامنه‌ی ارتعاش مؤلفه‌های دورانی، نبود امکان ثبت آن‌ها با استفاده از دستگاه‌های استاندارد لرزه‌نگاری و نیز کوچک انگاشته شدن تأثیر آن‌ها در سازه‌هاست. مشکلات ثبت مؤلفه‌های دورانی جنبش زمین با دستگاه‌های استاندارد لرزه‌نگاری موجب شده است تا به پژوهش در زمینه‌ی تولید مؤلفه‌های ذکر شده با استفاده از مؤلفه‌های انتقالی موجود با دو روش کلی پرداخته شود: ۱. استخراج مؤلفه‌ی دورانی بر مبنای استفاده از معادله‌ی کلاسیک نظریه‌ی کشسانی بین حرکت انتقالی داخل صفحه و دوران عمود بر صفحه؛ ۲. استخراج مؤلفه‌ی دورانی بر مبنای استفاده هم‌زمان از معادلات کلاسیک نظریه‌ی کشسانی و نظریه‌ی انتشار امواج. روش اول توسط نیومارک (۱۹۶۹)،^[۳] مطرح شد و بعدها با توسعه‌ی روش نیومارک، سه روش برای برآورد مؤلفه‌ی دورانی برحسب مؤلفه‌های انتقالی معرفی شدند، که شامل: روش‌های مشتق زمانی، تفاضل محدود و زمین‌سنجی^[۴-۸] بودند. در روش‌های اخیر که از روش نیومارک نتیجه شده‌اند، سرعت ظاهری امواج، ثابت فرض می‌شود و تفاوتی در نحوه‌ی به دست آوردن مؤلفه‌های گهواره‌یی و پیچشی زلزله وجود ندارد. در روش دوم، که توسط پژوهشگران مختلفی^[۹-۱۱] استفاده شده است، از معادلات نظریه‌ی کشسانی و نظریه‌ی انتشار امواج به‌طور هم‌زمان استفاده شده و علاوه بر سرعت ظاهری امواج، زاویه‌ی موج حادث نیز در برآورد مؤلفه‌ی پیچشی و گهواره‌یی مدنظر قرار گرفته است. با وجود این، در روش آن‌ها سرعت امواج و زاویه‌ی موج حادث مستقل از بسامد در نظر گرفته شده است. هانگ نان لی و همکاران (۲۰۰۴)،^[۱۲] با در نظر گرفتن سرعت و زاویه‌ی موج حادث وابسته به بسامد به تولید مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین پرداختند و نشان دادند که در نظر گرفتن وابستگی بسامدی حرکت امواج می‌تواند تغییراتی را در تاریخچه‌ی زمانی مؤلفه‌ی دورانی ایجاد کند.

مطالعات اولیه در زمینه‌ی تحلیل لرزه‌یی مخازن زمینی مکعبی و محاسبه‌ی نیروهای هیدرودینامیک در توسط هاوسنر (۱۹۶۳)،^[۱۳] انجام و الگوهای متشکل از جرم و فنر برای در نظر گرفتن آثار ضربه و نوسان ناشی از حرکت مایع درون مخزن پیشنهاد و روابط نظیر ارائه شده است. پس از آن مطالعات متعددی در مورد مخازن مذکور و با در نظر گرفتن مدل‌های اصلاح شده‌ی متشکل از جرم و فنر صورت گرفته است که به‌طور خلاصه توسط داگانگون^۲ و همکارش (۲۰۰۸)،^[۱۴] ارائه و مقایسه شده‌اند. با پیشرفت تکنولوژی و استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته‌ی اجزاء محدود با قابلیت تحلیل غیرخطی، پژوهشگران بسیاری به تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی انواع مختلف مخازن زمینی و هوایی با در نظر گرفتن آثار اندرکنش آب و مخزن و همچنین خاک و مخزن توجه کرده‌اند.^[۱۵-۱۷] کلانی^۳ و همکاران، مطالعاتی در زمینه‌ی تحلیل دینامیکی مخازن هوایی آب با در نظر گرفتن اندرکنش آب و سازه

به روش لاگرانژی - لاگرانژی و اعمال اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی حرکت زمین به هنگام زلزله انجام دادند و با بررسی و مقایسه‌ی پاسخ لرزه‌یی مخازن با و بدون اعمال مؤلفه‌ی دورانی زلزله، دریافتند که مؤلفه‌های دورانی در شرایط خاص می‌توانند آثار قابل توجهی در پاسخ مخازن داشته باشند.^[۲۶،۲۷]

در گذشته، استفاده از روش جداسازی پایه در ساختمان‌ها و پل‌ها به‌طور گسترده بررسی شده است. انواع روش‌های طراحی مرتبط با جداسازی لرزه‌یی ساختمان‌ها توسط کلی^۴ (۱۹۹۷)، کاملاً تشریح شده است. با این حال مطالعات محدودی در خصوص ارزیابی رفتار لرزه‌یی مخازن جداسازی شده یافت می‌شود. کیم و لی (۱۹۹۵)،^[۲۸] با مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی مخازن مایع جداسازی شده به وسیله‌ی جداسازهای لاستیکی، کاهش قابل توجهی را در پاسخ دینامیکی مخازن مشاهده کرده‌اند. شنتون^۵ و هامپتون^۶ (۱۹۹۹)، نیز در بررسی پاسخ لرزه‌یی مخازن هوایی با استفاده از مدل گسسته‌ی سه درجه آزادی، از سیستم جداسازی کشسان خطی استفاده و دیواره‌های مخزن را صلب فرض کردند. علاوه بر این، عملکرد جداساز در جهت قائم را صلب در نظر گرفتند و نتایج مخزن جداسازی شده را با حالت بدون جداساز مقایسه کردند و دریافتند که جداسازی پایه، نقش مؤثری در کاهش پاسخ لرزه‌یی مخازن هوایی به‌خصوص در حجم‌های کوچک تر دارد.^[۳۰] شیرمالی^۷ و جانگید^۸ (۲۰۰۳)،^[۳۱] در بررسی رفتار لرزه‌یی مخازن هوایی جداسازی شده تحت تحریک واقعی زلزله با استفاده از یک مدل چهار درجه آزادی، سیال داخل مخزن را به‌صورت جرم‌های متمرکز مدل و عملکرد جداسازها را در جهت قائم صلب فرض کردند و کاهش قابل توجه پاسخ مخازن را نتیجه گرفتند. مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶)،^[۳۲] نیز مطالعاتی در خصوص به‌کارگیری جداساز هسته‌ی سربی در مخازن بتنی هوایی انجام دادند و با لحاظ جداساز در تراز اتصال پایه‌ی مخزن به فونداسیون و نیز در محل اتصال پایه به مخزن ذخیره و با اعمال شتاب افقی زلزله به بررسی پاسخ دینامیکی خطی مخازن هوایی بتنی پرداختند و دریافتند که استفاده از سیستم‌های کنترل فعال می‌تواند نقش بسزایی در کاهش پاسخ مخازن داشته باشد. علاوه بر این، تعداد و محل قرارگیری جداسازها نیز می‌تواند در پاسخ مخازن تأثیرگذار باشد.

مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تحلیل دینامیکی مخازن هوایی بتنی مجهز به جداساز پایه با در نظر گرفتن اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی حرکت زمین در زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک تاکنون بررسی نشده است. در نتیجه در پژوهش حاضر، ابتدا مؤلفه‌ی دورانی حرکت زمین با استفاده از مؤلفه‌های انتقالی ثبت شده برای زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک، با استفاده از قوانین کلاسیک تئوری کشسانی و تئوری انتشار امواج تولید شده است. سپس با اعمال هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله، تأثیر حضور جداساز پایه در پاسخ لرزه‌یی مخازن بتنی هوایی بررسی شده است. همچنین به‌منظور مدل‌سازی جداساز پایه، مدل معادل ساده‌شده‌یی براساس مدل سه‌بعدی پیشنهادی نوشتار مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶)،^[۳۲] ارائه شده است.

۲. روش پژوهش

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر جداساز پایه در رفتار لرزه‌یی مخازن بتنی هوایی دارای شافت مرکزی تحت تحریک هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌های حوزه‌های نزدیک و دور از گسل است. در بخش کنونی، روش پژوهش به تفصیل ارائه شده است. بدین منظور ابتدا روش استخراج مؤلفه‌ی دورانی زلزله از مؤلفه‌های انتقالی آن ارائه و سپس مدل مخزن، سیال و جداساز مطالعه معرفی شده است. از آنجایی که هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی اثر جداساز پایه در پاسخ مخازن

که در آن‌ها، $G = tg\bar{e} = w/u$ و $K = \alpha/\beta$ بوده و $\theta_C = \arcsin(\beta/\alpha)$ زاویه بحرانی موج حادث است. α و β نیز به ترتیب سرعت امواج طولی و برشی هستند. برای محاسبه تاریخی زمانی دورانی حرکت زمین، می‌توان رابطه ۲ را به شکل مختلط و به صورت رابطه ۵ بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \phi_{gy}(t) &= (i\omega/C_x)w = (\sqrt{e^{\frac{\pi}{4}i}})(\omega/C_x)(R_w \cdot e^{i\theta_w}) \\ &= ((\omega/C_x)R_w) (e^{(\frac{\pi}{4}+\theta_w)i}) \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن، R_w دامنه بسامدی مؤلفه قائم انتقالی و θ_w فاز موج در بسامد موردنظر هستند که از طیف محتوای بسامدی مؤلفه انتقالی w به دست می‌آیند. رابطه‌ی اخیر همچنین نشان می‌دهد که طیف مؤلفه دورانی، دامنه‌ی برابر با $(\omega/C_x)R_w$ دارد و اختلاف فاز آن‌ها با مؤلفه انتقالی w برابر $\pi/2$ است. بنابراین با استفاده از تبدیل فوریه گسسته، طیف دامنه و فاز بسامدی مؤلفه‌های انتقالی محاسبه و سپس مقدار G مربوط به هر بسامد تعیین می‌شود. با جای‌گذاری مقدار G در روابط ۳ و ۴ و حل آن‌ها، مقدار $x = \sin\theta$ و در نتیجه سرعت ظاهری امواج از رابطه $C_x = \beta/\sin\theta$ برای بسامد موردنظر محاسبه می‌شود. سپس از رابطه ۵، دامنه و فاز بسامدی مؤلفه دورانی حرکت زمین تعیین و در نهایت با تبدیل عکس فوریه، تاریخی زمانی مؤلفه ذکر شده به دست می‌آید.

۲.۲. مدل اجزاء محدود مخزن، سیال و جداساز لرزه‌ی

در پژوهش حاضر، مخازن در دو حجم متفاوت 500 و 1000 m³ در سه وضعیت خالی، نیمه‌پر و پر یک‌بار با جداساز و بار دیگر بدون جداساز پایه مدل‌سازی شده‌اند. برای مدل‌سازی اجزاء محدود مدل مورد مطالعه از نرم‌افزار انسیس^۹ (۲۰۱۲) استفاده شده است، که قابلیت مدل‌سازی سه‌بعدی مخزن و آب و لحاظ کردن آثار اندرکنش دینامیکی آن‌ها و نیز قابلیت مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح مخزن و جداساز را دارد. علاوه بر این می‌توان اعمال هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی شتاب زمین در مواقع زلزله را در تحلیل تاریخی زمانی آن لحاظ کرد. توضیحات مربوط به نحوه اعمال مؤلفه دورانی زلزله در نوشتار کلانی (۲۰۱۳)،^[۱۳] ارائه شده است. مشخصات مصالح، بتن، فولاد و آب در جدول ۱ و مشخصات هندسی مخازن بررسی شده در پژوهش حاضر در جدول ۲ ارائه شده است.

برای مدل‌سازی اجزاء محدود سازه و سیال از روش لاگرانژی استفاده شده است. به این منظور از المان FLUID8^۰ مینتی بر روش لاگرانژی برای مدل‌سازی آب و المان SOLID65^۵ برای مدل‌سازی بتن پایه‌ی مخزن و همچنین سخت‌کننده‌های زیرکف مخزن جهت جلوگیری از کماتش موضعی آن استفاده شده است. به منظور اعمال اندرکنش مخزن و آب، نقاط نظیر سازه و سیال در جهت نرمال با یکدیگر درگیر شده و در جهت مماس، مؤلفه‌های مستقل و آزادی حرکت داشته‌اند. در روش لاگرانژی، با انتخاب المان FLUID8^۰، آثار امواج سطحی به‌طور اتوماتیک در نظر گرفته می‌شود و نیازی به صفر کردن فشار بر روی سطح آزاد که در روش اویاری انجام می‌شود، نیست. مشخصات هندسی و مدل اجزاء محدود مخزن در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

به منظور مدل‌سازی جداساز هسته‌ی سربی، از مشخصات نمونه‌ی استوانه‌ی مطرح شده در نوشتار مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶)،^[۲۱] مطابق شکل ۳ استفاده شده است. مدل ایشان شامل دو صفحه‌ی فولادی در بالا و پایین، یاتاقان لاستیکی،

است. به منظور مدل‌سازی جداساز در پژوهش حاضر، مدل معادل ساده شده‌ی میله و فنر براساس مدل سه‌بعدی نوشتار مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶)،^[۲۱] ارائه و در تحلیل دینامیکی مخازن استفاده شده است. در انتها نیز روابط اجزاء محدود حاکم بر مسئله و روش حل آن معرفی شده است.

۱.۲. تولید مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین

در پژوهش حاضر، از روش توسعه‌یافته‌ی هانگ نان لی و همکاران (۲۰۰۴)،^[۱۲] برای تولید مؤلفه دورانی حرکت زمین استفاده شده است. برای این منظور از تابع پتانسیل حرکت موج SV که از مرکز کانونی زمین‌لرزه منتشر و به سمت سطح زمین حرکت می‌کند، برای تولید مؤلفه دورانی حرکت زمین در صفحه‌ی $x-z$ که به مؤلفه‌ی گهواره‌ی معروف است، استفاده شده است.^[۲۲] در شکل ۱، نحوه‌ی انتشار موج حادث SV با دامنه‌ی (A_S) و امواج بازتاب شده‌ی P و SV ناشی از آن در سطح زمین با دامنه‌های (A_{SP}) و (A_{SS}) و زاویه‌ی آن‌ها با محور z مشاهده می‌شود. همچنین مؤلفه‌های انتقالی u و w مؤلفه دورانی نظیر ϕ_{gy} ناشی از انتشار SV موج حادث در صفحه‌ی $y=0$ نیز در شکل مذکور مشاهده می‌شوند. شایان ذکر است که در شکل ۱، زاویه‌های موج حادث θ و موج بازتابیده شده SV، θ_1 با هم برابر و زاویه‌ی موج بازتابیده‌ی P برابر θ_1 است. با استفاده از تابع پتانسیل حرکت موج SV، شرط مرزی تنش برشی صفر در سطح زمین و نیز رابطه‌ی کلاسیک نظریه‌ی کشسانی بین چرخش و تغییرمکان (رابطه ۱)، مؤلفه دورانی حرکت به صورت رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$\phi_{gy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

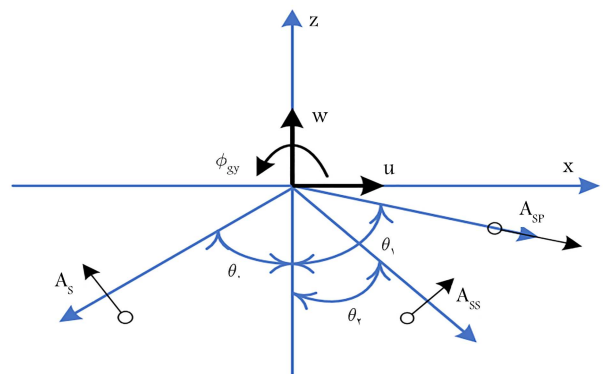
$$\phi_{gy} = \frac{i\omega}{C_x} w \quad (2)$$

که در آن، $C_x = \beta/\sin\theta$ سرعت ظاهری امواج، β سرعت امواج برشی و w سرعت زاویه‌ی حرکت موج هستند.

در روش توسعه‌یافته‌ی هانگ نان لی و همکاران (۲۰۰۴)،^[۱۲] با تغییر متغیر $x = \sin\theta$ ، از روابط ۳ و ۴ برای محاسبه‌ی زاویه‌ی موج حادث استفاده می‌شود:

$$G = \frac{2x\sqrt{1-K^2x^2}}{K(1-2x^2)}, \quad \theta < \theta_C \quad (3)$$

$$G = -\frac{2x\sqrt{K^2x^2-1}}{iK(1-2x^2)}, \quad \theta > \theta_C \quad (4)$$



شکل ۱. نحوه‌ی انتشار موج SV و امواج بازتابی ناشی از آن در سطح زمین.^[۱۲]

جدول ۱. مشخصات مصالح.

آب		فولاد		بتن سازه	
جرم حجمی (kg/m^3)	مدول بالک (N/m^2)	نسبت یواسون	جرم حجمی (kg/m^3)	مدول کشسانی (N/m^2)	نسبت یواسون
۱۰۰۰	$2/2 \times 10^9$	۰/۳	۷۸۰۰	2×10^{11}	۰/۲۷
					جرم حجمی (kg/m^3)
					مدول کشسانی (N/m^2)
					۲۴۰۰
					2×10^{10}

جدول ۲. مشخصات هندسی مخازن بر حسب متر (m).

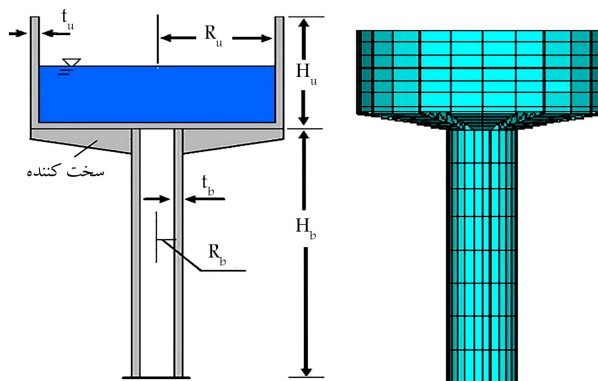
مخزن			پایه			حجم مخزن (m^3)
ضخامت جدار (t_u)	شعاع داخلی (R_u)	ارتفاع (H_u)	ضخامت جدار (t_b)	شعاع داخلی (R_b)	ارتفاع (H_b)	
۰/۵	۶	۵	۰/۵	۱	۳۰	۵۰۰
۰/۵	۷/۵	۵	۰/۵	۱	۳۰	۱۰۰۰

با وجود این، به کارگیری چنین مدل سه‌بعدی از جداساز در تحلیل دینامیکی مخازن مایعات، که خود شامل تعداد زیادی المان سازه و سیال است، از نظر محاسباتی مقرون به صرفه نیست. بنابراین در پژوهش حاضر، مدل میله‌ی دوگانه‌ی (LINK۱۸۰) برای مدل‌سازی رفتار لیزه‌ی جداساز پیشنهاد شده است. المان مذکور، خاصیت خمیری و قابلیت مدل‌سازی کرنش‌های بزرگ را دارد و توانایی مدل‌سازی رفتار برشی دستگاه‌های کنترل غیرفعال را نیز با دقت بالایی دارد. همچنین رفتار محوری (عمودی) جداساز با استفاده از یک المان فنر کشسان خطی دوگانه‌ی (COMBIN۱۴) شبیه‌سازی شده است. براساس مدل ساده شده‌ی پیشنهادی، فقط داشتن سختی قائم K_v برای مدل‌سازی رفتار محوری جداساز کافی است. با این حال سه پارامتر اصلی برای تعریف رفتار افقی جداساز لازم است، که شامل: مقاومت تسلیم Q_y ، سختی کشسان K_e و سختی خمیری K_p است. در نوشتار مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶)، [۳۲] مقادیر $K_v = 600 \text{ kN/mm}$ ، $K_p = 224 \text{ kN}$ ، $Q_y = 224 \text{ kN}$ ، $K_e = 17 \text{ kN/mm}$ و $k_e = 17 \text{ kN/mm}$ در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر با توجه به قطر پایه‌ی مخزن که ۳m و قطر جداساز که ۶۵۰mm است، به منظور رعایت فاصله بین جداسازها، ۸ عدد جداساز در تراز پایه در نظر گرفته شده است که جانمایی شماتیک آن مطابق شکل (۴الف) است. شکل شماتیک فنر و میله‌ی معادل هر جداساز نیز در شکل (۴ب) مشاهده می‌شود.

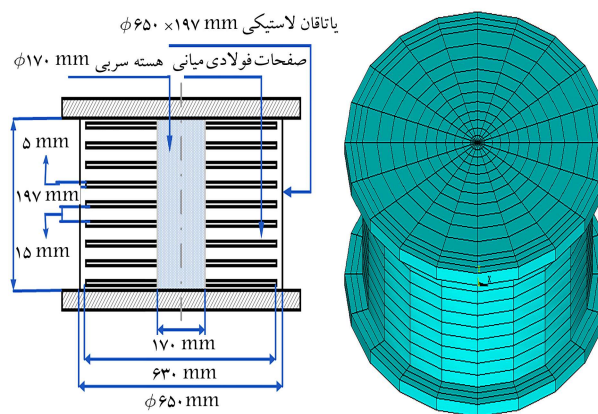
از آنجا که وزن مخازن با حجم ذخیره‌ی ۵۰۰ و 1000 m^3 در حالت پُر به ترتیب حدود ۹۵۰۰ و 18000 kN است و سختی کشسان هر فنر $K_v = 600 \text{ kN/mm}$ در نظر گرفته شده است، با تغییر مکان قائم حدود ۲/۵ و ۵mm در جداساز و فنر معادل، نیروی مقاوم موردنیاز جداساز تأمین می‌شود. با توجه به اینکه در فواصل بین ورق‌های فولادی میانی جداساز، صفحات لاستیکی انعطاف‌پذیر به ضخامت ۱۵mm وجود دارد، چنین تغییر شکل قائمی برای جداساز دور از انتظار نیست. به منظور تأمین سختی کشسان جانبی المان میله $k_e = 17 \text{ kN/mm}$ ، مساحت میله‌ی به‌کار رفته در مدل از رابطه‌ی $K_e = EA/L$ معادل 0.0785 m^2 ، طول میله برابر ۱m و مدول کشسانی میله و فنر نیز، $21/65 \text{ GPa}$ تعیین شده است.

۳.۲. روابط اجزاء محدود حاکم

در پژوهش حاضر از روش لاگرانژی - لاگرانژی برای تحلیل اندرکنش دینامیکی سیستم سازه - سیال به روش اجزاء محدود استفاده شده است. معادله‌ی تعادل

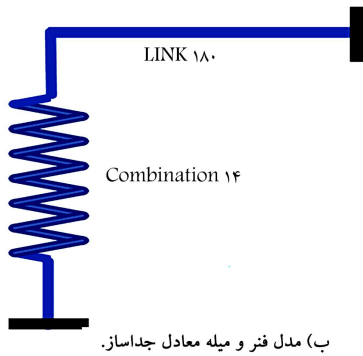


شکل ۲. مشخصات هندسی و نمونه‌ی مخزن مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اجزاء محدود و سخت‌کننده‌های کف آن.

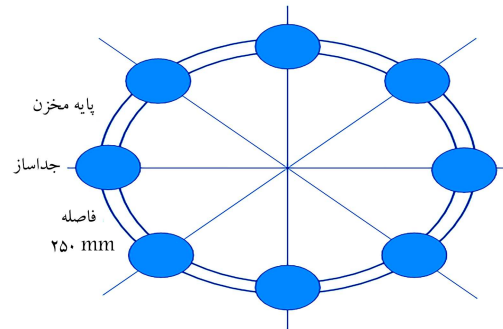


شکل ۳. مدل سه‌بعدی و مشخصات هندسی جداساز استفاده شده در نوشتار مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶). [۳۲]

صفحات فولادی میانی و هسته‌ی سربی بوده است. ایشان در پژوهش خود با مدل‌سازی سه‌بعدی جداساز در نرم‌افزار انسیس، اختصاص دادن رفتار غیرخطی برای مصالح جداساز و اعمال نیروی قائم و افقی بر صفحه‌ی فولادی بالای جداساز، رفتار جداساز مدل‌سازی شده را با نمونه‌ی آزمایشگاهی مقایسه کرده‌اند که با توجه به نتایج به‌دست آمده، تطابق مناسبی بین مدل‌های هندسی نوشتار مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶)، [۳۲] و نتیجه‌ی آزمایشگاهی مشاهده شده است.



ب) مدل فنر و میله معادل جداساز.



الف) شکل شماتیک جانمایی هشت جداساز در تراز پایه مخزن؛

شکل ۴. مدل هندسی جداسازهای پایه مورد استفاده در پژوهش حاضر.

است. هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی تأثیر مؤلفه‌ی دورانی زلزله در رفتار مخازن با حضور جداساز بوده است. اما از آنجایی که ماهیت مؤلفه‌ی دورانی همه‌ی زلزله‌ها مشابه نیست و به عوامل مختلفی، مانند: سرعت موج برشی، نسبت PGA مؤلفه‌های انتقالی و ... بستگی دارد، لذا پیش از شروع پژوهش حاضر، مطالعات گسترده‌ی جهت انتخاب زلزله‌های مناسب پژوهش حاضر انجام شده و از بین تعداد زیادی از شتاب‌نگاشت‌های بررسی شده، شتاب‌نگاشت‌هایی با مؤلفه‌ی دورانی قابل توجه که نیاز پژوهش حاضر را برآورده سازند، انتخاب شده‌اند. منظور از زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در پژوهش حاضر، شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در فاصله‌ی کمتر از 20 km از گسل فعال بوده است که به منظور ایجاد ارتعاش‌های پالس‌گونه، به وجود آثار جهت‌پذیری پیش‌رونده در تاریخچه‌ی زمانی سرعت آن‌ها توجه شده است. علاوه بر این، پارامترهای دیگری، مانند نسبت PGV به PGA ، سرعت مطلق تجمعی و ... نیز در انتخاب زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک مدنظر قرار گرفته است. جهت انتخاب صحیح زلزله‌ها با خصوصیات موردنظر، شتاب‌نگاشت‌های حوزه‌های دور و نزدیک ثبت شده در سایت peer^[۳۵] استفاده شده است.

به منظور تولید تاریخچه‌ی زمانی شتاب مؤلفه‌ی دورانی نظیر ۵ زلزله‌ی بررسی شده، مطابق تئوری گام به گام بخش ۲-۱ از پژوهش حاضر، روابط مطرح شده شامل دستورهای تبدیل فوریه، حل معادله‌های ۳ و ۴ و نیز تبدیل عکس فوریه در نرم‌افزار متلب^{۱۰} (۲۰۱۰) کدنویسی شده و مؤلفه‌ی دورانی حرکت زمین برای هر زوج انتقالی شتاب‌نگاشت به‌دست آمده است. جهت کنترل صحت کدنویسی و ارزیابی دقت مؤلفه‌ی دورانی تولید شده، نتایج ثبت شده توسط شتاب‌نگارهای دورانی S-5-S که توسط کلب^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۲)^[۳۴] در منطقه‌ی کاروینا از کشور چک نصب و راه‌اندازی شده است، با نتیجه‌ی متناظر به‌دست آمده از کد نوشته شده در پژوهش حاضر مقایسه شده است. در شکل‌های ۵ و ۶، به ترتیب تاریخچه‌ی زمانی مؤلفه‌ی دورانی و طیف محتوای بسامدی مؤلفه‌ی دورانی ثبت شده توسط شتاب‌نگار S-5-S و نتیجه‌ی به‌دست آمده در پژوهش حاضر مشاهده می‌شوند. ضریب همبستگی نتایج که در نرم‌افزار اکسل محاسبه شده است، برابر با 0.995 است و این مسئله نشان‌دهنده‌ی همبستگی مناسب بین نتایج و بنابراین تطابق قابل قبول رکوردهای تولیدشده با رکوردهای ثبت شده است. بیشترین مقادیر سرعت و شتاب دورانی ۵ زلزله‌ی بررسی شده و بسامد غالب مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

۲.۳. نتایج تحلیل مودال

نتایج مربوط به دوره‌ی تناوب دو مود اول ارتعاشی در تحلیل مودال مخازن با حجم

دینامیکی یک سیستم n درجه آزادی که تحت شتاب زمین قرار گرفته است، به صورت رابطه‌ی ۶ بیان می‌شود:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = P_{eff}(t) \quad (6)$$

که در آن، m ، c و k به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی، $\dot{u}(t)$ ، $\ddot{u}(t)$ و $u(t)$ به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و تغییرمکان نقاط گره‌ی شبکه‌ی اجزاء محدود و $P_{eff}(t) = -m\ddot{U}_g(t)$ بردار بار گره‌ی مؤثر ناشی از زلزله هستند. همچنین در رابطه‌ی اخیر، به بردار شتاب حرکت زمین شامل مؤلفه‌های انتقالی و دورانی و بردار تغییرمکان صلب درجه‌های آزادی سازه برای تغییرمکان واحد زمین است که در حالت حرکت یک‌نواخت شامل درایه‌های صفر و یک است. ماتریس جرم m استفاده شده در پژوهش حاضر، با وارد کردن چگالی به عنوان مشخصات مصالح در نرم‌افزار انسیس به صورت قطری و با روش هیستون در نظر گرفته شده است، ماتریس سختی k از مونتاژ ماتریس سختی المان‌ها به‌دست می‌آید و ماتریس میرایی c با استفاده از روش متناسب رایلی (رابطه‌ی ۷) محاسبه می‌شود:

$$c = \alpha m + \beta k \quad (7)$$

که در آن، α و β به ترتیب از روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند:

$$\beta = \frac{2(\xi_i \omega_i - \xi_j \omega_j)}{(\omega_i^2 - \omega_j^2)} \quad (8)$$

$$\alpha + \beta \omega_i^2 = 2\xi_i \xi_j \quad (9)$$

که در آن‌ها، ω_i ، ω_j ، ξ_i و ξ_j به ترتیب بسامد مودهای غالب اول و دوم و ضرایب میرایی مربوط به آن‌ها هستند. در پژوهش حاضر، برای حل معادله‌ی تعادل دینامیکی رابطه‌ی ۶، از روش شتاب ثابت نیومارک استفاده شده است.

۳. نتایج عددی و بحث

در بخش کنونی، ابتدا مشخصات شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در پژوهش حاضر ارائه و مؤلفه‌ی دورانی زلزله‌ها با توجه به روند بخش ۱.۲ تولید شده است. سپس نتایج عددی حاصل از تحلیل در قالب نتایج تحلیل مودال و دینامیکی ارائه شده‌اند.

۱.۳. مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین تحت اثر زلزله

برای تعیین پاسخ لرزه‌ی مخازن تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی شتاب زمین در هنگام زلزله، از ۵ شتاب‌نگاشت مختلف مطابق جدول ۳ استفاده شده

جدول ۳. مشخصات زلزله‌های استفاده شده در پژوهش حاضر.

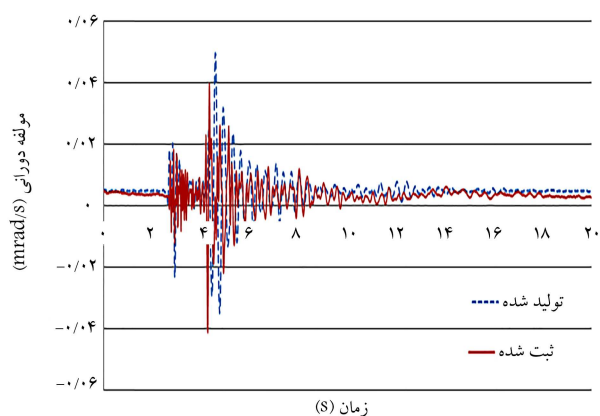
سرعت موج برشی (m/s)	PGA (g)	مولفه ثبت شده	فاصله مرکز سطحی (km)	ایستگاه	زلزله (زمان وقوع)
۲۱۳/۴	۰/۰۱۳ ۰/۰۲۹	قائم N - S	۲۸/۲۴	۱۱۷El Centro Array #۹	ال سنترو (۱۹۵۱/۰۱/۲۴)
۲۰۱۶/۱	۰/۷۰۹ ۱/۰۷۵	قائم SV۴W	۱۱/۸۶	Pacoma Dam	سن فرناندو (۱۹۷۱/۰۲/۰۹)
۳۸۵/۴	۰/۱۰۵ ۰/۱۷۹	قائم SE۹E	۳۵/۰۰	Lincoln School Tunnel	تفت (۱۹۵۲/۰۷/۲۱)
۳۳۸/۶	۰/۰۶۹ ۰/۱۰۹	قائم طولی	۷۴/۶۶	Boshrooyeh	طیس (۱۹۷۸/۰۹/۱۶)
۶۲۹/۰	۰/۴۲۴ ۰/۵۱۱	قائم طولی	۱۱/۷۹	OOOLA Dam	نورتریج (۱۹۹۴/۰۱/۱۷)

۵۰۰ و $۱۰۰۰ m^2$ در سه حالت پر، نیمه پر و خالی در جدول ۵ ارائه شده است. یکی از کاربردهای تحلیل مودال، محاسبه ضرایب میرایی رایلی جهت محاسبه ماتریس میرایی در تحلیل دینامیکی است. ضرایب میرایی رایلی برای حالت‌های مختلف مخازن محاسبه و در جدول ۵ ارائه شده است.

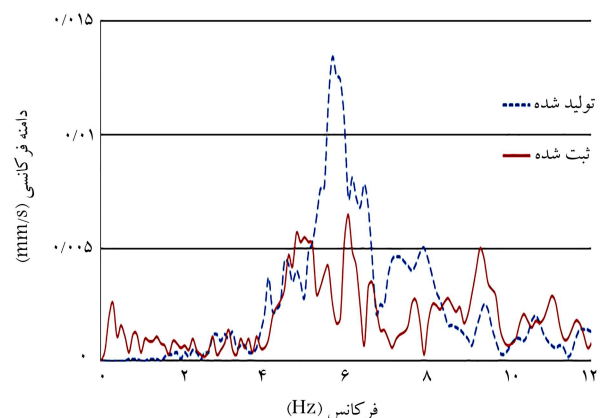
۳.۳. نتایج تحلیل دینامیکی

هدف بخش کنونی، بررسی اثر حضور جداساز پایه در تنش بلندشدگی (قائم) و برش پایه‌ی مخازن بتنی هوایی با شافت مرکزی است. بنابراین در بخش حاضر، ابتدا صحت رفتار مدل پیشنهادی جداساز لرزه‌ی، ارزیابی شده است. همان‌طور که در بخش ۲.۲ مطرح شد، از آنجایی که استفاده از مدل سه‌بعدی جداساز موجب افزایش حجم محاسبات در تحلیل دینامیکی مخازن می‌شود، برای مدل‌سازی جداساز پایه در پژوهش حاضر مدل معادل ساده شده‌ی براساس مدل سه‌بعدی مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶)^[۳۲] ارائه و استفاده شده است. همان‌طور که در (شکل ۴ب) مشاهده می‌شود، مدل مذکور متشکل از یک میله‌ی دوگره‌ی برای مدل‌سازی رفتار لرزه‌ی و یک المان فنرکشسان خطی دوگره‌ی جهت شبیه‌سازی رفتار محوری جداساز بوده است. به منظور کنترل صحت عملکرد مدل معادل جداساز استفاده شده در روند تحلیل دینامیکی پژوهش حاضر، منحنی هیستریزس مربوط به المان معادل میله و فنر در پژوهش حاضر ترسیم و با منحنی هیستریزس جداساز هسته سربی به‌کار رفته در نوشتار مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶)^[۳۲] مقایسه شده است (شکل ۷). در شکل (الف)، حلقه‌های هیستریزس مدل‌های هندسی نوشتار مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶)^[۳۲] و در شکل (ب)، نمودار هیستریزس مدل ارائه شده در پژوهش حاضر مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی نمودارها، نشان‌دهنده‌ی تطابق بسیار مناسب نتیجه‌ی مدل ساده‌ی ارائه شده در پژوهش حاضر با مدل سه‌بعدی نوشتار مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶)^[۳۲] است.

در ابتدای پژوهش حاضر، تحلیل غیرخطی مخازن جداسازی شده با در نظر



شکل ۵. تاریخچه‌ی زمانی سرعت دورانی ثبت شده توسط شتاب‌نگار S-5-S و تولید شده در پژوهش حاضر.



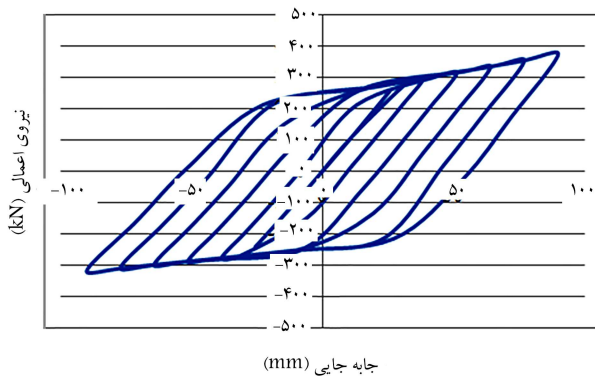
شکل ۶. طیف محتوای بسامدی سرعت دورانی ثبت شده توسط شتاب‌نگار S-5-S و تولید شده در پژوهش حاضر.

جدول ۴. بیشترین شتاب زاویه‌یی، سرعت زاویه‌یی و فرکانس غالب مولفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌ها.

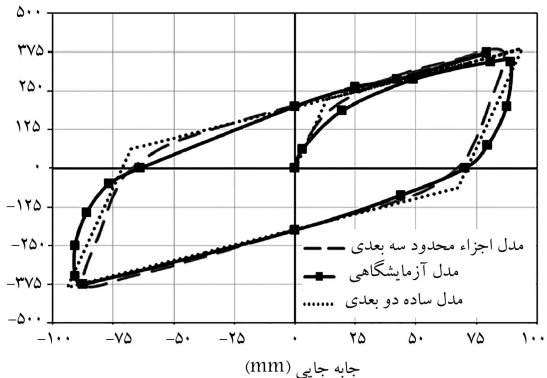
زلزله	ال سنتر	سن فرناندو	تفت	طبس	نورث ریج
$\dot{\phi}_{max}$	-۶/۱۷	-۵۷/۰۰	۱۵/۶۰	-۱۰۸/۵۰	۴۴۷/۴۰
$\dot{\phi}_{max}$	-۰/۰۳	۰/۳۷	-۰/۰۴	۰/۳۸	-۱/۲۲
فرکانس غالب	۴/۴۵	۴/۰۵	۲/۳۰	۰/۹۰	۱۰/۲۵
مولفه‌ی قائم	۲/۲۵	۴/۷۸	۴/۴۰	۷/۴۰	۰/۷۸
مولفه‌ی طولی	۱/۶۵	۲۲/۰۰	۱/۳۰	۰/۸۸	۱/۱۰
مولفه‌ی گهواره‌یی (Hz)					

جدول ۵. دوره تناوب دو مود اول ارتعاش و ضرایب میرایی رایلی.

دوره تناوب (ثانیه)						
مود	۵۰۰m ^۳ خالی	۱۰۰۰m ^۳ خالی	۵۰۰m ^۳ نیمه پر	۱۰۰۰m ^۳ نیمه پر	۵۰۰m ^۳ پر	۱۰۰۰m ^۳ پر
مود ۱	۱/۸۰۵	۲/۲۸۳	۲/۱۵۵	۲/۸۴۹	۲/۴۸۷	۳/۳۵۵
مود ۲	۰/۶۰۷	۱/۰۵۴	۰/۶۱۱	۰/۱/۰۶۱	۰/۶۱۱	۱/۰۶۱
α	۰/۲۶۰	۰/۱۸۸	۰/۲۲۷	۰/۱۶۱	۰/۲۰۳	۰/۱۴۲
β	۰/۰۰۷	۰/۰۱۱	۰/۰۰۷	۰/۰۱۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱۳



شکل ۶. منحنی هیستریزیس. (ب) المان میله و فنر در پژوهش حاضر.



شکل ۷. مدل های هندسی جداساز هسته سربیی؛ (الف) مدل اجزاء محدود سه بعدی

شکل ۷. منحنی هیستریزیس.

تحلیل صورت می‌پذیرد، در هر حالت، بیشترین تنش بلندشدگی و برش پایه‌ی مخزن محاسبه و ارزیابی شده است.

نتایج مربوط به بیشترین تنش بلندشدگی و برش پایه‌ی مربوط مخازن بتنی هوایی با حجم $500m^3$ به تفکیک در جدول‌های ۶ و ۷ و نتایج مشابه برای مخازن با حجم $1000m^3$ در جدول‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. در جدول‌های مذکور، ۲C نتایج مربوط به تحلیل تحت دو مؤلفه‌ی انتقالی و ۳C نتایج مربوط به تحلیل هم‌زمان تحت دو مؤلفه‌ی انتقالی و یک مؤلفه‌ی دورانی زلزله است. به‌منظور مشاهده‌ی شماتیک روند تغییرات تنش بلندشدگی و برش پایه‌ی مخازن با و بدون حضور جداساز، میانگین نتایج به‌دست‌آمده از حالت‌های مختلف برای مخازن با حجم ذخیره‌ی $500m^3$ و $1000m^3$ در قالب نمودارهای ستونی در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود.

همان‌طور که عنوان شد، برای تعمیم پاسخ، ۵ شتاب‌نگاشت استفاده شده شامل طیف گسترده‌یی از بسامدهای انتقالی، بزرگا، و نیز شرایط دوری یا نزدیکی از گسل بوده‌اند. برای جلوگیری از تأثیر خصوصیات مختلف زلزله‌ها و در نتیجه پراکندگی پاسخ‌ها در میانگین نتایج حاصل از حضور و عدم حضور جداساز، همان‌طور که در جدول‌های ۶ الی ۹ ارائه شده است، درصد اختلاف نتایج برای هر یک از حالت‌ها با مشخصات مشابه با استفاده فرمول ۱۰ محاسبه و در انتها نیز برای بیان نتیجه‌گیری

گرفتن رفتار غیرخطی مصالح مخزن، تحت تمام زلزله‌های انتخابی انجام و مشخص شده است که به دلیل اتلاف انرژی سیستم به واسطه‌ی حضور جداساز، رفتار مصالح خطی است و حضور جداساز، مانع از ورود مخازن به محدوده‌ی رفتار غیرخطی می‌شود. بنابراین به منظور مقایسه‌ی صحیح پاسخ مخازن در دو حالت با و بدون جداساز، رفتار مخازن در تمامی تحلیل‌ها خطی در نظر گرفته شده است. در نتیجه ۵ شتاب‌نگاشت استفاده شده مطابق جدول ۳، به‌گونه‌یی انتخاب شده‌اند که طیف گسترده‌یی از بسامدهای انتقالی، بزرگا و نیز شرایط دوری یا نزدیکی از گسل را شامل شوند، تا اثر همه‌ی موارد در رفتار جداساز در نظر گرفته شود. جهت بررسی اثر مؤلفه‌ی دورانی زلزله در پاسخ لرزه‌یی مخازن، نتایج تحلیل دینامیکی مخازن یک‌بار تحت اثر دو مؤلفه‌ی افقی و قائم (مؤلفه‌های انتقالی) و بار دیگر تحت اثر هم‌زمان دو مؤلفه‌ی انتقالی و یک مؤلفه‌ی دورانی زلزله‌ها انجام شده است. به منظور انجام یک مطالعه‌ی پارامتریک، مخازن با دو حجم ذخیره‌ی $500m^3$ و $1000m^3$ در سه حالت خالی، نیمه‌پر و پر بررسی و تحلیل شده‌اند. تمام تحلیل‌های ذکرشده، یک‌بار بدون حضور جداساز و بار دیگر با حضور جداساز پایه انجام شده است. در نتیجه، برای استخراج نتایج بخش کنونی، در مجموع ۱۲ تحلیل دینامیکی غیرخطی در حالت سه‌بعدی انجام و تاریخچه‌ی زمانی تنش بلندشدگی و برش پایه‌ی مخازن استخراج شده است. از آنجایی که همواره طراحی سازه‌ها براساس بیشترین پاسخ ناشی از

جدول ۶. بیشترین تنش بلندشدگی مخزن به حجم ذخیره‌ی $m^3 500$ با و بدون جداساز (برحسب N/m^2)

مدل	زلزله	۲C		۳C	
		بدون جداساز	باجداساز	بدون جداساز	باجداساز
مخزن خالی	السنتر	۱۱۴۰۶۵۰	۵۴۶۴۶/۸	۱۲۵۹۵۲۰	۷۲۶۴۲/۳
	طیس	۱۴۵۵۴۰۰	۱۷۸۶۸۵	۴۴۵۲۹۰۰	۳۷۰۶۱۱
	سن فرناندو	۳۷۴۴۶۵۰۰	۵۵۴۷۲۴۰	۳۷۰۹۵۰۰۰	۵۳۵۱۶۱۰
	نورث ریج	۳۲۵۱۳۷۰۰	۳۵۳۱۳۴۰	۲۴۵۳۴۱۰۰	۵۵۵۰۸۲۰
	تفت	۱۰۰۱۶۳۰۰	۱۰۲۵۸۴۰	۱۰۱۹۶۷۰۰	۶۷۸۸۶۸
مخزن نیمه‌پر	السنتر	۱۰۹۱۷۴۰	۷۹۹۱۰۵	۱۳۲۱۲۱۰	۷۹۹۱۹۳
	طیس	۱۲۴۱۷۲۰	۷۹۸۷۵۳	۳۹۰۴۴۰۰	۷۹۸۷۲۹
	سن فرناندو	۳۳۸۸۵۴۰۰	۵۶۱۷۱۵۰	۳۳۹۱۶۵۰۰	۵۴۳۷۷۰۰
	نورث ریج	۴۰۷۲۳۷۰۰	۳۴۶۲۹۱۰	۲۵۹۶۲۹۰۰	۶۰۹۰۸۴۰
	تفت	۸۴۳۹۴۴۰	۱۲۶۴۶۱۰	۹۳۳۴۷۴۰	۸۰۰۵۴۶
مخزن پر	السنتر	۱۴۱۹۰۳۰	۶۶۴۰۶/۶	۱۴۱۹۷۲۰	۶۷۰۵۱/۵
	طیس	۱۴۱۵۸۶۰	۱۹۳۸۹۲	۳۱۵۵۸۱۰	۴۹۰۱۱۲
	سن فرناندو	۲۹۸۴۶۱۰۰	۶۷۵۲۱۰۰	۲۷۸۲۶۰۰۰	۶۵۰۲۰۲۰
	نورث ریج	۴۳۰۵۸۱۰۰	۳۰۹۴۳۶۰	۳۴۲۲۷۹۰۰	۷۱۳۴۷۷۰
	تفت	۷۲۸۵۹۲۰	۱۰۸۰۰۴۰	۷۸۳۷۳۵۰	۷۹۰۵۷۶

جدول ۷. بیشترین برش پایه‌ی مخزن به حجم ذخیره‌ی $m^3 500$ با و بدون جداساز (برحسب N)

مدل	زلزله	۲C		۳C	
		بدون جداساز	باجداساز	بدون جداساز	باجداساز
مخزن خالی	السنتر	۹۶۰۵۴/۹	۷۵۸۹۴/۴۴	۱۰۸۹۲۱	۷۸۱۰۲/۸۶
	طیس	۱۸۷۹۱۵	۱۵۰۷۵۱/۲	۴۰۲۴۸۲	۱۵۹۶۹۹/۴
	سن فرناندو	۳۷۹۰۹۰۰	۱۵۵۴۵۵۳	۳۷۷۴۳۶۰	۱۵۳۰۱۳۰
	نورث ریج	۲۷۹۵۵۸۰	۷۷۳۰۰۹/۶	۲۱۰۳۵۲۰	۱۱۰۲۹۱۴
	تفت	۸۶۷۹۳۶	۳۸۷۴۲۶/۱	۹۱۱۴۳۶	۳۲۸۲۹۹/۲
مخزن نیمه‌پر	السنتر	۸۷۲۴۲/۸	۷۴۳۲۱/۹۴	۱۱۱۴۰۳	۷۶۵۱۰/۷۶
	طیس	۱۵۴۳۸۲	۱۳۰۱۷۹/۵	۳۳۱۴۰۸	۱۴۸۱۶۲/۷
	سن فرناندو	۳۲۳۲۴۸۰	۱۵۵۲۲۹۴	۳۲۹۱۰۷۰	۱۷۹۵۰۹۲
	نورث ریج	۳۴۶۲۰۶۰	۷۹۰۵۸۴/۴	۲۳۱۶۰۰۰	۱۱۳۶۱۶۰
	تفت	۷۸۷۱۰۰	۴۱۴۳۳۶/۲	۸۰۷۰۲۱	۳۴۳۴۲۰/۵
مخزن پر	السنتر	۹۴۴۰۲/۸	۷۶۵۸۶/۷۲	۹۶۶۸۹/۹	۷۸۹۱۹/۶۴
	طیس	۱۵۱۳۶۱	۱۱۵۰۸۲/۱	۲۶۰۳۰۹	۱۴۰۹۳۶/۳
	سن فرناندو	۲۳۳۹۵۴۰	۱۷۰۵۶۳۹	۲۳۱۷۹۱۰	۱۶۹۱۵۷۶
	نورث ریج	۳۴۴۷۹۷۰	۸۲۴۸۰۹	۲۸۴۷۸۳۰	۱۱۶۱۱۷۴
	تفت	۶۷۵۳۶۶	۴۱۷۵۲۶/۹	۷۱۶۶۷۴	۳۷۸۱۶۴/۹

جدول ۸. بیشترین تنش بلندشدگی مخزن به حجم ذخیره‌ی $1000 m^3$ با و بدون جداساز (برحسب N/m^2)

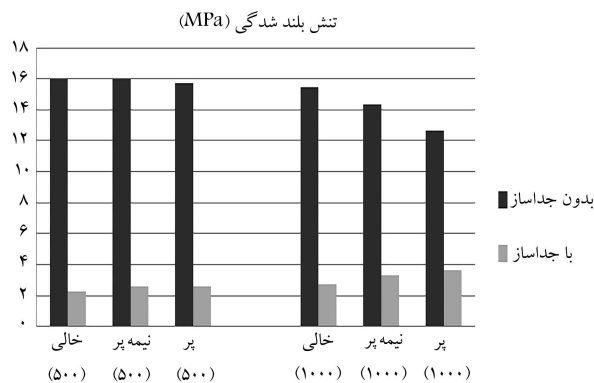
مدل	زلزله	۲C		۳C	
		بدون جداساز	باجداساز	بدون جداساز	باجداساز
مخزن خالی	السنتر	۱۰۰۸۷۹۰	۶۴۷۶۲/۴	۱۳۰۶۵۷۰	۶۷۱۴۲/۷
	طیس	۱۱۰۵۷۷۰	۱۲۱۲۰۴	۳۰۹۴۸۷۰	۴۳۳۲۴۲
	سن فراندو	۳۰۶۱۱۱۰	۷۰۷۵۲۵۰	۲۸۰۹۵۷۰	۶۸۷۷۴۷۰
	نورثریج	۴۲۸۶۶۲۰	۲۸۷۶۸۵۰	۳۱۵۳۵۱۰	۷۶۸۵۴۲۰
	تفت	۷۴۸۴۴۷۰	۱۰۴۲۲۶۰	۷۷۴۹۱۶۰	۶۹۶۹۱۳
مخزن نیمه‌پر	السنتر	۱۶۵۳۴۰۰	۱۱۳۲۶۸۰	۱۶۵۵۵۰۰	۱۱۳۲۹۳۰
	طیس	۱۶۴۸۱۴۰	۱۱۳۱۷۴۰	۲۸۶۴۸۳۰	۱۱۳۱۴۴۰
	سن فراندو	۳۰۸۲۶۶۰	۷۵۱۴۰۳۰	۲۸۲۴۷۸۰	۷۴۳۱۸۲۰
	نورثریج	۳۵۹۳۱۹۰	۳۰۰۴۰۰۰	۲۶۲۷۶۰۰	۸۱۷۳۵۳۰
	تفت	۷۴۱۱۹۱۰	۱۱۰۶۰۲۰	۷۱۴۲۳۱۰	۱۱۰۱۹۷۰
مخزن پر	السنتر	۲۲۹۱۹۳۰	۱۵۳۷۶۶۰	۲۲۹۴۲۳۰	۱۵۳۷۹۳۰
	طیس	۲۲۸۵۵۴۰	۱۵۳۶۵۲۰	۲۸۹۴۲۷۰	۱۵۳۶۱۴۰
	سن فراندو	۲۱۶۵۱۵۰	۸۱۱۹۲۷۰	۲۹۳۰۳۶۰	۷۹۳۶۹۹۰
	نورثریج	۲۱۲۶۶۶۰	۳۱۰۵۰۶۰	۲۸۷۸۲۷۰	۸۱۴۵۸۰
	تفت	۸۷۵۲۵۴۰	۱۴۸۷۹۹۰	۷۳۹۸۹۶۰	۱۴۸۷۴۹۰

جدول ۹. بیشترین برش پایه‌ی مخزن به حجم ذخیره‌ی $1000 m^3$ با و بدون جداساز (برحسب N)

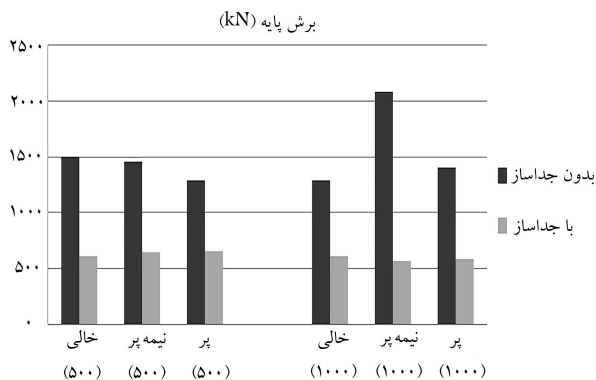
مدل	زلزله	۲C		۳C	
		بدون جداساز	باجداساز	بدون جداساز	باجداساز
مخزن خالی	السنتر	۹۰۵۵۷/۳	۶۷۴۸۷/۰۲	۱۰۷۵۴۶	۶۷۷۵۶/۲۹
	طیس	۱۹۶۸۷۴	۷۹۳۷۲/۲۸	۲۵۷۵۱۷	۱۱۵۳۰۷/۸
	سن فراندو	۲۶۰۰۳۴۰	۱۶۲۵۲۸۲	۲۴۶۳۴۷۰	۱۶۰۴۱۰۸
	نورثریج	۳۳۷۹۷۵۰	۷۶۲۰۲۱/۶	۲۴۹۶۷۹۰	۱۱۲۸۸۸۴
	تفت	۶۳۱۱۶۴	۳۴۹۲۳۹/۱	۶۴۳۴۵۸	۳۰۷۵۹۷/۶
مخزن نیمه‌پر	السنتر	۹۹۴۸۳/۲	۵۳۷۵۲/۵۱	۱۴۵۱۰۹	۵۴۲۲۲/۷
	طیس	۱۷۵۰۳۹	۶۱۹۱۸/۶۸	۲۳۹۴۴۴	۱۱۲۵۵۳
	سن فراندو	۳۲۳۷۵۰	۱۵۰۰۱۷۹	۲۹۹۲۴۳۰	۱۴۵۴۴۷۲
	نورثریج	۹۷۵۹۵۴۰	۷۴۵۲۴۱/۴	۲۷۰۵۰۹۰	۱۱۴۸۵۵۳
	تفت	۷۱۹۱۰۴	۳۱۰۳۳۴/۶	۷۹۲۸۶۳	۲۷۴۹۴۵/۲
مخزن پر	السنتر	۱۰۹۰۸۵	۶۳۱۵۶/۶۸	۱۰۳۳۱۶	۶۲۱۲۱/۸۹
	طیس	۲۰۳۸۸۳	۷۲۷۲۰/۳۶	۲۲۴۸۴۲	۱۰۸۴۰۹/۸
	سن فراندو	۳۵۷۴۳۵۰	۱۴۷۵۱۲۰	۳۴۲۲۴۳۰	۱۴۶۶۹۶۰
	نورثریج	۲۱۹۱۹۱۰	۵۹۹۶۸۷/۸	۲۴۵۰۱۹۰	۱۳۳۴۸۱۷
	تفت	۸۸۲۲۸۲	۳۲۷۰۷۲/۶	۸۸۱۱۳۱	۳۱۰۸۸۸/۶

و می‌تواند مقداری از انرژی وارده به سازه را جذب کند؛ در نتیجه، افزایش اثر میرایی ناشی از حضور آب در مخزن در دو حالت نیمه‌پر و پر به‌ویژه در مخازن بزرگ‌تر موجب تقویت عملکرد جداساز لرزه‌ی در کاهش برش پایه‌ی مخازن می‌شود.

به منظور ارزیابی دقیق‌تر اثر مؤلفه‌ی دورانی زلزله در نحوه‌ی عملکرد جداساز پایه در مخازن بتنی هوایی نتایج مربوط به تحلیل مخازن تحت تحریک مؤلفه‌های انتقالی (۲C) و اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌های حوزه‌های نزدیک و دور از گسل (۳C) به تفکیک بررسی شده است. برای مشاهده‌ی روند تغییرات اثر حضور جداساز در تنش بلندشدگی و برش پایه‌ی مخازن بتنی هوایی با و بدون اعمال مؤلفه‌ی دورانی زلزله، میانگین نتایج به‌دست آمده از حالت‌های مختلف برای زلزله‌های حوزه‌های نزدیک و دور از گسل در قالب نمودارهای ستونی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک بررسی شده، اعمال مؤلفه‌ی دورانی زلزله سبب کم شدن اثر کاهش جداساز پایه در تنش بلندشدگی و برش پایه‌ی مخازن در هر ۶ حالت ممکن (دو حجم و سه حالت مخزن) شده است. با افزایش شتاب زاویه‌ی مؤلفه‌ی دورانی زلزله، این اثر بسیار قابل توجه شده است، به طوری که تحلیل مخزن نیمه‌پر با حجم $1000 m^3$ تحت سه مؤلفه‌ی زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک نورتریج به ترتیب کاهش ۲۲ و ۳۴ درصدی اثر مثبت جداساز در تنش بلندشدگی و برش پایه‌ی مخازن را نشان داده است. آثار جهت‌پذیری پیش‌رونده در مؤلفه‌ی افقی زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و افزایش قابل توجه پالس ورودی در مدت زمان کم، موجب ورود سریع جداساز به فاز رفتار غیرخطی و اتلاف انرژی قابل توجه در سیستم و در نتیجه عملکرد مناسب جداساز در کاهش پاسخ مخازن می‌شود. اما به دلیل غیرهم‌فاز بودن مؤلفه‌ی دورانی زلزله با ترکیب مؤلفه‌های انتقالی در لحظات اولیه، که بیشینه‌ی شتاب انتقالی زلزله اتفاق می‌افتد، دامنه‌ی مؤلفه‌های دورانی و انتقالی خلاف جهت یکدیگر هستند و اضافه شدن مؤلفه‌ی دورانی در روند تحلیل، از آثار جهت‌پذیری پیش‌رونده در افزایش ناگهانی دامنه‌ی ورودی می‌کاهد. در نتیجه، اتلاف انرژی سیستم ناشی از شکل‌پذیری زیاد و ورود سریع جداساز به فاز غیرخطی کاهش می‌یابد و با افزایش شتاب زاویه‌ی مؤلفه‌ی دورانی زلزله، اثر کاهش جداساز پایه در پاسخ مخازن تضعیف خواهد شد. اما نزدیک بودن بسامد غالب مؤلفه‌های انتقالی و دورانی در زلزله‌های حوزه‌ی دور می‌تواند سبب ایجاد تشدید هم‌زمان شود و در نتیجه در بیشتر موارد، پاسخ سیستم تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌های حوزه‌ی دور افزایش می‌یابد. [۲۷-۲۵] بنابراین با اعمال هم‌زمان مؤلفه‌ی دورانی در زلزله‌های حوزه‌ی دور، احتمال ورود جداساز به فاز رفتار غیرخطی و به تبع آن اتلاف انرژی سیستم افزایش می‌یابد، که سبب می‌شود اثر مؤلفه‌ی دورانی زلزله‌های حوزه‌ی دور در عملکرد جداساز لرزه‌ی، کاملاً برعکس زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک شود. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان می‌دهد که اعمال هم‌زمان مؤلفه‌ی دورانی زلزله‌های حوزه‌ی دور بررسی شده، سبب بهبود اثر کاهش جداساز پایه در تنش بلندشدگی و برش پایه‌ی مخازن در بیشتر حالت‌ها شده است. بدیهی است که این اثر با افزایش شتاب مؤلفه‌ی دورانی زلزله تشدید خواهد شد، به طوری که تحلیل مخزن نیمه‌پر با حجم $500 m^3$ تحت ۳ مؤلفه‌ی زلزله‌ی حوزه‌ی دور طیس به ترتیب موجب افزایش ۴۴ و ۴۰ درصدی اثر مثبت جداساز در تنش بلندشدگی و برش پایه‌ی مخزن شده است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که عدم اعمال مؤلفه‌ی دورانی زلزله در تحلیل مخازن هوایی واقع در نواحی نزدیک گسل، موجب بزرگ‌نمایی اثر کاهش جداساز پایه در نتایج تحلیل لرزه‌ی و در نتیجه طراحی ضعیف مخازن خواهد شد. بنابراین با توجه به هزینه‌های زیاد استفاده از جداساز و کاهش اثر آن در نواحی نزدیک گسل، استفاده از جداساز در نواحی نزدیک گسل توصیه نمی‌شود. در حالی که در



شکل ۸. میانگین بیشترین تنش بلندشدگی مخازن بتنی هوایی.



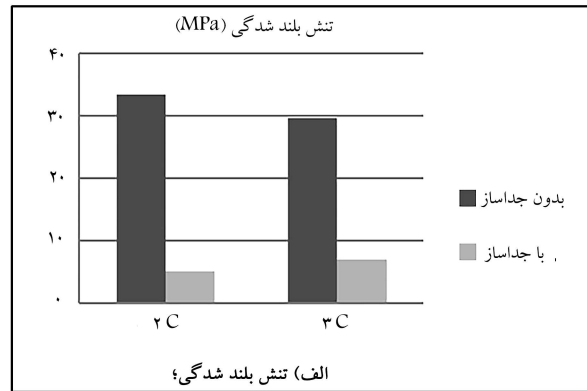
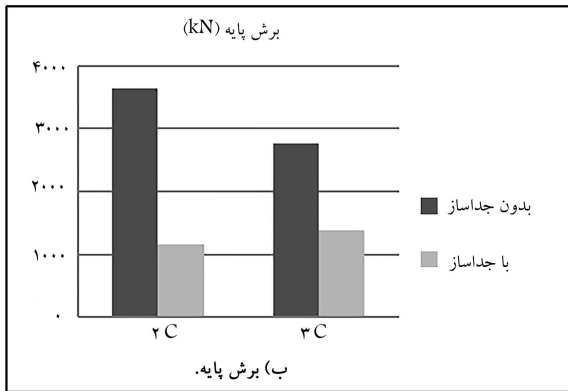
شکل ۹. میانگین بیشترین برش پایه‌ی مخازن بتنی هوایی.

کللی از اختلاف‌های بدون بعد مذکور، میانگین‌گیری شده است:

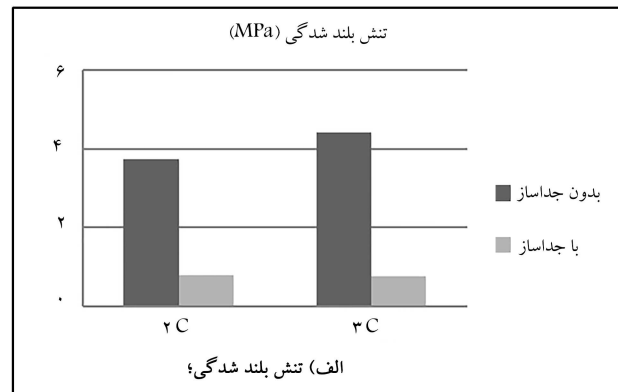
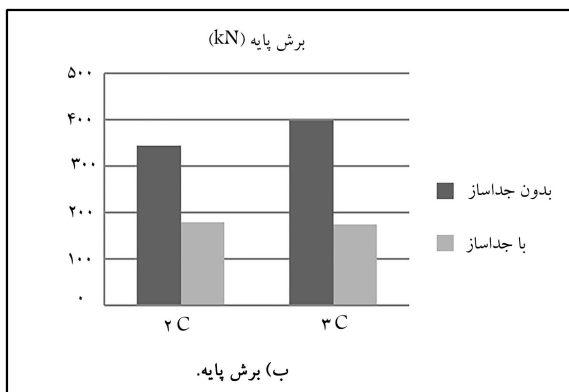
$$\Delta\% = \left(\frac{\text{نتیجه بدون حضور جداساز} - \text{نتیجه با حضور جداساز}}{\text{نتیجه بدون حضور جداساز}} \right) \times 100 \quad (10)$$

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی مخازن بتنی هوایی تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله با و بدون جداساز، این نتیجه حاصل شده است که حضور جداساز در همه‌ی حالت‌ها موجب کاهش قابل توجه تنش بلندشدگی مخازن شده است. به طور میانگین حضور جداساز در مخزن به حجم $500 m^3$ ، در حالت خالی ۸۹٪ در حالت نیمه‌پر ۶۹٪ و در حالت پر ۸۶٪ کاهش پاسخ را به همراه داشته است. همچنین این روند کاهش در مخزن به حجم $1000 m^3$ در حالت خالی ۸۶٪ در حالت نیمه‌پر ۶۳٪ و در حالت پر ۶۰٪ بوده است. بنابراین با افزایش حجم مخزن از 500 به $1000 m^3$ اثر حضور جداساز به‌ویژه در حالت مخزن پر کاهش یافته است. این اثر که به وضوح در شکل ۸ نیز قابل مشاهده است، می‌تواند به دلیل وزن بیشتر مخازن بزرگ‌تر در حالت پر و ایجاد مقاومت در برابر حرکت جانبی جداساز ایجاد شود.

در گام بعد، اثر حضور جداساز در برش پایه‌ی مخازن ارزیابی شده است. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی مخازن نشان می‌دهد که وجود جداساز پایه در تمامی حالت‌های بررسی شده، اثر کاهنده در برش پایه‌ی مخازن هوایی داشته است، که به ترتیب برای حالت مخزن خالی، نیمه‌پر، و پر در مخزن به حجم $500 m^3$ ، ۴۹٪، ۴۵٪ و ۳۸٪ و در مخزن به حجم $1000 m^3$ ، ۴۸٪، ۶۰٪ و ۵۶٪ بوده است. همان‌طور که در شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود، افزایش حجم مخزن از 500 به $1000 m^3$ موجب افزایش اثر جداساز در کاهش برش پایه‌ی مخزن در حالت نیمه‌پر و پر شده است. آب درون مخزن، همانند میراگر تنظیم‌کننده‌ی جرمی عمل می‌کند



شکل ۱۰. اثر مؤلفه‌ی دورانی زلزله‌های حوزی نزدیک بررسی شده در دو حالت با و بدون جداساز.



شکل ۱۱. اثر مؤلفه‌ی دورانی زلزله‌های حوزی دور بررسی شده در دو حالت با و بدون جداساز.

(۲۰۱۶)^[۳۲] ارائه و صحت عملکرد آن ارزیابی شده است. مقایسه‌ی حلقه‌های هیستریزس دو مدل اخیر، نشان‌دهنده‌ی تطابق بسیار مناسب نتیجه‌ی مدل ساده‌ی ارائه‌شده در پژوهش حاضر با مدل سه‌بعدی است.

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی مخازن بتنی هوایی تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله نشان می‌دهد وجود جداساز پایه در تمامی حالت‌های بررسی شده، اثر کاهنده در تنش بلندشدگی مخازن هوایی دارد. با افزایش حجم مخزن به‌ویژه در حالت مخزن پر، اثر حضور جداساز در کاهش تنش بلندشدگی مخازن کمتر شده است که می‌تواند به‌دلیل افزایش بار ترقلی و ایجاد مقاومت در برابر حرکت جانبی جداساز باشد.

همچنین حضور جداساز در همه‌ی حالت‌های بررسی‌شده، موجب کاهش قابل‌توجه برش پایه‌ی مخازن هوایی شده است. افزایش میرایی ناشی از حضور سیال در دو حالت نیمه‌پر و پر به‌ویژه در مخازن بزرگ‌تر، نیز سبب بهبود عملکرد جداساز لرزه‌یی در کاهش برش پایه‌ی مخازن هوایی شده است.

اثر مؤلفه‌ی دورانی زلزله در عملکرد جداساز پایه در مخازن بتنی هوایی در مناطق دور و نزدیک گسل به‌طور دقیق‌تر ارزیابی شد و نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که اعمال مؤلفه‌ی دورانی زلزله در تحلیل مخازن هوایی واقع در نواحی دور از گسل، سبب بهبود عملکرد جداساز پایه در کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی مخازن شده است. در نواحی نزدیک گسل، روند برعکس بوده و با افزایش شتاب زاویه‌یی مؤلفه دورانی زلزله، اثر کاهشی جداساز پایه در تنش بلندشدگی و برش پایه‌ی مخازن تضعیف شده است.

نواحی دور از گسل، عدم اعمال مؤلفه‌ی دورانی زلزله در روند تحلیل مخزن، اثر مثبت جداساز در کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی را تضعیف می‌کند و موجب یک طراحی غیر اقتصادی برای مخازن هوایی خواهد شد.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر حضور جداساز پایه در پاسخ لرزه‌یی مخازن بتنی هوایی با شافت مرکزی تحت تحریک هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌های حوزی نزدیک و دور از گسل با استفاده از تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی بررسی شده است. برای تعیین پاسخ لرزه‌یی مخازن ۵ شتاب‌نگاشت مختلف زلزله با شرایط دوری یا نزدیکی از گسل استفاده شده است. سپس با استفاده از هم‌زمان از روابط کلاسیک تئوری کشسانی و تئوری انتشار امواج و با در نظر گرفتن سرعت امواج وابسته به بسامد^[۱۲] و کدنویسی در نرم‌افزار متلب (۲۰۱۰)، مؤلفه‌ی دورانی حرکت زمین برای هر زوج انتقالی شتاب‌نگاشت تولید شده است. جهت انجام یک مطالعه‌ی پارامتریک، مخازن با دو حجم ذخیره‌ی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ m^۳ در سه وضعیت خالی، نیمه‌پر، و پر، یکبار بدون حضور جداساز و بار دیگر با حضور جداساز پایه در نرم‌افزار انسیس (۲۰۱۲) مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. خلاصه‌ی نتایج به‌دست‌آمده به این شرح است:

برای مدل‌سازی جداساز پایه در پژوهش حاضر، مدل معادل میله و فنر ساده‌شده‌ی با توجه به وزن و ابعاد مقطع پایه، براساس مدل سه‌بعدی مسلمی و کیانوش

سازه شده است. همچنین به دلیل هزینه‌ی بالای جداسازی پایه و کاهش اثر آن با افزایش شتاب زاویه‌ی مؤلفه‌ی دورانی، به نظر می‌رسد استفاده از آن در نواحی نزدیک گسل توجیه اقتصادی نخواهد داشت.

-- با توجه به نتایج حاصل از بررسی اثر مؤلفه‌ی دورانی زلزله در عملکرد جداساز، عدم اعمال مؤلفه‌ی دورانی در تحلیل مخازن هوایی واقع در نواحی نزدیک گسل، موجب بزرگ‌نمایی اثر کاهش جداساز پایه در نتایج و در نتیجه طراحی ضعیف

پانوشته‌ها

1. Geodetic
2. Dogangun
3. Kalani
4. Kelly
5. Shenton
6. Hampton
7. Shirmali
8. Jangid
9. ANSYS
10. MATLAB
11. Kalab

منابع (References)

1. Guideline for Design and Practice of Base Isolation Systems in Buildings, No. 523, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, Islamic Republic of Iran (in Persian) (2010).
2. Naeim, F. "Design of seismic isolated structures: from theory to practice", John Wiley & Sons (1999).
3. Newmark, N.M. "Torsion in symmetrical buildings", *Proceeding of the 4th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, A3, pp. 19-23 (1969).
4. Ghafory-Ashtiani, M. and Singh, M.P. "Structural response for six correlated earthquake components", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**(1), pp. 103-119 (1986).
5. Huang, B.S. "Ground rotational motions of the 1999 Chi Chi, Taiwan earthquake as inferred from dense array observations", *Geophysical Research Letters*, **30**(6), pp. 1307-1310 (2003).
6. Ghayamghamian, M.R. and Nouri, G.R. "On the characteristics of ground motion rotational components using Chiba dense array data", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **36**(10), pp. 1407-1442 (2007).
7. Spudich, P., Steck, L.K., Hellweg, M. and et al. "Transient stresses at Parkfield, California, produced by the M 7.4 Landers earthquake of June 28, 1992: Observations from the UPSAR dense seismograph array", *Journal of Geophysical Research*, **100**(B1), pp. 675-690 (1995).
8. Ghayamghamian, M.R., Nouri, G.H.R. and Hashemifard, M. "A comparison among different methods in the evaluation of torsional ground motion", *Journal of Iran Geophysics*, **4**(2), pp. 32-44 (2010).
9. Trifunac, M.D. "A note on rotational components of earthquake motions on ground surface for incident body waves", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **1**(1), pp. 11-19 (1982).
10. Lee, V.W. and Trifunac, M.D. "Rocking strong earthquake accelerations", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **6**(2), pp. 75-89 (1987).
11. Lee, V.W. and Liang, L. "Rotational components of strong motion earthquakes", *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China (2008).
12. Li, H.N., Sun, L.Y. and Wang, S.Y., "Improved approach for obtaining rotational components of seismic motion", *Nuclear Engineering and Design*, **232**(2), pp. 131-137 (2004).
13. Housner, G.W. "Dynamic pressure on accelerated fluid containers", *Bulletin of the seismological society of America*, **47**(1), pp. 15-35 (1963).
14. Dogangun, A. and Livaoglu, R. "A comparative study of the seismic analysis of rectangular tanks according to different codes", *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China (2008).
15. Dutta, S.C. "Seismic torsional behaviour of elevated tanks for improved code provisions: elastic behaviour", *Journal of the Institution of Engineers, India, Civil Engineering Division*, **80**(FEV), pp. 169-181 (2000).
16. Clough, R.W., Clough, D.P. and Niwa, A. "Experimental seismic study of cylindrical tanks", *Journal of the Structural Division*, **105**(12), pp. 2565-2590 (1979).
17. Omidinasab, F. and Shakib, H. "Seismic response evaluation of the RC elevated water tank with fluid-structure interaction and earthquake ensemble", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **16**(3), pp. 366-376 (2012).
18. Kazemi, T. and Turang, Z. "Study on seismic performance of elevated concrete tanks with cylindrical base and moment frame", 4th National Congress of Civil Engineering, Tehran University (in Persian) (2008).
19. Shakib, H., Omidinasab, F. and Ahmadi, M.T. "Seismic demand evaluation of elevated reinforced concrete water tanks", *International Journal of Civil Engineering*, **8**(3), pp. 204-220 (2010).
20. Jabar, A.M. and Patel, H.S. "Seismic behaviour of RC elevated water tank under different staging pattern and earthquake characteristics", *International journal of advanced Engineering Research and Studies (IAERS)*, ISSN: 2249-8974, **1**, pp. 293-296 (2012).
21. Khoubani, M., Hashemi, Sh. and Alipour, A. "Dynamic analysis of concrete rectangular tanks considering the effect of soil-structure-fluid interaction", *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, **5**(1), pp. 189-209 (2018).

22. Lakhade, S.O. and Kumar, R. "Damage states of yielding and collapse for elevated water tanks supported on RC frame staging", *Structural Engineering and Mechanics*, **67**(6), pp. 587-601 (2018).
23. Masoudi, M., Eshghi, S. and Ghafory-Ashtiany, M. "Evaluation of response modification factor (R) of elevated concrete tanks", *Engineering Structures*, **39**, pp. 199-209 (2012).
24. Asgari, M.H., Khodakarami, M.I. and Vahdani, R. "The effect of topographic irregularities on seismic response of the concrete rectangular liquid storage tanks incorporating soil-structure-liquid interaction", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **33**, pp. 1-19 (2019).
25. Kalani Sarokolayi, L. and Navayi Neya, B., "Evaluation of modification factor for concrete cylindrical tanks using pushover analysis", *Journal of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad*, **23**(2), pp. 53-70 (in Persian) (2012).
26. Kalani Sarokolayi, L., Navayi Neya, B., Tavakoli, H.R. and et al. "Dynamic analysis of elevated water storage Tanks due to Ground Motions' Rotational translational components", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **39**, pp. 4391-4403 (2014).
27. Kalani Sarokolayi, L., Navayi Neya, B., Vaseghi Amiri, J. and et al. "Seismic analysis of elevated water storage tanks subjected to six correlated ground motion components", ISSN: 2079-2115 (2013).
28. Kelly, J.M. "Earthquake-resistant design with rubber", London, Springer-Verlag (1997).
29. Kim, N.S. and Lee, D.G. "Pseudo-dynamic test for evaluation of seismic performance of base-isolated liquid storage tanks", *Engineering Structures*, **17**(3), pp. 198-208 (1995).
30. Shenton, III H.W. and Hampton F.P. "Seismic response of isolated elevated water tanks", *ASCE Journal of Structural Engineering*, **125**(9), pp. 965-976 (1999).
31. Shirmali M.K. and Jangid, R.S. "The seismic response of elevated liquid storage tanks isolated by lead-rubber bearings", *Bull. NZ Soc. Earthquake Eng*, pp. 41-64 (2003).
32. Moslemi, M. and Kianoush, M.R. "Application of seismic isolation technique to partially filled conical elevated tanks", *Engineering Structures*, **127**, pp. 663-675 (2016).
33. Kalani Sarokolayi, L. "Nonlinear dynamic analysis of concrete gravity dams under spatially varying and rotational earthquake", Phd thesis, Babol Noshirvani University of Technology (in Persian) (2013).
34. Kalab, Z. and Knejzlik, J. "Examples of rotational component records of mining induced seismic events from the Karvina region", *ACTA Geodynamica and Geomaterialia*, **9**(2), pp. 173-178 (2012).
35. Pacific Earthquake Engineering Research Center., <https://peer.berkeley.edu>.