

پاسخ لرزه‌ای مخازن مستطیلی و استوانه‌ای بتنی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور

فرید امید تبریزی

کارشناسی ارشد مهندسی سازه، مرکز تحقیقات سازه و زلزله دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
farbodomid@aut.ac.ir

فرزاد حاتمی برق

استادیار مرکز تحقیقات سازه و زلزله دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
hatami@aut.ac.ir

چکیده

این مقاله رفتار لرزه‌ای مخازن مستطیلی و استوانه‌ای نگهداری مایعات تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور را مورد مطالعه قرار داده است. به منظور مقایسه پاسخ لرزه‌ای مخازن با دو شکل استوانه‌ای و مستطیلی، ابعاد مخازن مورد مطالعه در پلان به گونه‌ای انتخاب شده است که با ثابت بودن ارتفاع سیال ذخیره شده، حجم آب ذخیره شده درون آن‌ها تقریباً برابر باشد. دو رکورد زلزله حوزه نزدیک و سه رکورد زلزله حوزه دور با مشخصات فرکانسی مختلف به هر یک از مخازن وارد شده و پاسخ نوسانات سطحی سیال، فشار و فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده بر دیوار مخازن مورد مطالعه قرار گرفته است. از دیگر پاسخ‌های مورد مطالعه می‌توان به محل بحرانی پاسخ‌های مذکور در مخازن اشاره کرد. به منظور مدل‌سازی مخزن و سیال از روش المان محدود با فرمول‌بندی **ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian)** به کمک نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. دقت روش مدل‌سازی مذکور با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی مخازن در مطالعات گذشته مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده به خوبی نشان داده که شکل هندسی مخزن و مشخصات زلزله می‌تواند اثر قابل توجهی بر پاسخ لرزه‌ای مخازن بگذارد.

واژه‌های کلیدی: مخازن مستطیلی، مخازن استوانه‌ای، زلزله‌ی حوزه نزدیک، زلزله‌ی حوزه دور، نوسانات سطحی سیال، فشار دیوار مخازن، فشار هیدرودینامیک، روش ALE.

Seismic response of rectangular and cylindrical concrete tanks under near-fault and far-fault ground motions

Farbod Omidtabrizi, Farzad Hatami Bargh *

ABSTRACT

This paper studies the seismic behavior of rectangular and cylindrical tanks under near-fault and far-fault ground motions. To compare the seismic response of these tanks, the plan dimensions of them are chosen in such a way that the volume of liquid stored in the tanks remains virtually constant at the same liquid heights. Two near-fault and three far-fault ground motions with different frequency content are applied to the tanks. The sloshing, wall pressure, and hydrodynamic pressure responses of these tanks were discussed. The critical locations of the mentioned responses are also studied. ALE-based finite element method is employed using ABAQUS software to model the liquid-tank system. The accuracy of this modeling technique is evaluated using some experimental results available in the literature. The results indicate that the tank's shape and earthquake characteristics significantly affect the seismic response of liquid storage tanks.

KEYWORDS

Rectangular tanks, Cylindrical tanks, Near-fault ground motions, far-fault ground motions, Sloshing, Wall pressure, Hydrodynamic pressure, ALE approach.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۱

تاریخ آخرین اصلاحات: ۱۴۰۱/۰۳/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۹

۱- مقدمه

در گذشته مطالعات بسیاری بر روی پاسخ این بخش از سیال انجام گرفته است. از جمله آن‌ها می‌توان به شاهوردیانی و همکارانش اشاره کرد که پاسخ اسلاشینگ، نوسانات سطحی سیال، در مخازن بتنی را تحت مولفه‌های افقی و قائم زلزله به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند {۷}. آن‌ها به منظور مدل‌سازی سیال و مخزن از روش اجزای محدود و نرم‌افزار انسیس استفاده کرده و در بخش آزمایشگاهی، با ساخت مخزنی از جنس پلی‌اتیلن سبک و به صورت مقیاس شده نه تنها رفتار مخازن و سیال را مورد مطالعه قرار دادند، بلکه اثر انعطاف‌پذیری دیوار مخزن را نیز در مطالعات خود مورد بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که مولفه قائم زلزله اثر چندانی بر افزایش پاسخ بخش موج ندارد. شیرمال و همکارانش از دیگر محققانی بودند که به بررسی اثر مولفه قائم زلزله بر پاسخ مخازن پرداختند {۸}. اگرچه این مطالعات نشان داد که پاسخ تاریخیچه زمانی اسلاشینگ در مخازن می‌تواند متاثر از نیروی قائم زلزله باشد، اما اعمال مولفه قائم زلزله باعث ایجاد تغییر چندانی در ماکسیمم این پاسخ‌ها نمی‌شود.

مطالعات گذشته به وضوح نشان داده که در صورتی که یک سازه تحت زلزله حوزه نزدیک قرار گیرد پاسخ‌های لرزه‌ای آن می‌تواند به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. در مورد مخازن نیز، مطالعات بسیاری بر روی مخازن قرار گرفته تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور صورت گرفته است. از جمله این مطالعات می‌توان به تازی نژاد و حسین جانی اشاره کرد {۹}. مطالعات صورت گرفته به وسیله آن‌ها بر روی یک مخزن استوانه‌ای فولادی تحت مولفه‌های افقی زلزله‌های حوزه نزدیک و دور بوده است. نتایج به دست آمده از مطالعات آن‌ها نشان داده که اثر در نظر گرفتن تعداد جهات زلزله در مطالعه رفتار لرزه‌ای مخازن می‌تواند به صورت قابل توجهی متاثر از فاصله مخزن از کانون زلزله باشد. به صورتی که برای مثال تفاوت اعمال زلزله دو جهته با یک جهته بر مخازن تحت زلزله حوزه نزدیک می‌تواند پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن را تا دو برابر نسبت به زلزله‌های حوزه دور افزایش دهد. پیر سلطان و همکارانش از دیگر محققانی بودند که پاسخ نوسانات سطحی مخازن را تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور مورد مطالعه قرار دادند {۱۰}. آن‌ها در مطالعات خود از ۹ تیپ مخزن بتنی مستطیلی به صورت دو بعدی با ابعاد و ارتفاع آب ذخیره شده مختلف استفاده کردند. مطالعات آن‌ها نشان داده که حداکثر پاسخ نوسانات سطحی سیال در این مخازن زمانی که تحت زلزله‌های حوزه نزدیک قرار می‌گیرد می‌تواند تا دو برابر افزایش یابد.

مطالعات صورت گرفته بر روی رفتار مخازن را می‌توان به طور کلی به سه دسته مطالعات تحلیلی، عددی، و آزمایشگاهی تقسیم‌بندی کرد. در بین سه رویکرد مذکور پاسخ‌های بدست آمده از روش آزمایشگاهی اگرچه به جواب واقعی نزدیک‌تر است، علاوه بر مشکل مقیاس گذاری، به دلیل نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی می‌تواند بسیار پر هزینه باشد. روش تحلیلی نیز نیاز به ساده‌سازی‌های بسیار زیادی دارد که می‌تواند مانع از بدست آوردن پاسخ‌های واقعی مخزن شود. از سوی دیگر روش‌های تحلیلی به هندسه‌های ساده و رفتارهای خطی محدود می‌شوند که به خصوص در مورد رفتار غیر خطی سیال، استفاده از آن

مخازن ذخیره مایعات همواره جزو شریان‌های اصلی هر کشوری به حساب می‌آیند. علاوه بر اهمیت آن‌ها در شبکه آبرسانی، از این مخازن به منظور ذخیره‌سازی مواد پتروشیمی و پالایشگاهی، سوخت هسته‌ای و بسیاری مواد دیگر استفاده می‌شود. در نتیجه هرگونه آسیب به این مخازن می‌تواند موجب خسارات جبران ناپذیری گردد. این خسارات می‌تواند شامل آتش‌سوزی، انفجار، نشت مواد سمی و آلودگی زیست محیطی باشد. بلایای طبیعی مانند زلزله در طول تاریخ نشان داده‌اند که می‌توانند آسیب‌های مخربی به این مخازن وارد کنند. از کماتش دیوار مخازن در مخازن فولادی تا تخریب سقف و دیوار مخازن بتنی از جمله آسیب‌هایی بوده‌اند که پس از زلزله در این مخازن دیده شده است. گزارش‌های منتشر شده بعد از زلزله امپریال کانتری (۱۹۷۹) و نورتریج (۱۹۹۴) گویای آسیب‌پذیری این مخازن تحت تحریکات شدید لرزه‌ای است {۱،۲}. از طرفی به دلیل وجود سیال و اندرکنش بین سازه و سیال، رفتار لرزه‌ای این مخازن متفاوت از سازه‌هایی مانند پل‌ها و ساختمان‌ها است که باید در مطالعه و طراحی آن‌ها مورد توجه قرار گیرد. به منظور مدل‌سازی این رفتار، مقالات و آیین‌نامه‌های مختلف روش‌های متفاوتی را پیشنهاد داده‌اند. مدل هاوسنر از جمله اولین مدل‌هایی بود که به منظور پیش بینی رفتار لرزه‌ای مخازن ارائه شد {۳}. این مدل در واقع یک روش تحلیلی بر پایه جرم و فنر با فرض رفتار صلب دیوار مخازن و تئوری موج خطی بوده و تنها رفتار مخازن را تحت تحریکات افقی مورد مطالعه قرار می‌دهد که به صورت گسترده در آیین‌نامه‌های طراحی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل سیال درون مخزن به دو بخش جرم موج و جرم سخت تقسیم بندی می‌شود. جرم سخت که در قسمت تحتانی سیال و در تماس با کف مخزن فرض شده، به صورت سخت به مخزن متصل است و با آن حرکت می‌کند. قسمت بالایی که جرم موج نام گرفته در قسمت بالایی سیال و نزدیک به سقف مخزن فرض شده که نماینده نوسانات سطحی سیال است. نوسانات سطحی سیال، که در بسیاری از مطالعات به عنوان مولفه موج شناخته می‌شود، می‌تواند نقش موثری در افزایش پاسخ لرزه‌ای مخازن، از برش پایه گرفته تا افزایش فشار ایجاد شده در دیوار مخازن و جابه‌جایی نسبی آن، داشته باشد. گزارش‌های منتشر شده بعد از زلزله‌های گذشته به وضوح اهمیت این بخش از پاسخ سیال را نشان می‌دهند. برای مثال گزارش منتشر شده بعد از زلزله‌ی توکاپی‌کی ژاپن نشان داده که نوسانات سطحی سیالات ذخیره شده در مخازن روغن باعث به وجود آمدن آتش‌سوزی در این مخازن شده است {۴}. از طرف دیگر مطالعات گذشته نشان داده که این پاسخ می‌تواند باعث افزایش دیگر پاسخ‌های مخازن از جمله فشار هیدرودینامیک در مخازن شود {۵}. فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در مخازن می‌تواند باعث کماتش دیوار مخازن (در مخازن فولادی) و خرابی دیوار و سقف مخازن بتنی شود. همچنین این پاسخ می‌تواند باعث افزایش پاسخ بلند شدگی مخازن شود که خود از عوامل اصلی خرابی تاسیسات مخازن است {۶}.

سازگار (ALE) یا المان اوپلری - لاگرانژی استفاده می‌شود. این روش کیفیت مش‌ها را در طول تحلیل ثابت نگه‌داشته و از به‌هم‌ریختگی و تغییر شکل بیش‌ازحد مش‌ها جلوگیری می‌کند. برای مدل‌سازی بتن تنها رفتار الاستیک آن در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی مخزن و آب از المان‌های سه بعدی در محیط پیوسته و با هشت نقطه با انتگرال کاهش یافته (C3D8R) استفاده شده است. در مسائل نوسان مایع از تعریف مایع تراکم ناپذیر غیر لزج با استفاده از معادلات حالت مای گوشتن استفاده می‌شود. بدین ترتیب از مدول برشی با ویسکوزیته نیوتنی بسیار کم (EOS Shear, Type = viscous) و رابطه خطی US-UP (EOS, Type = UsUp) برای پاسخ حجمی استفاده می‌شود. جدول ۱ مشخصات مصالح اختصاص داده شده به آب را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات مصالح اختصاص داده شده به سیال.

پارامتر	ρ (Kg/m ³)	C_0 (m/s)	μ (N-s/m ²)	Γ_0	s
مقدار	۱۰۰۰	۱۴۵۰	۰/۰۰۱	۰	۰

در جدول بالا، ρ چگالی، C_0 سرعت صوت در آب، μ ویسکوزیته، Γ_0 و s نیز ثابت‌های ماده هستند. جدول ۲ مشخصات مصالح بتن اختصاص داده شده به مخازن را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات مصالح بتن.

پارامتر	ρ (Kg/m ³)	E (GPa)	ν
مقدار	۲۴۰۰	۲۴/۸	۰/۱۷

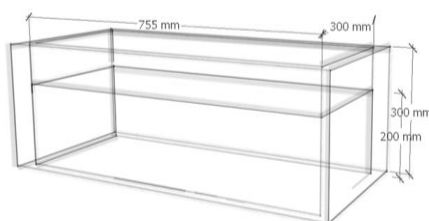
در جدول ۲، ρ ، E و ν به ترتیب چگالی، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون بتن هستند.

۳- صحت سنجی

به منظور صحت سنجی روش عددی استفاده شده در این مطالعه از نتایج به دست آمده از دو مدل آزمایشگاهی که در مطالعات پیشین مورد مطالعه قرار گرفتند استفاده شده است. مدل اول به منظور صحت سنجی پاسخ نوسانات سطحی سیال و مدل دوم به منظور صحت سنجی پاسخ فشار هیدرودینامیکی مخازن انتخاب شده است.

۳-۱- صحت سنجی نوسانات سطحی سیال

به منظور صحت سنجی نوسانات سطحی سیال از نتایج مطالعات آزمایشگاهی طوسی و کیانوش استفاده شده است {۱۳}. شکل ۱ مخزن مورد نظر و ابعاد آن را نشان می‌دهد.



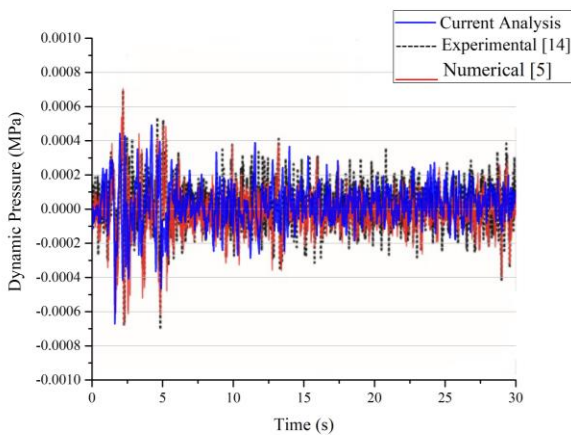
شکل ۱. مدل صحت سنجی اول {۱۳}.

می‌تواند باعث بروز خطا در محاسبات شود. از طرفی روش‌های عددی محدودیت‌های روش‌های تحلیلی را ندارند و از نظر هزینه بسیار کم هزینه‌تر از روش‌های آزمایشگاهی هستند و همین امر محققان بسیاری را به استفاده از این روش‌ها به منظور مطالعه رفتار مخازن ذخیره سیالات سوق داده است. تا به امروز محققان از روش‌های عددی متفاوتی به منظور مدل‌سازی سیستم مخزن و سیال استفاده کردند که از بین آن‌ها می‌توان به روش‌های اجزای محدود، اجزای مرزی و روش حجم محدود نام برد که هر کدام دارای فرمول‌بندی‌های مخصوص به خود هستند. روش اجزای محدود خود دارای فرمول‌بندی‌های مختلفی است که از جمله آن‌ها می‌توان به فرمول‌بندی لاگرانژی، ایلری و ترکیبی از آن‌ها نام برد. فرمول‌بندی ALE که ترکیبی از روش ایلری و لاگرانژی است، نشان داده که می‌تواند به خوبی رفتار مخزن و سیال درون آن را مدل‌سازی کند. شکوه فر به منظور مدل‌سازی عددی یک مخزن استوانه‌ای بتنی از اجزای محدود با فرمول‌بندی ALE استفاده کرد {۱۱}. در ادامه مخزن مذکور به صورت آزمایشگاهی ساخته شده و مقایسه پاسخ‌های عددی و آزمایشگاهی به دست آمده نشان از دقت این روش در مدل‌سازی رفتار لرزه‌ای مخازن دارد. کوزاک و همکارش نیز به مقایسه فرمول‌بندی‌های مختلف اجزای محدود به منظور مدل‌سازی پاسخ نوسانات سطحی سیال پرداختند {۱۲}. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اگرچه فرمول‌بندی لاگرانژی از نظر زمانی بسیار کم هزینه‌تر است، روش ALE می‌تواند با دقت بالاتری رفتار نوسانات سطحی سیال را مدل‌سازی کند.

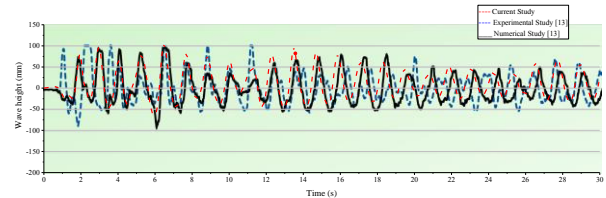
بر اساس آنچه ذکر شد، قرار گرفتن مخازن در نزدیکی گسل می‌تواند به صورت قابل توجهی باعث افزایش پاسخ لرزه‌ای آن‌ها شود. به همین دلیل در مطالعات حاضر از دو زلزله حوزه نزدیک به صورت دو مولفه‌ای به منظور مطالعه رفتار لرزه‌ای مخازن استفاده شده است. همچنین از سه زلزله دو مولفه‌ای حوزه دور نیز به منظور مقایسه نتایج و اثر فاصله مخزن از گسل استفاده شده است. معیار حوزه نزدیک یا دور بودن زلزله‌ها فاصله ایستگاه اندازه‌گیری رکورد تا گسل مربوطه است. اگرچه برای این معیار در مراجع مختلف مقادیر مختلفی ذکر شده است، در این مطالعه در صورتی که این فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر باشد زلزله حوزه نزدیک، و در غیر این صورت حوزه دور شناخته شده است. از سوی دیگر بر اساس مطالعات پیشین پاسخ‌های فشار هیدرودینامیکی و نوسانات سطحی سیال جزو مهم‌ترین پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن بوده که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور مدل‌سازی سیستم مخزن و سیال نیز از روش المان محدود با فرمول‌بندی ALE استفاده شده است.

۲- مدل‌سازی اجزای محدود

در مطالعات پیش رو مخازن با شکل‌های هندسی مستطیلی و استوانه‌ای ساخته شده از بتن مورد مطالعه قرار گرفته است. در مسائل اندرکنش سازه و سیال به دلیل تغییر شکل‌های زیاد در آب که باعث تغییر در کیفیت مش و تغییر شکل زیاد در مش‌ها و همچنین باعث واگرایی و کاهش سرعت در حل مدل می‌شود، از تکنیک مش‌بندی



مخزن مورد نظر هم به صورت عددی و هم به صورت آزمایشگاهی ساخته شده و تحت مولفه شمالی-جنوبی زلزله السنترو به صورت مقیاس شده، به 0.4g، قرار گرفته است. به منظور صحت سنجی، این مخزن به روش اجزای محدود و فرمول بندی ALE در نرم افزار آباکوس ساخته شده و نتایج پاسخ نوسانات سطحی سیال با نتایج آزمایشگاهی و عددی مرجع {۱۳} مقایسه شده است (شکل ۲).

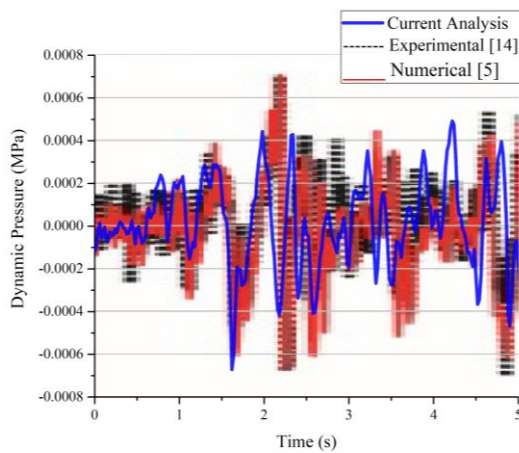


شکل ۲. صحت سنجی پاسخ نوسانات سطحی سیال {۱۳}.

همان طور که در شکل ۲ مشخص است مدل عددی ساخته شده به وسیله فرمول بندی ALE به خوبی توانسته نوسانات سطحی سیال را پیش بینی کند.

۲-۳- صحت سنجی فشار هیدرودینامیک

به منظور صحت سنجی پاسخ فشار هیدرودینامیک از نتایج به دست آمده توسط آنالیز عددی کانگ و همکارانش {۵} و آنالیز آزمایشگاهی بایک و همکارانش {۱۴} که بر روی یک مخزن استوانه‌ای بوده استفاده شده است. مخزن مورد نظر تحت مولفه شمالی-جنوبی زلزله السنترو به صورت مقیاس شده، مانند آن چه در مطالعات {۱۳} استفاده شده بود، در راستای محل فشار سنج‌ها قرار گرفته است. شکل ۳ مخزن مذکور و محل اندازه‌گیری فشار هیدرودینامیکی را نشان می‌دهد.

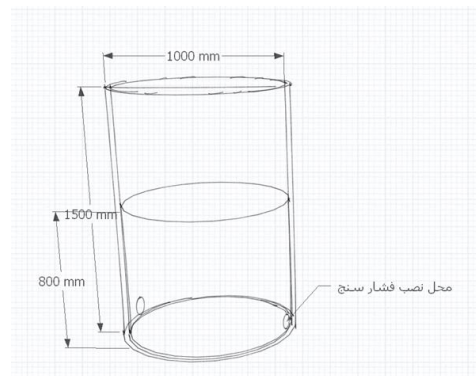


شکل ۴. نتایج صحت سنجی فشار هیدرودینامیک {۱۴،۵}.

همان طور که از نتایج نشان داده شده در شکل ۲ و ۴ مشخص است، روش به کار گرفته به جهت مدل‌سازی عددی سیستم سیال و مخزن قادر است به خوبی رفتار لرزه‌ای مخزن و سیال درون آن را پیش بینی کند.

۴- مدل اجزای محدود مخازن و سیال

به منظور مطالعه رفتار لرزه‌ای مخازن، یک مدل مخزن استوانه‌ای و یک مدل مخزن مستطیلی طوری مدل‌سازی شده‌اند که در صورتی که ارتفاع سیال ذخیره شده در آن‌ها برابر باشد، حجم سیال ذخیره شده در آن‌ها تقریباً برابر باشد. قطر و ارتفاع مخزن استوانه‌ای به ترتیب برابر با ۳۷/۴ و ۱۲/۳ متر است. طول، عرض و ارتفاع مخزن مستطیلی برابر با ۵۶، ۱۹/۶ و ۱۲/۳ متر است. هر دو مخزن تا ارتفاع ۱۱/۲ متر از آب پر شده است. شکل ۵ مخازن مورد مطالعه و ابعاد آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳. مدل صحت سنجی دوم {۱۴،۵}

مخزن مورد نظر با فرمول بندی ALE ساخته شده و پاسخ فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در کف مخزن (محل نشان داده شده در شکل ۳) با نتایج مراجع {۵} و {۱۴} مقایسه شده است (شکل ۴).

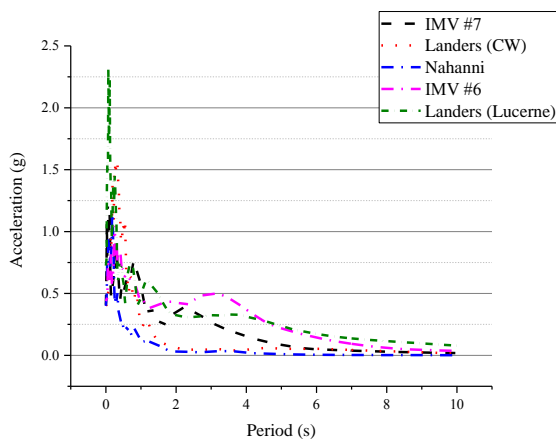
فرکانسی آن‌ها استفاده کردند می‌توان به تسو همکارانش {۱۶} اشاره کرد که زلزله‌ها را بر این اساس به سه دسته کلی تقسیم‌بندی کردند. بر این اساس در صورتی که این نسبت کمتر از ۰/۸ باشد زلزله با رنج پایین، بیشتر از ۱/۲ رنج بالا و بین این دو مقادیر زلزله با رنج متوسط است. کیانوش و قائم‌مقامی [۱۷] نیز از همین روش به منظور انتخاب شتاب‌نگاشت‌های اعمالی به مخزن مورد مطالعه خود استفاده کردند. جدول ۴ مشخصات رکوردهای استفاده شده را نشان می‌دهد. این مقادیر از جداول ارائه شده توسط الهوت {۱۸} گرفته شده است.

جدول ۴. زلزله‌های اعمال شده به مخزن {۱۸}

واقعه	ایستگاه	PG A (g)	PGV (cm/sec)	Ratio (PGA/PGV)
IMV	#7 Array (far-fault)	۰,۳۴	۴۷,۶۲	۰,۷۱
Landers	Cool Water (CW)	۰,۳۳	۲۹,۴۷	۱,۱۰
Nahanni	Site 1	۰,۹۸	۴۵,۸۹	۲,۱۳
IMV	Array #6 (near-fault)	۰,۴۱	۶۴,۸۵	۰,۶۳
Landers	Lucerne (near-fault)	۰,۷۳	۱۴۶,۵۴	۰,۵۰

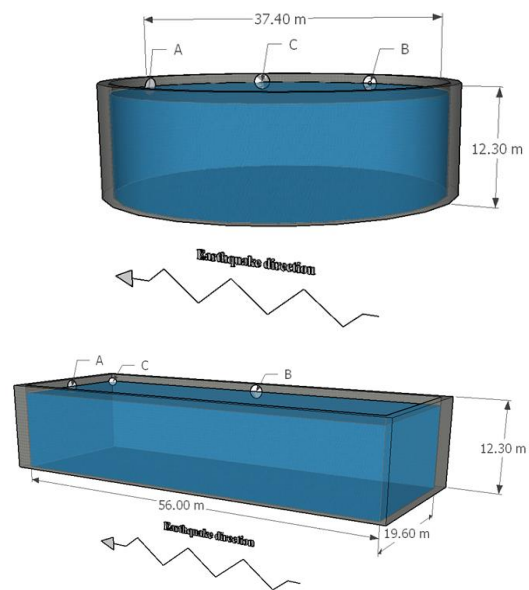
IMV = Imperial Valley.

بر اساس جدول بالا و مرجع {۱۸}، زلزله امپریال ولی (ثبت شده در هر دو ایستگاه) و زلزله لندرز در ایستگاه نزدیک به گسل، لوسرن، در دسته زلزله‌های رنج پایین، زلزله لندرز (حوزه دور) متوسط و زلزله نهانی در دسته زلزله‌های رنج بالا قرار می‌گیرند. شکل ۶ طیف پاسخ شتاب زلزله‌های انتخاب شده را نشان می‌دهد.



شکل ۶. طیف پاسخ شتاب زلزله‌های انتخاب شده.

بر اساس شکل ۶، زلزله لندرز در هر دو مورد بیشترین شتاب را در پریودهای پایین و شتاب دو رکورد زلزله امپریال در پریودهای بالا بیشتر از سایر رکوردها است. شکل ۷ تفاوت طیف پاسخ شتاب رکوردهای امپریال ولی و لندرز در دو حالت حوزه دور و نزدیک را نشان می‌دهد.



شکل ۵. ابعاد مخزن مورد مطالعه

نقاط A، B و C در شکل فوق محل اندازه‌گیری پاسخ نوسانات سطحی آب را نشان می‌دهد. این نقاط در مخزن مستطیلی به ترتیب برابر با وسط دیوار کوتاه، وسط دیوار بلند، و گوشه‌ی مخزن است. در مخزن استوانه‌ای برابر با نزدیکی دیوار مخزن در راستای اعمال جهت طولی زلزله، در نزدیکی دیوار مخزن در راستای جهت عرضی زلزله و در زاویه ۴۵ درجه نسبت به نقاط A و B است. همچنین محل اندازه‌گیری فشار هیدرودینامیک در مخازن در راستای نقاط A و B، در ارتفاع دیوار است. جهت نشان داده شده به عنوان راستای زلزله، راستای طولی زلزله بوده که در بخش بعدی به آن پرداخته می‌شود. ضخامت دیوار مخازن نیز برای هر دو مخزن برابر با ۱/۲ متر در نظر گرفته شده است. جدول ۳ میزان حجم آب ذخیره شده در مخازن و همچنین پریود طبیعی جرم موج و جرم سخت دو مخزن را که بر اساس مرجع {۱۵} محاسبه شده است نشان می‌دهد.

جدول ۳. حجم آب ذخیره شده و پریودهای اصلی مخازن مورد مطالعه.

نوع مخزن	V_w (m ³)	T_i (s)	T_c (s)
استوانه‌ای	۱۲۳۰۴,۱۴	۰,۰۶	۷,۱۵
مستطیلی	۱۲۲۹۳,۱۲	۰,۲۳	۱۱,۲۹

در جدول ۳، V_w حجم آب ذخیره شده، T_i و T_c به ترتیب پریود اصلی جرم سخت و جرم موج هستند.

۵- بارگذاری

سه رکورد حوزه دور و دو رکورد حوزه نزدیک به عنوان نیروی خارجی به مخزن اعمال شده است. معیار انتخاب رکوردهای لرزه‌ای نسبت حداکثر شتاب به حداکثر سرعت زلزله‌ها است. از جمله محققانی که از این روش به منظور دسته‌بندی زلزله‌ها بر اساس محتوای

این پاسخ در مخازن مستطیلی و استوانه‌ای مورد بحث قرار گرفته است.

جدول ۵ پاسخ حداکثر نوسانات سطحی سیال را در هر یک از نقاط نشان داده شده در شکل ۵ برای هر دو مخزن استوانه‌ای و مستطیلی نشان می‌دهد.

جدول ۵. حداکثر پاسخ نوسانات سطحی سیال در سه نقطه اندازه‌گیری مختلف.

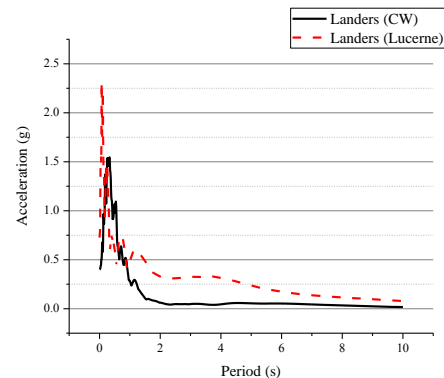
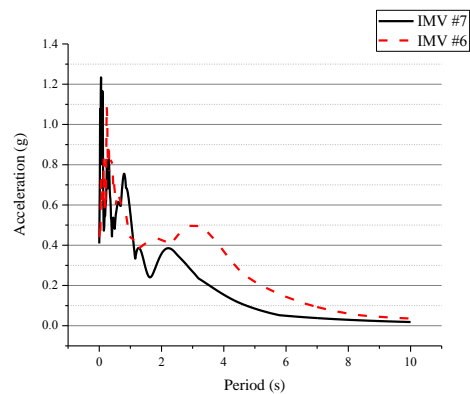
شکل مخزن	رکورد	حداکثر ارتفاع موج (m)		
		A	B	C
استوانه‌ای	IMV #7	۰,۷۸	۱,۸۱	۱,۰۸
مستطیلی		۰,۷۳	۱,۳۰	۱,۰۶
استوانه‌ای	Landers (CW)	۰,۹۴	۱,۰۹	۰,۱۵
مستطیلی		۰,۹۰	۰,۴۴	۰,۹۴
استوانه‌ای	Nahanni	۰,۰۶	۰,۱۰	۰,۰۳
مستطیلی		۰,۱۱	۰,۰۹	۰,۰۹
استوانه‌ای	IMV #6	۱,۶۹	۱,۶۸	۲,۴۶
مستطیلی		۱,۲۲	۰,۶۲	۰,۹۷
استوانه‌ای	Landers (Lucerne)	۱,۶۹	۱,۶۸	۲,۴۶
مستطیلی		۱,۱۲	۰,۳۲	۱,۲۳

نتایج بالا در مورد مخازن مستطیلی نشان می‌دهد که زمانی که این مخازن تحت هر دو مولفه‌ی زلزله افقی قرار گیرند، محل مشخصی به عنوان محل بحرانی پاسخ نوسانات سطحی سیال وجود ندارد. به عبارت دیگر با توجه به مشخصات بار خارجی اعمال شده محل این پاسخ می‌تواند تغییر کند.

در مورد مخزن استوانه‌ای در وهله‌ی اول افزایش چشم‌گیر حداکثر ارتفاع موج زمانی که مخزن تحت دو زلزله حوزه نزدیک قرار می‌گیرد قابل توجه است. بر اساس جدول ۳، پیروید طبیعی جرم موج مخزن استوانه‌ای برابر با ۷/۱۵ ثانیه است. در این ثانیه شتاب طیفی برای دو زلزله حوزه نزدیک لندرز و امپریال ولی برابر با ۰/۱۳۳ و ۰/۸۷۲ برابر شتاب گرانش است که به صورت قابل توجهی بیشتر از رکوردهای حوزه دور است (بعد از آن رکورد حوزه دور لندرز با ۰/۴۱۸ قرار دارد). محل بحرانی این پاسخ در مخازن استوانه‌ای تحت زلزله‌های حوزه دور در نقطه B و در زلزله‌های حوزه نزدیک در نقطه C اتفاق افتاده است. نکته حائز اهمیت در مورد این محل در مخازن استوانه‌ای این است که تحت رکوردهای حوزه دور با اختلاف زیادی، کمترین مقدار این پاسخ در نقطه C اتفاق افتاده در صورتی که این رویه در مورد رکوردهای حوزه نزدیک کاملاً عکس بوده است. این موضوع می‌تواند نشان از اهمیت انتخاب رکوردهای حوزه دور و نزدیک در زمان مطالعه رفتار لرزه‌ای مخازن داشته باشد.

۲-۶- فشار ایجاد شده در دیوار مخازن

در این بخش به حداکثر فشار کل و فشار هیدرودینامیکی ایجاد شده در دیوار مخازن مستطیلی و استوانه‌ای و همچنین چگونگی توزیع این فشار در ارتفاع دیوار مخازن تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک پرداخته شده است. جدول ۶ حداکثر فشار کل ایجاد شده در دیوار مخازن استوانه‌ای و مستطیلی را نشان می‌دهد.



شکل ۷. مقایسه رکوردهای ثبت شده زلزله‌های امپریال ولی و لندرز در دو ایستگاه مختلف.

همان‌طور در شکل ۷ دیده می‌شود، در مورد زلزله امپریال ولی، حداکثر شتاب ثبت شده در ایستگاه شماره ۷ بیشتر از ایستگاه شماره ۶ است. با این حال در پیرودهای بالا شتاب بیشتری در رکورد ثبت شده در ایستگاه نزدیک به گسل دیده می‌شود.

در مورد زلزله لندرز، تنها در پیرودهای بین ۰/۱۷ تا ۰/۶۱ ثانیه میزان شتاب بیشتری در رکورد ثبت شده در ایستگاه دور از گسل دیده شده و در سایر قسمت‌ها شتاب بیشتری در رکورد ثبت شده در ایستگاه لورسن (نزدیک به گسل) دیده می‌شود.

در نظر گرفتن طیف پاسخ مخازن به همراه پیروید طبیعی جرم سخت و موج می‌تواند در تحلیل پاسخ‌ها مورد استفاده قرار گیرد. اثر این اختلاف در پاسخ مولفه سخت و موج مخزن در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت.

در ادامه رکوردهای انتخابی طوری مقیاس شده که حداکثر شتاب مولفه طولی آن‌ها برابر با 0.4g باشد.

۶- مقایسه نتایج

در این مقاله پاسخ نوسانات سطحی سیال و فشار ایجاد شده در دیوار مخازن (فشار کل و فشار هیدرودینامیک) مورد مطالعه قرار گرفته که در دو بخش مجزا به آن‌ها پرداخته شده است.

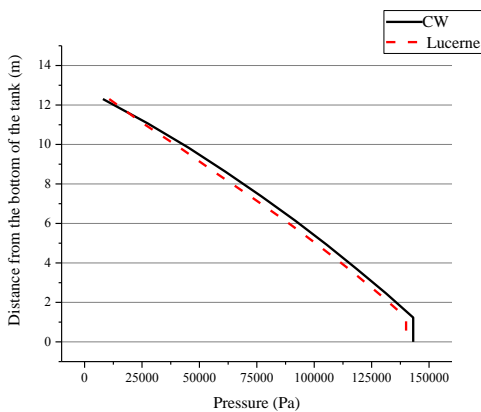
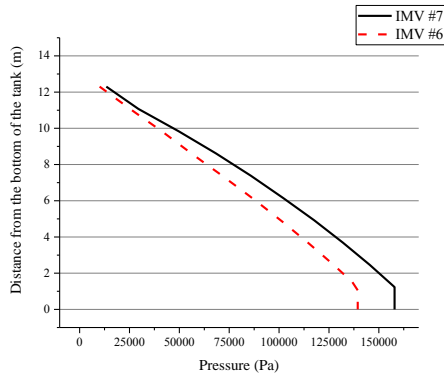
۱-۶- نوسانات سطحی سیال

در این بخش حداکثر پاسخ نوسانات سطحی سیال و محل بحرانی

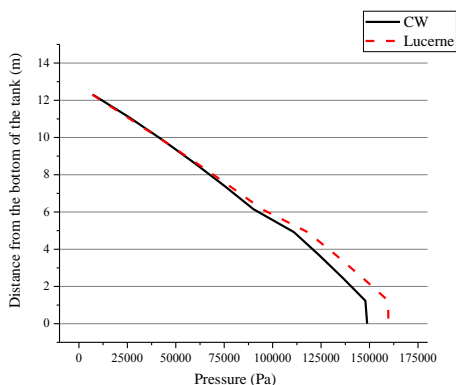
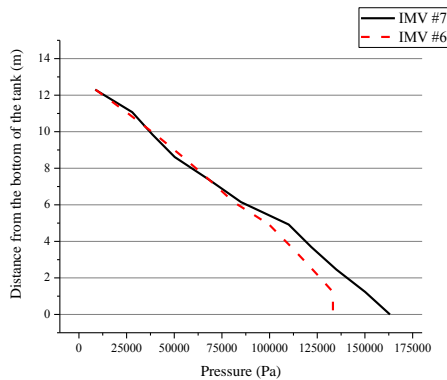
جدول ۶. حداکثر فشار کل ایجاد شده در مخازن (بر حسب پاسکال).

مخزن	ML	IMV #7	Landers CW	Nahanni	IMV #6	Landers Lucerne
CT	A	۱۵۷۹۰۷	۱۴۳۱۱۹	۱۵۲۹۶۴	۱۳۹۴۰۷	۱۴۰۰۱۵
	B	۱۴۴۰۶۲	۱۵۶۲۷۲	۱۵۴۴۸۳	۱۴۰۵۸۱	۱۴۱۲۰۸
RT	A	۱۶۳۱۱۱	۱۴۷۸۳۹	۱۵۷۵۷۷	۱۳۳۲۰۵	۱۵۹۶۶۷
	B	۱۴۰۶۰۰	۱۴۹۴۵۷	۱۶۴۲۶۱	۱۳۶۵۰۷	۱۴۱۲۷۸

ML: محل اندازه گیری
 CT: مخزن استوانه‌ای
 RT: مخزن مستطیلی



شکل ۸. نمودار توزیع فشار کل در طول دیوار مخزن استوانه‌ای (راستای نقطه A) تحت رکوردهای امپریال ولی و لندرز.



شکل ۹. نمودار توزیع فشار کل در ارتفاع دیوار مخزن مستطیلی (راستای نقطه A) تحت رکوردهای امپریال ولی و لندرز.

همان‌طور که در جدول ۶ دیده می‌شود حداکثر فشار به وجود آمده در دیوار مخازن مورد مطالعه در مخزن مستطیلی تحت رکورد امپریال ولی، ثبت شده در ایستگاه شماره ۷ (حوزه دور)، و در راستای جهت طولی (وسط دیوار کوتاه) اتفاق افتاده است. حداکثر این پاسخ که در دیوار مخازن و در نزدیکی کف مخزن اتفاق افتاده است را می‌توان به پاسخ بخش سخت مخزن نسبت داد. با توجه به جدول ۳، پرپود طبیعی جرم سخت مخزن مستطیلی برابر با ۰/۰۶ ثانیه است. با نگاهی دقیق به طیف پاسخ شتاب رکوردها، می‌توان دریافت که شتاب این رکورد مربوط به این ثانیه از طیف با اختلاف کمی نسبت به ایستگاه لوسرن زلزله لندرز در جایگاه دوم از نظر بیشترین شتاب قرار دارد. با مقایسه حداکثر پاسخ فشار ایجاد شده در مخزن تحت دو رکورد مذکور (امپریال ایستگاه شماره ۷ و لندرز ایستگاه لوسرن) می‌توان دریافت که اختلاف فشار ایجاد شده حدود دو درصد بوده به صورتی که بعد از رکورد امپریال (شماره ۷)، رکورد لندرز (لوسرن) بیشترین فشار را در مخزن مستطیلی ایجاد کرده است. در کنار موضوع حداکثر فشار، تغییر محل حداکثر فشار به وجود آمده در دیوار مخزن مستطیلی تحت یک زلزله در دو ایستگاه مختلف نیز (هم برای زلزله‌ی امپریال ولی و هم برای زلزله لندرز) می‌تواند نشان از تغییر در مشخصات زلزله و تاثیر پذیری مخزن از این تغییرات باشد.

در مورد مخزن استوانه‌ای، این مخزن فشار بیشتری را تحت رکوردهای حوزه دور شاهد بوده که بیشترین آن مربوط به رکورد ایستگاه شماره ۷ امپریال بوده است. از طرفی تفاوت بین حداکثر این پاسخ در دو نقطه اندازه‌گیری نشان می‌دهد که نمی‌توان محل دقیقی به عنوان محل بحرانی این پاسخ در این مخازن تعیین کرد.

۳-۶- توزیع فشار تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک

شکل ۸ و ۹ به ترتیب توزیع فشار در ارتفاع دیوار مخازن استوانه‌ای و مستطیلی را تحت رکوردهای لندرز و امپریال ولی ثبت شده در ایستگاه‌های نزدیک و دور از گسل با هم مقایسه می‌کند.

شکل مخزن در این پاسخ باشد. از طرفی شکل ۱۰ نشان می‌دهد که فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در مخزن استوانه‌ای در محدوده‌ی کمتری نسبت به مخزن مستطیلی است. این موضوع نشان می‌دهد که این مخزن حساسیت کمتری نسبت به مشخصات زلزله وارد شده به آن دارد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار لرزه‌ای مخازن مستطیلی و استوانه‌ای تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک مورد مطالعه قرار گرفت. ابعاد مخازن به گونه‌ای انتخاب شد که در ارتفاع مشخصی از سیال ذخیره شده، حجم سیال در دو مخزن تقریباً با یکدیگر برابر باشد. نتایج به دست آمده از این مطالعه در ادامه به صورت خلاصه آورده شده است.

- شکل هندسی مخازن می‌تواند اثر قابل توجهی بر پاسخ آن داشته باشد. اختلاف پاسخ لرزه‌ای مخازن با دو شکل مستطیلی و استوانه‌ای بیشتر در پاسخ‌های قسمت سخت دیده می‌شود. این پاسخ‌ها در مخزن استوانه‌ای کمتر از مخزن مستطیلی تابع مشخصات بار وارد بر آن است.
- محل ساخت مخزن از جهت نزدیکی به گسل می‌تواند بسیار در پاسخ بخش موج آن موثر باشد به طوری بیشتر از دو برابر پاسخ‌های این بخش را افزایش دهد.
- مطالعه طیف پاسخ شتاب رکورد لرزه‌ای در زمان انتخاب به منظور مطالعه رفتار لرزه‌ای مخازن و مقایسه آن با پریودهای جرم موج و سخت مخزن می‌تواند نقش مهمی را در نتایج به دست آمده داشته باشد.
- محل حداکثر پاسخ فشار در مخازن بیش از هر چیز به مشخصات بار لرزه‌ای وارد شده و فاصله مخازن از گسل دارد.

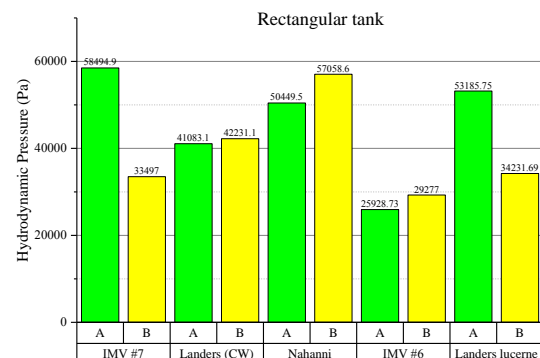
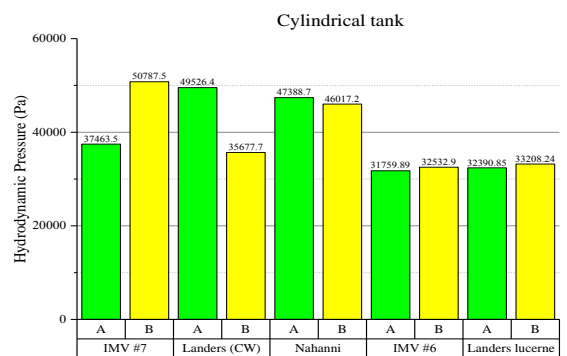
۸- مراجع

1. Gates, W. E. "Elevated and ground-supported steel storage tanks. Reconnaissance report, Imperial County, California Earthquake of October 15, 1979", Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, 1980
2. Hall, J. F., Holmes, W. T., & Somers, P. "Northridge earthquake of January 17, 1994: reconnaissance report (Vol. 11)". Earthquake Engineering Research Institute, 1995.
3. Housner, G.W. "The Dynamic behavior of water tanks". Bulletin of the Seismological Society of America, Volume (53), Page(381-387), 1963.
4. Kobayashi M, Tamura M. Case Details: "fire of a floating roof tank of crude oil caused due to a large earthquake and full face fire of another floating roof tank two days later". Retrieved from, <http://www.shippai.org/fkd/en/cfen/CC1300013.html>. (Accessed March 2022).
5. Kang, T., W.; Yang, H., I.; and Jeon, J., S.; "Earthquake-induced sloshing effects on the hydrodynamic pressure response of rigid cylindrical

شکل ۸ و ۹ نشان می‌دهد که مخازن استوانه‌ای و مستطیلی مورد مطالعه فشار بیشتری را تحت رکوردهای حوزه دور در ارتفاع دیوارهای خود تجربه کرده است. اختلاف فشار به وجود آمده در دیوار مخازن تحت زلزله امپریال ولی مشهودتر است. از طرف دیگر مقایسه شکل ۸ و ۹ نشان می‌دهد که مخازن استوانه‌ای رفتار پایداری در توزیع فشار در ارتفاع دیوارهای خود نسبت به مخازن مستطیلی دارند.

۴-۶- فشار هیدرودینامیکی

شکل ۱۰ حداکثر فشار هیدرودینامیکی ایجاد شده در دو نقطه A و B (شکل ۵) در مخازن مستطیلی و استوانه‌ای را تحت ۵ رکورد مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. حداکثر فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در مخازن در نقاط A و B.

با توجه به شکل ۱۰، می‌توان دریافت که حداکثر پاسخ فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در مخزن استوانه‌ای تحت رکوردهای حوزه دور بسیار بیشتر از این مقادیر تحت رکوردهای حوزه نزدیک است. در مورد مخزن مستطیلی، اگرچه این مخزن تحت رکورد ایستگاه شماره ۶ امپریال ولی (حوزه نزدیک) فشار هیدرودینامیکی بسیار کمی را تجربه کرده است، تحت رکورد ثبت شده در ایستگاه لوسرن (لندرز، حوزه نزدیک) فشار هیدرودینامیکی قابل توجهی در این مخزن قابل مشاهده است.

از سوی دیگر می‌توان دید که به جز رکورد حوزه نزدیک زلزله امپریال ولی، در سایر موارد مخزن مستطیلی فشار هیدرودینامیکی بیشتری را تحمل کرده است. این موضوع می‌تواند نشان از اهمیت

13. Bahreini Toussi, I.; Kianoush, R.; and Mohammadian, A.; "Numerical and Experimental Investigation of Rectangular Liquid-Containing Structures under Seismic Excitation", *Infrastructures*, 6(1), 1, 2020.
14. Baek, E R.; Choi, H S.; Park, D U.; Kim, N S.; and Kim, J M.; "Shake Table Test DB of the Liquid Storage Tank for Fluid Sloshing Analysis". *Trans Korean Soc Noise Vib Eng*. 2017.
15. "Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary (ACI 350.3-06)". American Concrete Institut (ACI), 2006.
16. Tso, W K, Zhu, T J, and Heidebrecht, A C.; "Engineering implication of ground motion A/V ratio". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 1992.
17. Kianoush, M R, and Ghaemmghami, A R.; "The effect of earthquake frequency content on the seismic behavior of concrete rectangular liquid storage tanks using the finite element method incorporating soil-structure interaction". *Engineering Structures*. 2011.
18. Elhout, E A.; "The correlation between the ground motion intensity measure". *Asian Journal of Civil Engineering*. 2020.
- liquid storage tanks using CFD simulation", *Engineering Structures*. 2019.
6. Colombo, J., I.; & Almazán, J., L. "Simplified 3D model for the uplift analysis of liquid storage tanks", *Engineering Structures*, 196, 109278, 2019.
7. Shahverdiani, K.; Rahai, A., R.; and Khoshnoudian, F.; "Sloshing in concrete cylindrical tanks subjected to earthquake", *Engineering and Computational Mechanics*. 2009.
8. Shirmali, M., K.; Bharti, S., D.; and Datta, T., K.; "Behavior of liquid storage tank under multidirectional excitation", *Advances in Structural Technologies*. 2021.
9. Tarinejad, R.; & Hosseinjani, A.; "Evaluation of the Seismic Behavior of Steel Liquid Storage Tanks under Near and Far Fault Earthquakes". *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(6), 204-220, 2021.
۱۰. مردی پیرسلطان، محمد رضا؛ کیلانته‌ئی، فواد؛ محبی، بنیامین؛ "تاثیر زلزله های حوزه نزدیک بر رفتار امواج سطحی مخازن ذخیره مایعات بتنی مستطیلی"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ش ۱۵۱(۳)، ص ۴۰۱ تا ۴۱۴، ۱۳۹۸.
۱۱. شکوه فر، احمد؛ "تغییرات نیروی پیش‌تنیدگی در مخازن بتنی پیش‌تنیده استوانه‌ای تحت شرایط بهره‌برداری"، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ۱۳۹۵.
12. Kozak, A., L.; Tehrani, P., K.; Abrahamson, T., E.; & Krimotat, A., V.; (). "Validation of the ALE Methodology by Comparison with the Experimental Data Obtained from a Sloshing Tank". In *14th International LS-DYNA Users Conference*", 2016.