

تأثیر زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار امواج سطحی مخازن ذخیره مایعات بتنی مستطیلی

محمدرضا مردی پیرسلطان، فواد کیلانته‌ئی*، بنیامین محبی

دانشگاه بین المللی امام خمینی عجله‌الله‌فیهم، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۳ مهر ۱۳۹۶

بازنگری: ۲۴ فروردین ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۵ فروردین ۱۳۹۷

ارائه آنلاین: ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

مخازن آب

اندرکنش آب و سازه

نوسانات سطح سیال

روش لاگرانژی

رفتار لرزه‌ای

چکیده: یکی از مهمترین اجزای سامانه‌های آبرسانی، مخازن ذخیره مایعات است. به هنگام وقوع زلزله، اندرکنش آب و سازه در مخازن ذخیره مایعات و پدیده حرکت سطح آزاد سیال تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقادیر پاسخ سازه دارد. با توجه به اهمیت اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک و تأثیر آنها بر رفتار لرزه‌ای و بارهای وارد به سازه‌ها، در این مطالعه، نحوه حرکت امواج سطحی و ارتفاع آنها در مخازن مستطیلی بتنی در حالت دو بعدی تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک با استفاده از روش عددی مورد بررسی قرار گرفته است. اثر ابعاد مخزن، عمق آب و مشخصات زلزله بر حداکثر ارتفاع موج سطحی با لحاظ نمودن ۹ تیپ مخزن و ۱۰ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک انجام می‌گیرد. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، میانه مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات سطح سیال در زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور افزایش قابل توجهی دارد به گونه‌ای که متوسط این افزایش ارتفاع در مخازن به طول ۲۰، ۴۰ و ۶۰ متر به ترتیب ۶۵، ۷۷ و ۱۰۰ درصد است. همچنین با افزایش عمق سیال و عرض مخزن، میانه حداکثر ارتفاع نوسانات به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. در مخازن تحت زلزله‌های حوزه دور، ارتفاع نوسانات مایع بیشترین همبستگی را با پارامتر ARIAS و در مخازن تحت زلزله‌های حوزه نزدیک با پارامتر PGV نشان داد. با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان ضرایب اصلاحی برای روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ها پیشنهاد داد که اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک را در محاسبه حداکثر ارتفاع نوسانات سیال در نظر گیرند.

۱- مقدمه

سازه‌های هیدرولیکی نظیر سدها، مخازن ذخیره مایعات، برج‌های آبیگر، کانال‌های انتقال و ... از جمله سازه‌های ویژه و حیاتی به شمار می‌آیند که نه تنها در شرایط عادی و بهره‌برداری می‌بایست از ایمنی بالایی برخوردار باشند، بلکه در شرایط بحرانی همچون زلزله نیز باید از انهدام موضعی و کلی آن جلوگیری گردد. در حال حاضر با توجه به رشد فزاینده جمعیت و توسعه شهرها، طراحی، ساخت و نگهداری مخازنی که برای ذخیره‌سازی آب مورد استفاده قرار می‌گیرند از اهمیت بسزایی برخوردارند. یکی از مهمترین موضوعات مربوط به اندرکنش آب و سازه در مخازن ذخیره مایعات، پدیده حرکت سطح آزاد سیال در اثر تحریک خارجی مخزن نظیر زلزله است. امواج تلاطمی سطح آزاد آب عامل بسیار مهمی در پاسخ مخازن ذخیره به تحریکات لرزه‌ای است. امواج سطحی سیال علاوه بر تأثیر قابل توجه بر مقادیر برش پایه و لنگر وازگونی، در تعیین ارتفاع آزاد و آسیب‌های ناشی از آن بخصوص خرابی مخازن مسقف و دیواره‌های آن نیز موثر است.

پاسخ دینامیکی سازه‌های هیدرولیکی بشدت تحت تأثیر اندرکنش بین سازه و سیال است. اندرکنش سازه و سیال با روش‌های مختلفی نظیر

جرم افزوده [۱]، مدل سازی عددی المان محدود شامل فرمول بندی اویلری - لاگرانژی [۲ و ۳] و لاگرانژی - لاگرانژی [۴-۶] یا سایر روشهای تحلیلی ساده نظیر مدل مکانیکی جرم و فنر [۷ و ۸] انجام می‌گیرد. در روش جرم افزوده، مقداری از جرم سیال در مرز مشترک سیال و سازه، به سازه افزوده شده و آنالیز دینامیکی سازه با این جرم افزوده انجام می‌گردد. در روش اویلری - لاگرانژی، معادلات حاکم بر حرکت سیال در دیدگاه اویلری و معادلات حاکم بر حرکت سازه در دیدگاه لاگرانژی مدنظر قرار گرفته و مجهول در محیط سیال، فشار یا تابع پتانسیل سرعت و در محیط سازه تغییر مکان گره ای است. بنابراین دستگاه معادلاتی که در این نوع فرمولبندی تشکیل می‌گردد، غیر متقارن بوده و حل آن مشکلات و پیچیدگی‌های خاص خود را دارد. در روش لاگرانژی - لاگرانژی، مجهول در محیط سیال و سازه تغییر مکان گره‌ای بوده و از فرمولبندی یکسان برای هر دو محیط استفاده می‌شود.

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای توسط محققین مختلف بر روی رفتار لرزه‌ای مخازن ذخیره آب به صورت تحلیلی [۹-۱۲]، فیزیکی [۱۳-۱۸] و عددی [۳۰-۱۹] انجام شده است که در آنها اثرات دامنه و فرکانس

1 Eulerian-Lagrangian method

2 Lagrangian-Lagrangian method

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kilanchei@eng.ikiu.ac.ir

در تحقیق حاضر، با توجه به کمبود منابع کافی در پیش بینی رفتار مخازن مایعات تحت زلزله‌های حوزه نزدیک، اقدام به بررسی پارامترهای مهم در رفتار مخازن تحت این زلزله‌ها شده است. برای این منظور ۹ تیپ مخزن با ابعاد مختلف تحت ۱۰ رکورد زلزله حوزه دور و ۱۰ رکورد زلزله حوزه نزدیک با استفاده از روش عددی تحلیل شده‌اند و رفتار آنها تحت این زلزله‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. مهمترین هدف تحقیق حاضر بررسی رفتار ارتعاشی و چگونگی حرکت امواج سطحی در مخازن مستطیلی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و در نتیجه ارزیابی پارامترهای تاثیرگذار، نظیر هندسه مخزن و مشخصات رکوردهای زلزله است.

۲- الگوسازی نظری و فرمول بندی المان محدود

کاربرد روش اجزای محدود در مسائل اندرکنشی^۱ می‌تواند بصورت مستقل یا در ترکیب با سایر روش‌ها نظیر روش اجزای مرزی باشد. در تحقیق حاضر محیط سازه و سیال با هم و مستقیماً بوسیله روش اجزای محدود و با استفاده از نرم افزار انسیس مدل شده و از متغیرهای تغییر مکان به عنوان درجات آزادی مستقل، هم برای سازه و هم برای سیال استفاده شده است. در روش یاد شده که به روش لاگرانژی معروف است معادله دینامیکی به فرم زیر حل می‌گردد:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (1)$$

در این رابطه، M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی و \dot{u} ، \ddot{u} و u به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و تغییر مکان گره‌های شبکه اجزای محدود می‌باشند. $F(t)$ نیز بردار نیروهای خارجی است که در بارگذاری زلزله بصورت $M\ddot{U}_g$ بوده که در آن \ddot{U}_g شتاب زمین است. در روش لاگرانژی معادله فوق هم برای سازه و هم برای سیال به کار گرفته می‌شود. ماتریس‌های M ، C و K برای محیط سازه (دیواره‌های مخزن) به روش‌های متداول در اجزای محدود قابل محاسبه است. مدل لاگرانژی آب در ادامه تشریح می‌گردد.

۲-۱- مدل لاگرانژی آب

فرمولبندی اجزای محدود المان سیال بر اساس روش انرژی استوار است. سه مولفه انرژی تحت عنوان انرژی کرنشی، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل سطح آزاد معرفی شده است. مولفه انرژی کرنشی در محیط سیال برای هر المان به صورت زیر تعریف می‌گردد [۴ و ۵]:

$$U_e = \frac{1}{2} u^T \left(\int B^T E B dV \right) u \quad (2)$$

$$K_f = \int B^T E B dV \quad (3)$$

تحریک مخزن، عمق و مشخصات سیال، هندسه و موقعیت قرارگیری مخزن، انعطاف پذیری دیواره، سیستم‌های میراگرسیال متعادل کننده، نوسانات غیرخطی سطح آزاد سیال، وجود میراگرهای افقی و عمودی در دیواره و کف مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیقات عنوان شده اثرات پدیده‌های مختلف بر رفتار مخازن تحت زلزله بررسی شده است، لیکن تفاوت رفتار مخازن تحت رکوردهای حوزه نزدیک با رکوردهای حوزه دور در تحقیقات قبلی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیقی که توسط کالوگراکو^۲ و همکاران انجام شده است مقادیر برش پایه و ارتفاع نوسانات سطح سیال در مخازن استوانه‌ای با دیواره سخت تحت چند رکورد زلزله حوزه نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعه آنان تخمین دست پایین مقادیر حداکثر پارامترهای یاد شده نسبت به ضوابط ارائه شده در یورو کد ۸^۳ را نشان داد [۳۱]. در طی سالیان گذشته به علت تراکم کم شبکه‌های لرزه‌نگاری در سراسر جهان، امکان ثبت زلزله‌های حوزه نزدیک ناچیز بوده است. با افزایش و پیشرفت دستگاه‌های لرزه‌نگار و توسعه شبکه‌های لرزه‌نگاری، امروزه نگاشت‌های متعددی از زلزله‌ها در موقعیت‌های مختلف به ثبت رسیده است که بررسی محققین حاکی از اثرات متفاوت زلزله‌های نزدیک گسل با زلزله‌های دوراز گسل است. بعد از زلزله سال ۱۹۶۶ پارکفیلد^۴ کالیفرنیا و زلزله سال ۱۹۷۱ پاکویما سانفرناندو^۵، عبارت "نزدیک گسل" توسط بولت^۶ (۱۹۷۵) [۳۲] عنوان شد. با وجود اینکه اثرات نزدیک گسل در گذشته شناخته شده بود، اما اهمیت این موضوع در طراحی سازه‌های مهندسی به خوبی درک نشده بود تا اینکه زلزله‌های مخربی همچون زلزله سال ۱۹۹۲ لندرز^۷، زلزله سال ۱۹۹۴ نورث ریج^۸، زلزله سال ۱۹۹۵ کوبه^۹ ژاپن و زلزله سال ۱۹۹۹ چی چی^۹ تایوان به وقوع پیوست. زلزله‌های مذکور که در نزدیکی یک گسل فعال رخ داده بودند، دارای نگاشت‌های پالسی با پیوند پالس بلند و دارای یک یا چند اوج سرعت می‌باشند. این پالس که توسط لغزش گسل ایجاد می‌گردد باعث می‌شود تا قسمت بزرگی از انرژی زلزله در یک یا دو پالس به طور ناگهانی به سازه وارد شده و اثرات مخربی را بر آن به جای گذارد. در سال‌های گذشته مطالعاتی بر روی رفتار سازه‌های نزدیک گسل انجام و اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک بر آنها مورد مطالعه قرار گرفته است اما کمتر به اثر آن بر روی مخازن ذخیره مایعات پرداخته شده است.

- 1 Kalogerakou
- 2 Eurocode 8
- 3 Parkfield
- 4 Pacoima San Fernando
- 5 Bolt
- 6 Landers
- 7 Northridge
- 8 Kobe
- 9 Chi Chi

لاگرانژی- لاگرانژی استفاده می‌گردد. در این بخش ابتدا مشخصات مدل‌های در نظر گرفته شده ارائه می‌گردد. در ادامه نیز ارزیابی مدل عددی، آنالیز حساسیت شبکه و آنالیز مودال آمده است.

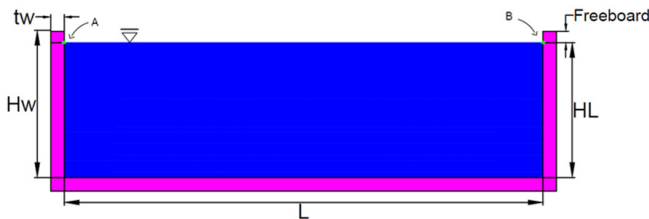
۱-۳- مشخصات مدل‌ها

در این مطالعه، ۹ نوع مخزن با ابعاد مختلف و در حالت دو بعدی در نظر گرفته شده است. مخازن به لحاظ طول (L) و ارتفاع (H) هریک به ترتیب به سه حالت کوتاه (۲۰ متر)، متوسط (۴۰ متر) و طویل (۶۰ متر) و کم عمق (۶ متر)، عمق متوسط (۹ متر) و عمیق (۱۲ متر) تقسیم شده‌اند. طرح شماتیک مخزن دو بعدی در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات و ابعاد مخازن مورد بررسی نیز در جدول ۱ آمده است. در این جدول، H_w و t_w به ترتیب ارتفاع و ضخامت دیواره مخزن و H_L ارتفاع سیال درون مخزن است.

جدول ۱. مشخصات و ابعاد مخازن مورد مطالعه

Table 1. Configurations and dimensions of the studied tanks

مشخصات	$H_L=6m$ $H_w=6.5m$ $t_w=0.6m$	$H_L=9m$ $H_w=9.75m$ $t_w=0.9m$	$H_L=12m$ $H_w=13m$ $t_w=1.2m$
نوع مخزن	عمق (۶ متر) کم عمق	عمق (۹ متر) متوسط	عمیق (۱۲ متر)
کوتاه $L=20m$	6×20	9×20	12×20
متوسط $L=40m$	6×40	9×40	12×40
طویل $L=60m$	6×60	9×60	12×60



شکل ۱. نمای کلی از مدل

Fig 1. Configurations and dimensions of the studied tanks

در مدل‌سازی‌ها فرض شده است که مخزن دارای رفتار کرنش مسطح بوده و جداره مخزن انعطاف‌پذیر است. پی مخزن نیز صلب و رفتار مصالح سازه و سیال، خطی مطابق جدول زیر لحاظ شده است.

جدول ۲. مشخصات مصالح سازه و سیال

Table 2. Material properties for the structure and fluid domain

مشخصات بتن	$\rho_c = 2300 \text{ kg/m}^3$	$E_c = 2.644 \times 10^4 \text{ pa}$	$\nu = 0.17$
مشخصات سیال (آب)	$\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$	$B_l = 2.1 \times 10^9 \text{ pa}$	$C_l = 1449 \text{ m/s}$

در این رابطه K_f ماتریس سختی المان، u بردار تغییر مکان و B ماتریس کرنش- تغییر مکان است که از رابطه $\epsilon = Bu$ تعیین می‌گردد. E ماتریس الاستیسیته سیال می‌باشد که با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$E = \begin{bmatrix} k_0 & 0 \\ 0 & \alpha k_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در ماتریس فوق، k_0 مدول الاستیسیته حجمی سیال (مدول بالک) و α پارامتر قید چرخشی است. مقدار بهینه $100k_0$ برای α پیشنهاد شده است. مولفه انرژی جنبشی در محیط سیال برای هر المان به صورت زیر

تعریف می‌گردد:

$$T_e = \frac{1}{2} \dot{u}^T \left(\int N^T \rho N dV \right) \dot{u} \quad (5)$$

که

$$M_f = \int N^T \rho N dV \quad (6)$$

در این رابطه ρ ، N ، \dot{u} و M_f به ترتیب بردار سرعت المان، تابع شکل انتخابی، دانسیته مصالح و ماتریس جرم المان است. انرژی پتانسیل ناشی از حرکت سطح آزاد آب با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$U_s = \frac{1}{2} u_s^T \left(\int H_s^T \rho g H_s dA \right) u_s \quad (7)$$

که

$$K_s = \int H_s^T \rho g H_s dA \quad (8)$$

در این رابطه K_s ، u_s ، H_s و g به ترتیب ماتریس سختی المان‌های سطحی، بردار تغییر مکان سطح آزاد آب، تابع شکل المان‌های سطحی و شتاب ثقل می‌باشد.

چنانچه روابط مولفه‌های انرژی ذکر شده در معادله لاگرانژ (رابطه ۹) جایگذاری گردد، معادله حاکم به شکل رابطه شماره ۱۰ قابل بیان است.

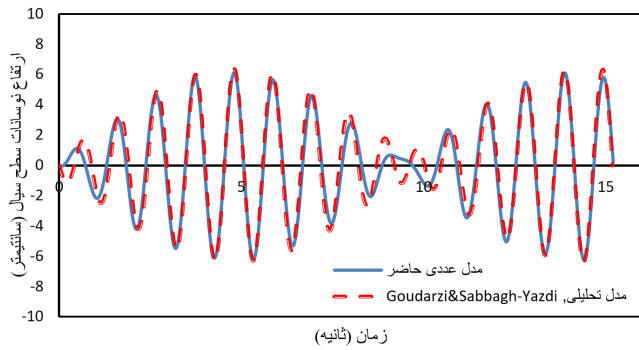
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{u}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial u_j} + \frac{\partial U}{\partial u_j} = F_j \quad (9)$$

$$M_f \ddot{u} + (K_f + K_s) u = R \quad (10)$$

تغییر مکان‌های نرمال سیال و سازه در محیط (مرز مشترک) سیال و دیواره‌های مخزن یکسان بوده و با توجه به فرض غیر لزوج بودن آب، نیروهای مماسی (اصطکاکی) بین آب و سازه وجود ندارد.

۳- مدل سازی عددی

همانگونه که عنوان شد در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی مخازن ذخیره آب از نرم افزار اجزای محدود ANSYS [۳۳] بر اساس روش



شکل ۳. مقایسه مقادیر بدست آمده ارتفاع نوسانات نقطه A حاصل از مدل عددی و روش تحلیلی

Fig 3. Comparison of the height of point "A" fluctuations, obtained from numerical model and analytical method

دستیابی به تعداد المان لازم برای انجام آنالیز تاریخیچه زمانی، با ثابت در نظر گرفتن نسبت ابعاد المان، تغییرات زمانی ارتفاع سیال در نقطه A مخزن یاد شده با تعداد المانهای مختلف در مراحل زیر تعیین و مورد مقایسه قرار می‌گیرد (شکل ۴).

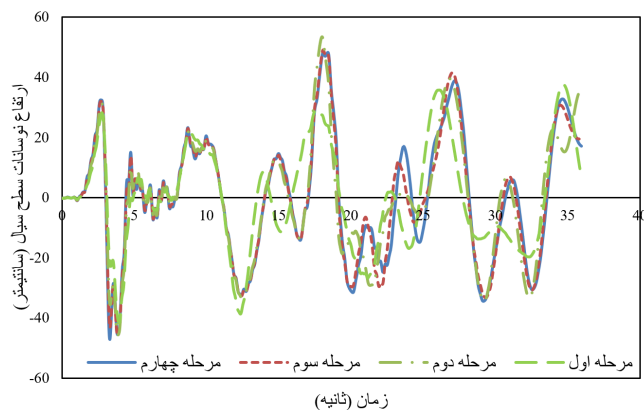
مرحله اول: ۱۰ المان در عرض و ۶ المان در عمق

مرحله دوم: ۲۰ المان در عرض و ۱۲ المان در عمق

مرحله سوم: ۳۰ المان در عرض و ۱۸ المان در عمق

مرحله چهارم: ۴۰ المان در عرض و ۲۴ المان در عمق

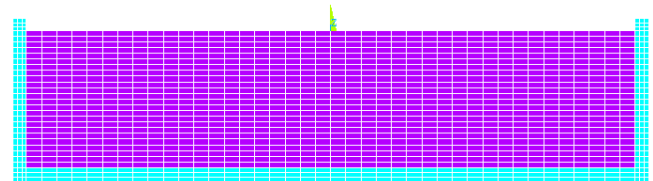
لازم به ذکر است که مدل مورد بررسی تحت زلزله حوزه نزدیک Cape Mendocino و با شرایط مرزی دیوار انعطاف پذیر و میرایی رایلی انجام شده است. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود نتایج حاصل از تعداد المانهای مراحل سوم و چهارم اختلاف بسیار کمی با یکدیگر دارند و ریزتر نمودن شبکه از ابعادی که در مرحله چهارم استفاده شده است، تاثیر قابل توجهی بر نتایج مدل ندارد بنابراین از تعداد المانهای مرحله چهارم برای تحلیل تاریخیچه زمانی استفاده می‌شود.



شکل ۴. مقایسه تغییرات زمانی ارتفاع سیال در نقطه A مخزن با ابعاد مختلف شبکه بندی

Fig 4. Comparison of temporal variations of fluid height at point "A" of tank with different mesh dimension

که $EC, \rho C$ و v به ترتیب چگالی و مدول الاستیسیته و ضریب پواسون سازه مخزن و B_1, ρ_1, C_1 نیز به ترتیب چگالی، مدول بالک سیال و سرعت صوت در سیال $(\sqrt{\frac{B_1}{\rho_1}})$ میباشند. در این تحقیق از اثرات اندرکنش خاک و سازه و همچنین وجود آب زیر زمینی و فشار بالابرنده صرف نظر شده است. مدلسازی آب و دیواره مخزن به ترتیب با المانهای چهار گره ای FLUID79 2-D Contained Fluid و PLANE182 2-D Struc- tural Solid انجام شده است. مدل المان محدود برای یکی از مخازن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمای کلی از مخزن دوبعدی شبکه بندی شده

Fig 2. Overview of the 2D meshed tank

۲-۳- ارزیابی مدل عددی

به منظور ارزیابی مدل عددی المان محدود، نوسانات ارتفاع سطح سیال در نقطه A حاصل از مدل عددی با نتایج روش تحلیلی ارائه شده توسط (Goudarzi and Sabbagh-Yazdi 2010) [۳۴] مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. در روش تحلیلی ارائه شده، پاسخ مخزن تحت تحریک هارمونیک $X(t) = D \sin(\omega t)$ به صورت رابطه زیر است.

$$\eta = \frac{DL}{2g} \omega^2 \sin \omega t + \frac{2L^2}{g\pi^2(\omega_n^2 - \omega^2)} (\omega^4 \sin \omega t - \omega \omega_n^3 \sin \omega t) \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، η ارتفاع نوسانات سطح آب $D, (m)$ دامنه تحریک هارمونیک نوسانات (m) ، ω فرکانس زاویه‌های بارورده $(\frac{rad}{s})$ ، ω_n فرکانس زاویه‌های طبیعی $(\frac{rad}{s})$ و t زمان (s) میباشند. در این ارزیابی، D برابر با 0.005 متر، ω برابر با $6/221$ رادیان بر ثانیه و ω_n برابر با $5/571$ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده و ابعاد مدل مورد بررسی 1×0.96 مترمربع و ضخامت جداره 0.02 متر است. در شکل ۳ تاریخیچه زمانی مقادیر ارتفاع نوسانات بدست آمده از مدل عددی به همراه نتایج روش تحلیلی ارائه شده است. مقایسه نتایج، عملکرد مناسب مدل عددی در پیش بینی ارتفاع نوسانات سطح سیال را نشان می‌دهد.

۳-۳- آنالیز حساسیت شبکه

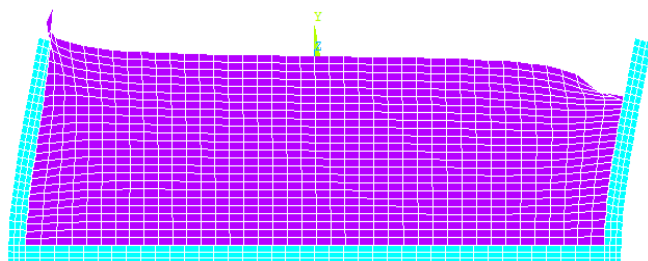
برای منقطع سازی محدوده محاسباتی از شبکه بندی منظم محیط استفاده شد. در شبکه بندی منظم ابعاد المانها در دستیابی به شبکه‌ای با دقت و کارایی مناسب، بسیار مهم و تاثیرگذار است. آنالیز شبکه برای تمامی مدل‌های عددی صورت گرفت که به عنوان نمونه روند انجام شده و نتایج آن برای مخزن 4×9 در ادامه آمده است. برای

پیک مثبت در یک دیوار و یک پیک منفی در دیوار مقابل می‌شود. برای مودهای نوسانات بالاتر، پیکهای بیشتری وجود دارد و تعداد این پیکها با تعداد مودها افزایش می‌یابد.

شکل مود اول جرم سخت نیز در شکل ۶ آمده است. زمان تناوب طبیعی مود اول جرم سخت و موج حاصل از مدل عددی المان محدود به همراه نتایج بدست آمده از روابط ارائه شده در آیین نامه ACI [۳۵] در جداول ۳، ۴ و ۵ به ترتیب برای مدل‌های دوبعدی از مخازن کم عمق، متوسط و عمیق، خلاصه شده است.

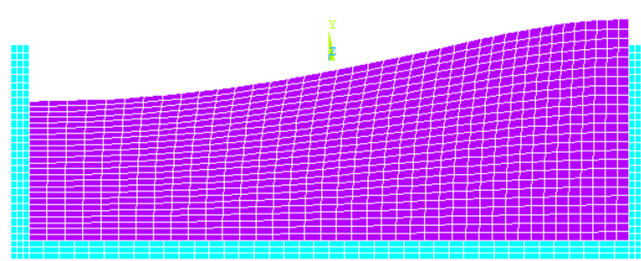
۳-۴ - آنالیز مودال

برای بدست آوردن زمان تناوب‌های طبیعی نوسان مخزن در حالت دو بعدی، آنالیز مودال انجام و زمان تناوب برای مودهای اصلی جرم موج و سخت با استفاده از FEM محاسبه شده است. شکل ۵ نشان دهنده شکل مود مربوط به اولین مود اصلی در نوسانات سطح آب یا قسمت جرم موج برای یک مدل مخزن دوبعدی می‌باشد. این شکل نشان دهنده یک موج اصلی و نامتقارن است. این مود کمترین فرکانس طبیعی را داراست. لازم به ذکر است که، در اولین مود نامتقارن، موج دارای دامنه صفر در مرکز مخزن ($X=0$) است. این امر منجر به یک



شکل ۶. مود اول مؤلفه جرم سخت

Fig 6. The first mode of the impulsive mass



شکل ۵. مود اول مؤلفه جرم موج

Fig 6. The first mode of the convective mass

جدول ۳. زمان تناوب طبیعی مود اول جرم سخت و موج در مخزن کم عمق

Table 3. The natural periods of the first mode of impulsive and convective mass in shallow tank

مخزن کم عمق (عمق آب ۶ متر)				
عرض مخزن	روش عددی		بدست آمده از آیین نامه ACI	
	زمان تناوب جرم سخت (ثانیه)	زمان تناوب جرم موج (ثانیه)	زمان تناوب جرم سخت (ثانیه)	زمان تناوب جرم موج (ثانیه)
۲۰ متر	۰/۱۸۶	۵/۹۰	۰/۱۱۶	۵/۸۶۸
۴۰ متر	۰/۱۸۸	۱۰/۸۰	۰/۱۱۷	۱۰/۷۳۷
۶۰ متر	۰/۱۹۲	۱۵/۸۹۲	۰/۱۱۷	۱۵/۷۹۷

جدول ۴. زمان تناوب طبیعی مود اول جرم سخت و موج در مخزن متوسط

Table 4. The natural periods of the first mode of impulsive and convective mass in medium tank

مخزن کم عمق (عمق آب ۹ متر)				
عرض مخزن	روش عددی		بدست آمده از آیین نامه ACI	
	زمان تناوب جرم سخت (ثانیه)	زمان تناوب جرم موج (ثانیه)	زمان تناوب جرم سخت (ثانیه)	زمان تناوب جرم موج (ثانیه)
۲۰ متر	۰/۲۷۷	۵/۳۷۷	۰/۱۷۳	۵/۳۴۶
۴۰ متر	۰/۲۸	۹/۱۸	۰/۱۷۵	۹/۱۲۴
۶۰ متر	۰/۲۸۳	۱۳/۲۳	۰/۱۷۵	۱۳/۱۵

جدول ۵. زمان تناوب طبیعی مود اول جرم سخت و موج در مخزن عمیق

Table 5. The natural periods of the first mode of impulsive and convective mass in tall tank

مخزن کم عمق (عمق آب ۱۲ متر)			
روش عددی		بدست آمده از آیین نامه ACI	
عرض مخزن	زمان تناوب جرم سخت (ثانیه)	زمان تناوب جرم موج (ثانیه)	زمان تناوب جرم سخت (ثانیه)
۲۰ متر	۰/۳۵۹	۵/۱۶	۰/۲۲۸
۴۰ متر	۰/۳۶۶	۸/۳۵۱	۰/۲۳۳
۶۰ متر	۰/۳۶۸	۱۱/۷۵۶	۰/۲۳۴

دور و نزدیک محاسبه و مورد بررسی قرار می گیرد.

۴-۱- رکوردهای زلزله

برای تعیین اثر پارامترهای مختلف زلزله های حوزه دور و نزدیک بر رفتار دینامیکی مدل های مورد بررسی، ۱۰ رکورد زلزله حوزه دور و ۱۰ رکورد حوزه نزدیک انتخاب شده است. زلزله های حوزه نزدیک براساس زمان تناوب پالس (Tp) آن ها که بازه زمانی ۰/۵ تا ۵ ثانیه (با افزایش گام زمانی ۰/۵ ثانیه) را شامل شوند از مرجع [۳۶] انتخاب شد. همچنین خاک ایستگاه ثبت زلزله متناسب با نوع ۲ یا ۳ آیین نامه ۲۸۰۰ [۳۷] (سرعت موج برشی مابین ۱۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه) است. رکوردهای زلزله های حوزه دور از جدول FEMA P695 A4-A دستورات العمل [۳۸] انتخاب شده است، سعی شده تا آنجا که امکان دارد، رکورد ثبت شده در حوزه دور و نزدیک مربوط به یک رویداد باشد. تمام رکوردهای زلزله ها از بانک اطلاعاتی PEER NGA [۳۹] استخراج شده است. در جدولهای ۶ و ۷ نام زلزله ها به همراه بعضی مشخصات آورده شده است. لازم به ذکر است که از رکورد مؤلفه شمالی جنوبی (N-S) زلزله ها استفاده شده است.

بر اساس جداول ۳ تا ۵ میتوان مشاهده کرد که زمان تناوب نوسان جرم موج حاصل از تحلیل المان محدود دارای مطابقت مناسبی با مقادیر تحلیلی ارائه شده در آیین نامه ACI است که این مهم با توجه به مشابهت روش مورد استفاده در آیین نامه ACI و روش عددی به کار گرفته شده در این مطالعه، قابل توجیه است. همچنین مقدار زمان تناوب های جرم سخت محاسبه شده توسط روش المان محدود بیشتر از مقادیر ارائه شده توسط آیین نامه ACI است که این مساله به این دلیل است که در آیین نامه ACI برای محاسبه زمان تناوب جرم سخت، سیال و دیواره به صورت صلب و متمرکز فرض شده اند ولی در روش المان محدود سیال و سازه به صورت کوپله و با شرایط مرزی واقعی شبیه سازی شده اند.

۴- نتایج و بحث

در این بخش، پاسخ لرزه ای مخازن مستطیل شکل نیمه پر تحت تحریک خارجی بررسی شده است. ابتدا در خصوص نحوه انتخاب رکوردهای زلزله و مقیاس نمودن آنها مطالبی ارائه میگردد سپس حداکثر مقادیر ارتفاع نوسانات سطح سیال تحت رکوردهای ثبت شده در حوزه

جدول ۶. زلزله های حوزه نزدیک

Table 6. Near-field earthquakes

ردیف	نام زلزله	سال وقوع	ایستگاه ثبت زلزله	پریود پالس (Tp)	سرعت برشی (Vs)	حداکثر سرعت زمین (PGV)	حداکثر شتاب زمین (PGA)	فاصله (Closest)	فاصله کانونی (Epicentral)
۱	Whittier Narrows ۰۱-	۱۹۸۷	Downey – company maintenance building	۰/۸	۲۷۱/۹	۳۰/۴	۰/۱۵۵g	۲/۸	۱۶
۲	Morgan Hill	۱۹۸۴	Coyote Lake Dam	۱	۵۹۷/۱	۶۲/۳	۱/۳g	۰/۵	۲۴/۶
۳	Kobe Japan	۱۹۹۵	Takatori	۱/۶	۲۵۶	۱۶۹/۶	۰/۶۷g	۱/۵	۱۳/۱
۴	Superstition Hills ۰۲-	۱۹۸۷	Parachute Test Site	۲/۳	۳۴۸/۷	۳۲/۲	۰/۴۲g	۱	۱۶
۵	Northridge ۰۱-	۱۹۹۴	Newhall – West Pico	۲/۴	۲۸۵/۹	۷۸/۸	۰/۴۲g	۵/۵	۲۱/۶
۶	Cape Mendocino	۱۹۹۲	Petrolia	۳	۷۱۲/۸	۸۲/۱	۰/۶۶g	۸/۲	۴/۵
۷	Imperial Valley ۰۶-	۱۹۷۹	EC Meloland Overpass	۳/۳	۱۸۶/۲	۱۱۵	۰/۳g	۰/۱	۱۹/۴
۸	Imperial Valley ۰۶-	۱۹۷۹	El Centro Array ۵#	۴	۲۰۳/۲	۹۱/۵	۰/۳۸g	۴	۲۷/۸
۹	Loma Prieta	۱۹۸۹	Saratoga – Aloha Ave.	۴/۵	۳۷۰	۵۵/۶	۰/۳۲۶g	۸/۵	۲۷/۲
۱۰	Landers	۱۹۹۲	Lucerne	۵/۱	۶۸۴/۹	۱۴۰/۳	۰/۷۲۵g	۲/۲	۴۴

جدول ۷. زلزله های حوزه دور
Table 7. Far-field earthquakes

ردیف	نام زلزله	سال وقوع	ایستگاه ثبت زلزله	سرعت برشی (Vs)	حداکثر سرعت زمین (PGV)	حداکثر شتاب زمین (PGA)	فاصله (Closest)	فاصله کانونی (Epicentral)
۱	Kocaeli, Turkey	۱۹۹۹	Duzce	۲۷۶	۵۹	۰g/۳۶	۱۵/۴	۹۸/۲
۲	Manjil, Iran	۱۹۹۰	Abbar	۷۲۴	۴۳	۰g/۵۱	۱۲/۶	۴۰/۴
۳	Kobe Japan	۱۹۹۵	Shin-Osaka	۲۵۶	۳۸	۰g/۲۳	۱۹/۲	۴۶
۴	Duzce, Turkey	۱۹۹۹	Bolu	۳۲۶	۳۵	۰g/۸	۱۲	۴۱/۳
۵	۰۱-Northridge	۱۹۹۴	Canyon Country-WLC	۳۰۹	۴۵	۰g/۴۷	۱۲/۴	۲۶/۵
۶	Cape Mendocino	۱۹۹۲	Rio Dell Overpass	۱۹۶	۴۴	۰g/۳۸	۱۴/۳	۲۲/۷
۷	۰۶-Imperial Valley	۱۹۷۹	۱۱# El Centro Array	۷۰۵	۴۲	۰g/۳۸	۱۲/۵	۲۹/۴
۸	۰۶-Imperial Valley	۱۹۷۹	Delta	۲۷۵	۳۳	۰g/۲۳	۲۲	۳۳/۷
۹	Loma Prieta	۱۹۸۹	۳# Gilroy Array	۳۵۰	۴۵	۰g/۳۷	۱۲/۸	۳۱/۴
۱۰	Landers	۱۹۹۲	Coolwater	۵۲۳	۴۲	۰g/۲۸	۱۹/۷	۸۲/۱

۴-۲- مقادیر ارتفاع نوسانات سطح سیال (slosh)

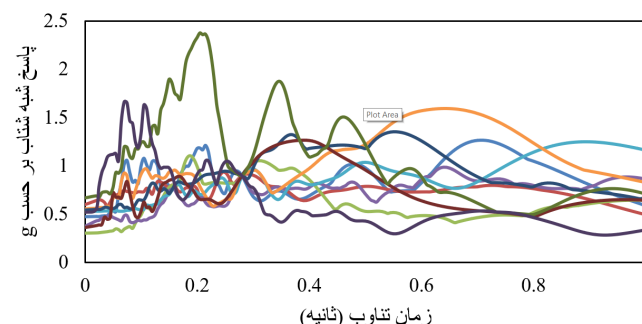
رفتار نوسانات مخزن آب تحت تأثیر عواملی مانند ابعاد مخزن، ارتفاع سطح آب و همچنین پارامترهای رکورد زلزله قرار دارد. این بخش به بررسی عوامل مؤثر بر ارتفاع نوسانات اختصاص دارد. به این منظور، رکوردهای ۱۰ زلزله حوزه نزدیک و ۱۰ زلزله حوزه دور به ۹ نوع مدل مخزن یاد شده، که مشخصات آن در بند قبلی ارائه گردید، وارد شده است. پس از انجام تجزیه و تحلیل تاریخچه زمانی، مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات سطح سیال که مربوط به یکی از گوشه های مخزن می باشد، در جدولهای ۹ و ۱۰ برحسب میلیمتر آمده است.

جدول ۸. حداکثر ارتفاع نوسانات بر حسب میلیمتر در مخازن با عرض ۲۰ متر

Table 8. Maximum sloshing height in tanks 20 m width (mm)

ابعاد مخزن	۲۰×۶		۲۰×۹		۲۰×۱۲	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
۱	۱۳۰۹	۱۴۶	۶۷۸	۱۷۷	۶۸۵	۳۱۶
۲	۴۱۵	۱۷۶	۵۰۶	۱۹۹	۵۳۶	۲۵۲
۳	۹۰۲	۳۶۵	۷۱۴	۴۷۳	۵۹۹	۵۲۸
۴	۳۵۱	۱۷۲۸	۳۹۳	۱۴۰۴	۳۶۰	۱۷۵۷
۵	۱۷۷	۲۰۵۳	۳۰۰	۱۶۴۹	۳۴۴	۲۰۶۷
۶	۴۱۱	۴۹۵	۳۳۲	۶۲۵	۴۰۵	۷۴۱
۷	۵۷۶	۱۷۶۵	۵۲۷	۱۸۶۳	۶۱۵	۱۴۶۵
۸	۶۷۵	۱۸۴۸	۱۵۵۰	۱۹۶۵	۲۰۹۳	۱۶۴۹
۹	۳۵۵	۸۷۲	۴۱۳	۲۲۶۹	۸۰۱	۱۲۶۷
۱۰	۴۶۹	۱۶۱۵	۴۶۹	۱۴۳۸	۵۱۲	۳۱۲۲
میانگین	۴۹۰	۷۷۲	۵۲۲	۸۸۲	۵۹۷	۱۰۰۷

در این تحقیق شتابنگاشتها از روش توصیه شده توسط چارنی [۴۰] مقیاس شده اند. به این منظور طیف پاسخ هر شتابنگاشت در زمان تناوب معادل زمان تناوب جرم سخت مخزن توسط یک ضریب (C_{Ch}) بر روی متوسط طیف های طرح خاک نوع ۲ یا ۳ آیین نامه ۲۸۰۰ [۳۷] قرار میگیرد. در شکل ۷ یک نمونه از طیف های پاسخ زلزله های حوزه دور مقیاس شده که مربوط به مخزن ۴۰ متری با عمق ۹ متر و زمان تناوب ۰/۲۸ ثانیه می باشد، ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، تمام طیف ها از مقدار ۰/۹ (مولفه طیف طرح در نظر گرفته شده) در دوره تناوب ۰/۲۸ ثانیه عبور کرده اند. به عبارت دیگر، دامنه شتاب هر یک از رکوردها در ضریب C_{Ch} ضرب شده است تا مولفه طیف پاسخ رکورد مقیاس شده در زمان تناوب مورد نظر به ۰/۹g برسد. تحلیل تاریخچه زمانی برای همه مخازن جدول ۸، تحت زلزله های مقیاس شده حوزه دور و نزدیک (جدولهای ۶ و ۷) انجام و در بخش بعدی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۷. طیف های پاسخ مقیاس شده زلزله های حوزه دور برای مخزن ۴۰×۹
Fig 7. Scaled response spectrum of far-field earthquakes for case 40 x9

دقت در نتایج ارائه شده در جدول های مذکور موید این مهم است که میانه مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات سطح سیال در زلزله های حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور افزایش مییابد. متوسط این افزایش ارتفاع در مخزن ۲۰ متری ۶۵ درصد، در مخزن ۴۰ متری ۷۷ درصد و برای مخزن ۶۰ متری ۱۰۰ درصد مییابد.

۱-۲-۴- اثر ابعاد مخزن بر ارتفاع نوسانات سطح آزاد سیال

یکی از مشخصات مهم سازه که تأثیر قابل توجهی بر روی ارتفاع نوسانات سطح سیال دارد، ابعاد مخزن است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول های ۸ تا ۱۰ ملاحظه میگردد که با افزایش عمق مخزن، میانه حداکثر ارتفاع نوسانات در زلزله های حوزه دور و نزدیک افزایش می یابد. در مخزن با عرض ۲۰ متر با افزایش عمق از ۶ متر به ۹ متر و از ۹ متر به ۱۲ متر میانه ارتفاع نوسانات به ترتیب ۶/۵ و ۱۴ درصد در زلزله های حوزه دور و ۱۴ درصد در زلزله های حوزه نزدیک افزایش می یابد. در مخزن با عرض ۴۰ متر نیز با افزایش عمق از ۶ متر به ۹ متر و از ۹ متر به ۱۲ متر متوسط ارتفاع نوسانات به ترتیب ۳۲ و ۲۱ درصد در زلزله های حوزه دور و ۲۳ و ۱۸ درصد در زلزله های حوزه نزدیک افزایش می یابد. در نهایت در مخزن با عرض ۶۰ متر با افزایش عمق از ۶ متر به ۹ متر و از ۹ متر به ۱۲ متر میانه ارتفاع نوسانات به ترتیب ۱۳ و ۲۲ درصد در زلزله های حوزه دور و ۲۰ و ۱۹ درصد در زلزله های حوزه نزدیک افزایش می یابد.

برخلاف عمق مخزن با افزایش عرض آن، میانه حداکثر ارتفاع نوسانات در زلزله های حوزه دور و نزدیک کاهش می یابد. افزایش عرض مخزن از ۲۰ به ۴۰ و از ۴۰ به ۶۰ متر در عمق ۶ متر به ترتیب باعث کاهش ۳۶ و ۱۵ درصدی ارتفاع نوسانات در زلزله های حوزه دور و کاهش ۲۳ و ۱۳ درصدی در زلزله های حوزه نزدیک می شود. این کاهش برای عمق ۹ متر و زلزله های حوزه دور ۲۱ و ۲۷ درصد و برای زلزله های حوزه نزدیک ۱۸ و ۱۵ درصد می باشد، و در نهایت این کاهش برای عمق ۱۲ متر و زلزله های حوزه دور ۱۷ و ۲۶ درصد و برای زلزله های حوزه نزدیک ۱۵ و ۱۴ درصد می باشد. با توجه به اینکه مقادیر ارتفاع نوسانات از نظر فیزیکی و مدل پذیرفته شده هازنرا به جرم موج وابسته است، پس از بررسی زمان تناوب جرم موج مخازن (Tc) که نشان دهنده بالا بودن مقادیر زمان تناوب مؤلفه جرم موج (کمترین مقدار آن در این مطالعه ۵/۱۹ ثانیه می باشد) نسبت به زمان تناوب غالب تحریک خارجی است، مشاهده می شود که اساساً با افزایش ارتفاع مخازن، مقدار Tc کاهش می یابد که باعث نزدیک شدن به زمان تناوب تحریک خارجی شده و در نتیجه باعث افزایش مقادیر ارتفاع نوسانات می شود. از طرفی دیگر با افزایش عرض مخزن مقادیر Tc افزایش می یابد که باعث فاصله گرفتن از زمان تناوب تحریک خارجی

جدول ۹. حداکثر ارتفاع نوسانات بر حسب میلیمتر در مخازن با عرض ۴۰ متر

Table 9. Maximum sloshing height in tanks 40 m width (mm)

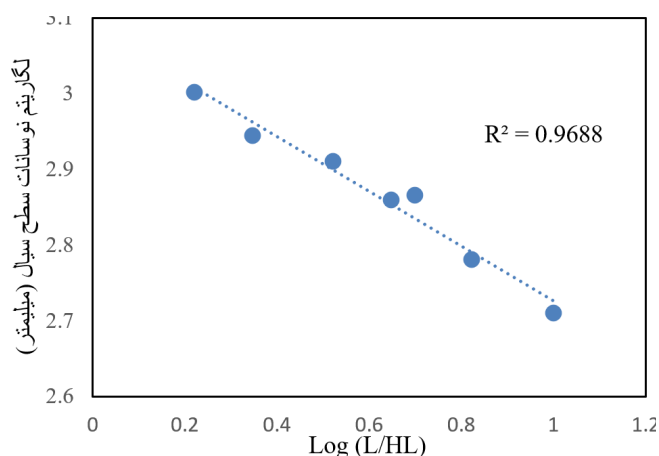
ابعاد مخزن	۴۰×۶		۴۰×۹		۴۰×۱۲	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
۱	۵۹۱	۱۰۹	۳۵۲	۱۵۶	۳۵۰	۲۵۲
۲	۱۵۲	۱۴۱	۲۹۰	۱۵۸	۴۸۸	۲۱۸
۳	۶۶۰	۳۲۰	۶۹۰	۴۰۵	۴۷۰	۴۲۰
۴	۳۰۵	۱۱۰۸	۴۱۷	۹۷۶	۳۰۸	۱۴۱۰
۵	۱۲۰	۱۴۶۲	۲۰۲	۱۴۵۰	۲۴۷	۱۹۰۵
۶	۳۳۱	۴۰۵	۳۴۵	۴۸۷	۵۲۹	۶۳۷
۷	۲۸۳	۱۵۵۶	۴۲۴	۱۶۸۹	۷۱۳	۱۳۳۹
۸	۵۱۱	۱۴۲۷	۱۰۵۷	۱۵۷۶	۱۰۵۷	۱۱۵۱
۹	۲۹۹	۳۹۴	۳۵۵	۱۳۱۷	۷۴۵	۹۹۸
۱۰	۲۸۸	۱۸۰۰	۴۳۱	۱۶۶۲	۵۲۵	۳۵۵۴
میان	۳۱۲	۵۸۹	۴۱۱	۷۲۵	۴۹۸	۸۵۷

جدول ۱۰. حداکثر ارتفاع نوسانات بر حسب میلیمتر در مخازن با عرض ۶۰ متر

Table 10. Maximum sloshing height in tanks 60 m width (mm)

ابعاد مخزن	۶۰×۶		۶۰×۹		۶۰×۱۲	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
۱	۵۹۷	۹۵	۳۲۳	۱۴۶	۲۸۵	۲۲۵
۲	۱۸۴	۱۱۵	۲۱۹	۱۳۵	۲۷۰	۱۹۶
۳	۴۵۳	۲۷۰	۳۵۲	۳۷۴	۳۱۹	۳۹۵
۴	۲۳۸	۱۱۱۶	۲۹۰	۸۱۸	۲۳۷	۱۰۳۱
۵	۱۱۶	۱۳۹۰	۱۸۹	۱۳۲۱	۲۲۶	۱۷۳۲
۶	۲۸۹	۳۶۲	۳۱۳	۴۴۵	۴۲۰	۵۸۰
۷	۲۵۹	۱۴۹۴	۲۷۶	۱۶۲۸	۳۷۵	۱۲۷۳
۸	۳۹۶	۹۴۳	۷۷۵	۹۸۶	۱۰۷۶	۱۰۰۳
۹	۲۶۸	۴۳۵	۳۱۰	۹۱۳	۶۲۷	۶۸۸
۱۰	۱۵۷	۱۲۴۳	۲۰۸	۱۵۵۴	۳۲۳	۲۹۱۷
میان	۲۶۵	۵۱۳	۳۰۰	۶۱۷	۳۶۷	۷۳۵

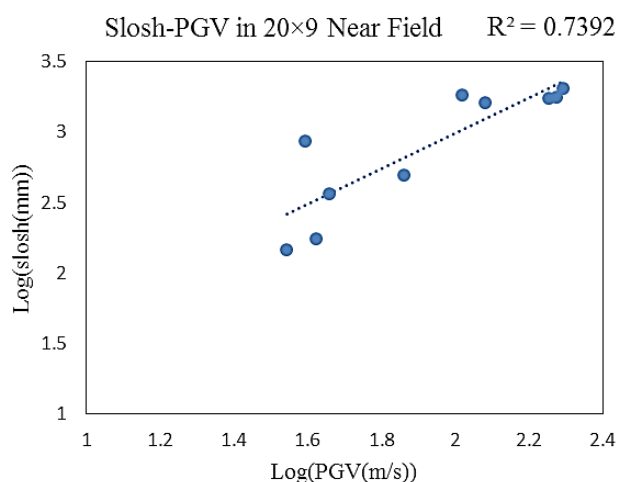
که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، لگاریتم ارتفاع نوسانات با لگاریتم نسبت L/H_L همبستگی بالایی دارد. در ضمن با افزایش نسبت L/H_L ، ارتفاع نوسانات کاهش می‌یابد.



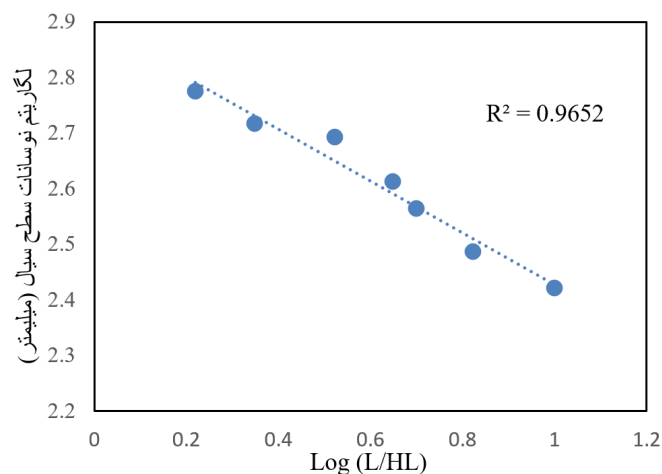
شکل ۹. لگاریتم حداکثر ارتفاع نوسانات در مقابل لگاریتم نسبت L/H_L در زلزله های حوزه نزدیک

Fig 9. Logarithm of maximum sloshing height versus logarithm of L/H_L in near-field earthquakes

به دست آمد. بررسی ضرایب همبستگی نشان داد که در زلزله‌های حوزه دور، ارتفاع نوسانات بیشترین همبستگی را با پارامتر ARIAS و در زلزله‌های حوزه نزدیک با پارامتر PGV دارد. در شکل ۱۰ ضرایب همبستگی محاسبه شده برای تعدادی از مخازن ارائه گردیده است. به عنوان مثال در مخزن با عرض ۶۰ و عمق ۱۲ متر، بیشترین پیک ارتفاع نوسانات در زلزله‌های حوزه نزدیک ۲۹۱۷ میلی‌متر است که مربوط به زلزله لندنر می‌باشد که این زلزله دارای بیشترین PGV در بین ۱۰ زلزله حوزه نزدیک این مخزن می‌باشد.



شده و در نتیجه مقادیر ارتفاع نوسانات کاهش می‌یابد. برای نشان دادن همبستگی ارتفاع نوسانات و ابعاد مخزن از پارامتر بی بعد L/H_L (طول مخزن به عمق آب) استفاده شده است. همان طور

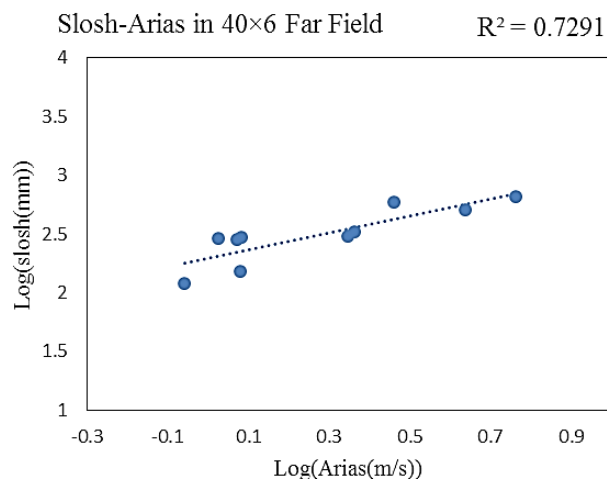


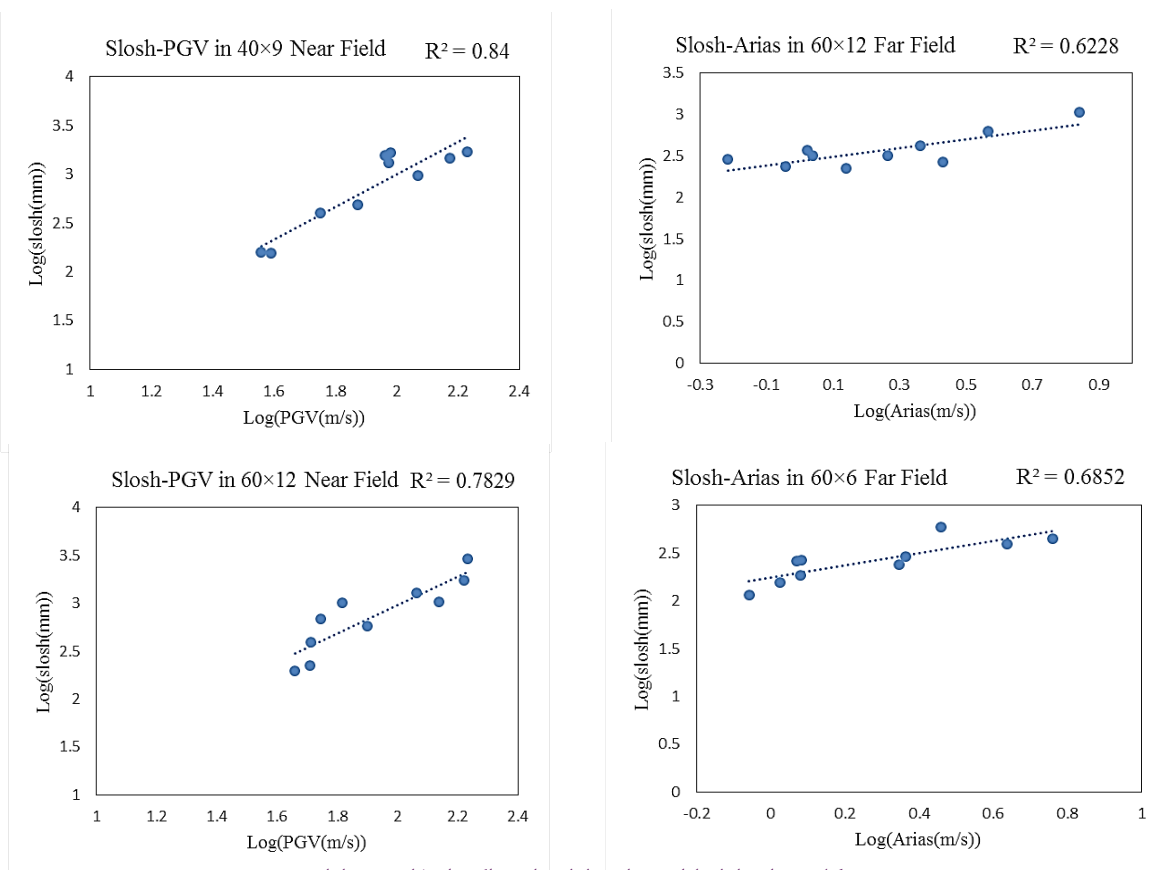
شکل ۸. لگاریتم حداکثر ارتفاع نوسانات در مقابل لگاریتم نسبت L/H_L در زلزله های حوزه دور

Fig 8. Logarithm of maximum sloshing height versus logarithm of L/H_L in far-field earthquakes

۲-۲-۴ اثر مشخصات رکوردهای زلزله بر ارتفاع نوسانات سطح آزاد سیال

برای بررسی بیشتر ارتباط ارتفاع نوسانات با پارامترهای زلزله‌های حوزه دور و نزدیک، مقادیر ارتفاع نوسانات با پارامترهای حداکثر سرعت زمین (PGV)، حداکثر شتاب زمین (PGA)، نسبت حداکثر سرعت زمین به حداکثر شتاب زمین (PGV/PGA)، شدت انرژی (ARIAS)، زمان تناوب پالس (Tp) و محتوای فرکانسی (PSD) مورد مطالعه قرار گرفت و بین لگاریتم ارتفاع نوسانات و لگاریتم این پارامترها رگرسیون خطی (حسابی) رسم شد و ضریب همبستگی آن‌ها





شکل ۱۰. ارتباط پارامترهای زلزله با حداکثر ارتفاع نوسانات

Fig 10. Relationship between earthquake parameters and maximum sloshing height

$$C_c = 6 \frac{0,4 S_{DS}}{T_c^2} = \frac{2,4 S_{DS}}{T_c^2} \quad (14)$$

برای محاسبه ضریب زلزله جرم موج (C_c) نیاز به طیف طرح زلزله می‌باشد. در این تحقیق، ضریب زلزله جرم موج با دو رویکرد محاسبه شده است. در رویکرد اول از طیف طرح مورد استفاده آیین‌نامه ACI با فرض $S_{DS} = 0.9g$ استفاده شده است، که عددی مابین مولفه‌های طیفی متناظر با خاک‌های نوع ۲ و ۳ طیف طرح استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ [۳۷] می‌باشد. طیفی که توسط آیین‌نامه ACI مورد استفاده قرار می‌گیرد دارای قسمت‌های شتاب ثابت، سرعت ثابت و جابجایی ثابت می‌باشد. در رویکرد دوم، طیف میانه زلزله‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. به عبارت دیگر، در این رویکرد مقدار $\frac{S_{DS}}{T_c^2}$ که بیانگر مولفه طیف طرح در زمان تناوب جرم موج مخزن (T_c) در قسمت تغییرمکان ثابت طیف می‌باشد برابر با مولفه طیف میانه رکوردهای در نظر گرفته شده به ازای T_c فرض شده است. به عنوان نمونه در شکل ۱۱ طیف میانه زلزله‌های حوزه نزدیک در مخزن با عرض ۴۰ و عمق ۹ متر آمده است.

مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات بدست آمده از روشهای ذکر شده برای مخازن به طول ۲۰، ۴۰ و ۶۰ متر به ترتیب در جدولهای ۱۱ تا ۱۳ بر حسب متر آورده شده است. این نتایج، با نسبت L/H_L در محیط لگاریتمی نیز در نمودارهای شکل ۱۲ رسم شده است.

با توجه به اینکه توزیع انرژی در زلزله‌های حوزه نزدیک در یک پالس متمرکز شده است ولی در زلزله‌های حوزه دور در طول زمان زلزله توزیع شده است، همبستگی ارتفاع نوسانات با Arias در زلزله‌های حوزه دور و همبستگی ارتفاع نوسانات با PGV در زلزله‌های حوزه نزدیک، قابل استنباط است.

۳-۴- مقایسه نتایج روش المان محدود و آیین‌نامه

مقادیر میانه حداکثر ارتفاع نوسانات مربوط به مخازن مختلف در بند ۴-۲ با استفاده از روش عددی المان محدود محاسبه گردید. در این بخش مقادیر یاد شده با ارتفاع نوسانات به دست آمده از رابطه ارائه شده توسط هازنر [۸] و آیین‌نامه ACI [۳۵] (به ترتیب روابط ۱۲ و ۱۳) مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

$$d = \frac{0,84 A_1 \left(\frac{k_1 L}{M_1 g} \right)}{1 - \frac{A_1}{L} \left(\frac{k_1 L}{M_1 g} \right)} \quad (12)$$

$$d_{max} = \frac{L}{2} C_c I \quad (13)$$

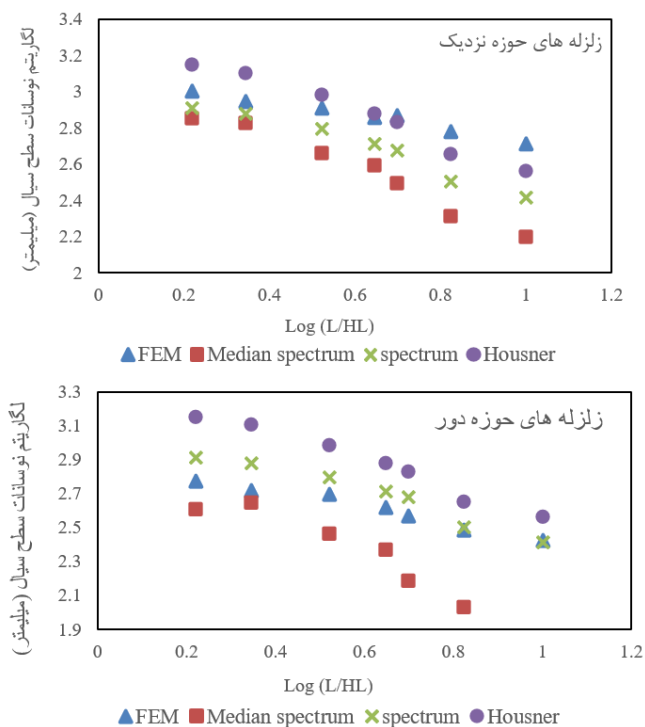
در رابطه ۱۳، L طول مخزن و I ضریب اهمیت و C_c ضریب زلزله مربوط به مؤلفه جرم موج می‌باشد، که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

جدول ۱۳. مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات (متر) بدست آمده با روشهای مختلف در مخازن با عرض ۶۰ متر

Table 13. Maximum sloshing height (m) obtained by different methods in tanks 60 m width

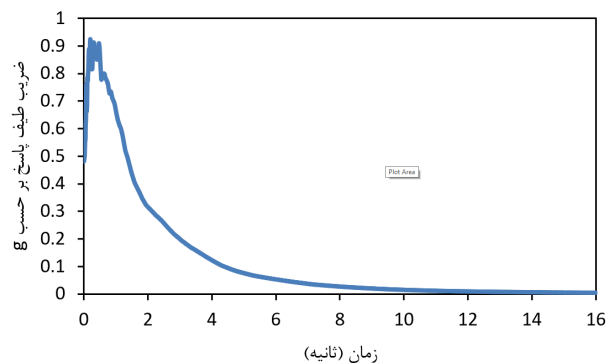
ابعاد مخزن	حوزه زلزله	روش عددی	استفاده از آیین نامه ACI با طیف میانه		Housner
			استفاده از آیین نامه ACI	استفاده از آیین نامه ACI	
۶۰×۶	دور	۰/۲۶۵	۰/۱۰۷	۰/۲۶	۰/۳۶۶
	نزدیک	۰/۵۱۳	۰/۱۵۸	۰/۲۶ ص	۰/۳۶۶
۶۰×۹	دور	۰/۳۰۰	۰/۱۶۲	۰/۳۷۵	۰/۵۳۲
	نزدیک	۰/۶۱۷	۰/۲۳۹	۰/۳۷۵	۰/۵۳۲
۶۰×۱۲	دور	۰/۳۶۷	۰/۲۳۲	۰/۴۷۵	۰/۶۸۰
	نزدیک	۰/۷۳۵	۰/۳۱۴	۰/۴۷۵	۰/۶۸۰

برای درک بهتر میزان اختلاف ارتفاع نوسانات محاسبه شده توسط آیین نامه ACI با استفاده از طیف میانه و روش محاسباتی عددی، نمودار ارتفاع نوسانات با نسبت L/H_L در محیط لگاریتمی ترسیم شده است.



شکل ۱۲. لگاریتم حداکثر ارتفاع نوسانات در مقابل لگاریتم نسبت L/H_L در زلزله های حوزه دور و نزدیک

Fig 12. Logarithm of maximum sloshing height versus logarithm of L/H_L in near- and far-field earthquakes



شکل ۱۱. طیف میانه زلزله های حوزه نزدیک در مخزن با عرض ۴ و عمق ۹ متر
Fig 11. Median spectrum of near-field earthquakes for case 40x9

جدول ۱۱. مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات (متر) بدست آمده با روشهای مختلف در مخازن با عرض ۲۰ متر

Table 11. Maximum sloshing height (m) obtained by different methods in tanks 20 m width

ابعاد مخزن	حوزه زلزله	روش عددی	استفاده از آیین نامه ACI با طیف میانه		Housner
			استفاده از آیین نامه ACI	استفاده از آیین نامه ACI	
۲۰×۶	دور	۰/۴۹۰	۰/۳۸۰	۰/۶۲۷	۰/۹۹۶
	نزدیک	۰/۷۷۲	۰/۵۵۹	۰/۶۲۷	۰/۹۹۶
۲۰×۹	دور	۰/۵۲۲	۰/۴۰۲	۰/۷۵۶	۱/۲۷۳
	نزدیک	۰/۸۸۲	۰/۶۶۶	۰/۷۵۶	۱/۲۷۳
۲۰×۱۲	دور	۰/۵۹۷	۰/۴۱۲	۰/۸۱۲	۱/۴۰۸
	نزدیک	۱/۰۰۷	۰/۷۱۴	۰/۸۱۲	۱/۴۰۸

جدول ۱۲. مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات (متر) بدست آمده با روشهای مختلف در مخازن با عرض ۴۰ متر

Table 12. Maximum sloshing height (m) obtained by different methods in tanks 40 m width

ابعاد مخزن	حوزه زلزله	روش عددی	استفاده از آیین نامه ACI با طیف میانه		Housner
			استفاده از آیین نامه ACI	استفاده از آیین نامه ACI	
۴۰×۶	دور	۰/۳۱۲	۰/۲۰۰	۰/۳۷۵	۰/۵۳۶
	نزدیک	۰/۵۸۹	۰/۲۵۲	۰/۳۷۵	۰/۵۳۶
۴۰×۹	دور	۰/۴۱۱	۰/۲۸۸	۰/۵۱۹	۰/۷۵۷
	نزدیک	۰/۷۲۵	۰/۳۹۱	۰/۵۱۹	۰/۷۵۷
۴۰×۱۲	دور	۰/۴۹۸	۰/۳۶۴	۰/۶۲۷	۰/۹۳۲
	نزدیک	۰/۸۵۷	۰/۵۰۶	۰/۶۲۷	۰/۹۳۲

تغییر میانه حداکثر ارتفاع نوسانات با تغییر عمق سیال و عرض مخزن متفاوت است. با افزایش عمق سیال و عرض مخزن، میانه حداکثر ارتفاع نوسانات به ترتیب افزایش و کاهش مییابد. برای تعیین ارتباط ارتفاع نوسانات با پارامترهای مربوط به رکوردهای حوزه دور و نزدیک، اثر پارامترهایی نظیر PSD ، PGV ، PGA ، PGV/PGA ، $ARIAS$ ، Tp مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در مخازن تحت زلزله های حوزه دور، ارتفاع نوسانات بیشترین همبستگی را با پارامتر $ARIAS$ و در مخازن تحت زلزله های حوزه نزدیک با پارامتر PGV نشان داد.

در زلزله های حوزه دور، حداکثر ارتفاع نوسانات محاسبه شده با آیین نامه ACI مطابقت مناسبی با روش عددی دارد لیکن در زلزله های حوزه نزدیک این مقادیر فاصله زیادی با یکدیگر دارند و به نظر می رسد برای زلزله های حوزه نزدیک میبایست روابط مورد بازنگری و اصلاح قرار گیرند. براساس تحلیلهای انجام شده ضریب اصلاحی برای مخازن کوتاه، متوسط و طویل به ترتیب برابر با $۱/۲۱$ ، $۱/۴۴$ و $۱/۷۲$ پیشنهاد میگردد. همچنین ارتفاع نوسانات محاسبه شده با رابطه هازنر، در زلزله های حوزه دور بیشتر از مقادیر محاسبه شده از روش عددی است اما در زلزله های حوزه نزدیک در نسبتهای کم L/H_L ، تطابق خوبی با مقادیر عددی دارد. در حالیکه با افزایش نسبت L/H_L ، ارتفاع نوسانات محاسبه شده با رابطه هازنر کمتر از روش عددی است. با توجه به نتایج این تحقیق میتوان ضرایب اصلاحی عنوان شده را برای روابط ارائه شده در آیین نامه ها پیشنهاد داد که اثرات زلزله های حوزه نزدیک را در محاسبه حداکثر ارتفاع نوسانات سیال در نظر گیرند.

مراجع

- [1] L.M. Hoskins, L.S. Jacobsen, Water pressure in a tank caused by a simulated earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, 24(1) (1934) 1-32.
- [2] L.G. Olson, K.-J. Bathe, Analysis of fluid-structure interactions. a direct symmetric coupled formulation based on the fluid velocity potential, Computers & Structures, 21(1) (1985) 21-32.
- [3] E. Kock, L. Olson, Fluid-structure interaction analysis by the finite element method—a variational approach, International journal for numerical methods in engineering, 31(3) (1991) 463-491.
- [4] Y. Calayir, A. Dumanoglu, Static and dynamic analysis of fluid and fluid-structure systems by the Lagrangian method, Computers & structures, 49(4) (1993) 625-632.
- [5] A. Dogangün, A. Durmuş, Y. Ayvaz, Static and dynamic analysis of rectangular tanks by using the lagrangian fluid finite ele-

با توجه به مقادیر ارائه شده در جداول شماره ۱۱ تا ۱۳ و همچنین نمودارهای ترسیم شده در شکل ۱۲، نتیجه می شود که در زلزله های حوزه دور، مقادیر ارتفاع نوسانات محاسبه شده با استفاده از طیف به دست آمده از موارد بیان شده در آیین نامه ACI کمی کمتر از مقادیر عددی میباشد که این اختلاف، به خصوص در نسبت های بالای L/H_L ، جزئی بوده ولی در حوزه نزدیک بسیار کمتر از مقادیر روش عددی می باشد. به عبارت دیگر می توان بیان داشت که حداکثر ارتفاع نوسانات در آیین نامه ACI در زلزله های حوزه دور مطابقت مناسبی با روش عددی دارد ولی به نظر می رسد باید برای زلزله های حوزه نزدیک این روابط تصحیح شوند. با تعیین میانگین نسبت نوسانات سطح آب براساس مقادیر جداول ۱۱ تا ۱۳ ضرایب تصحیح قابل محاسبه میباشند. مقادیر ارتفاع نوسانات محاسبه شده به روش آیین نامه ای و استفاده از طیف میانه زلزله ها نیز تطابق مناسبی با مقادیر روش عددی ندارد و در هر دو حوزه دور و نزدیک زلزله از مقادیر روش عددی کمتر می باشد. ارتفاع نوسانات محاسبه شده به روش فرمول هازنر، در زلزله های حوزه دور بیشتر از مقادیر محاسبه شده روش عددی است اما در زلزله های حوزه نزدیک در نسبتهای کم L/H_L ، تطابق خوبی با مقادیر عددی دارد ولی با افزایش نسبت L/H_L ، ارتفاع نوسانات محاسبه شده به روش فرمول هازنر کمتر از روش عددی می گردد.

نتیجه گیری

در این مقاله بررسی رفتار ارتعاشی و چگونگی حرکت امواج سطحی در مخازن مستطیلی بتنی تحت زلزله های حوزه نزدیک و مقایسه آن با زلزله های حوزه دور با استفاده از روش عددی صورت گرفت. برای بررسی اثر ابعاد مخزن، عمق آب و مشخصات زلزله بر حداکثر ارتفاع موج سطحی، ۹ تیپ مخزن در نظر گرفته شد که پس از انجام آنالیز مودال، تحت ۱۰ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک قرار گرفت. بر این اساس، بعد از تعیین مود اول نوسان جرم سخت و موج و مقایسه زمان تناوبهای به دست آمده از مدل سازی عددی با مقادیر محاسبه شده با آیین نامه ACI 350.3-06، این نتیجه حاصل شد که زمان تناوب جرم موج مطابقت خوبی با مقادیر آیین نامه ACI دارد؛ این در حالی است که مقدار زمان تناوب جرم سخت کمی بیشتر از مقادیر محاسبه شده با استفاده از روش آیین نامه ACI است. همچنین با توجه به مقایسه صورت گرفته، میانه مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات سطح سیال در زلزله های حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور افزایش قابل توجهی را نشان داد. متوسط این افزایش ارتفاع در مخزن ۲۰، ۴۰ و ۶۰ متری به ترتیب ۶۵، ۷۷ و ۱۰۰ درصد است. با افزایش نسبت L/H_L ، میانه حداکثر ارتفاع نوسانات در زلزله های حوزه دور و نزدیک کاهش مییابد.

- [20] Y.G. Chen, K. Djidjeli, W.G. Price, Numerical simulation of liquid sloshing phenomena in partially filled containers, *Computers & Fluids*, 38(4) (2009) 830-842.
- [21] A.R. Ghaemmaghami, M.R. Kianoush, Effect of Wall Flexibility on Dynamic Response of Concrete Rectangular Liquid Storage Tanks under Horizontal and Vertical Ground Motions, *Journal of Structural Engineering*, 136(4) (2010) 441-451.
- [22] L. Hou, F. Li, C. Wu, A numerical study of liquid sloshing in a two-dimensional tank under external excitations, *Journal of Marine Science and Application*, 11(3) (2012) 305-310.
- [23] H. Saghi, M.J. Ketabdari, Numerical simulation of sloshing in rectangular storage tank using coupled FEM-BEM, *Journal of Marine Science and Application*, 11(4) (2012) 417-426.
- [24] A. Vakilaadsarabi, M. Miyajima, K. Murata, Study of the Sloshing of Water Reservoirs and Tanks due to Long Period and Long Duration Seismic Motions, in: *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, Portugal, 2012.
- [25] S. Nicolici, R. Bilegan, Fluid structure interaction modeling of liquid sloshing phenomena in flexible tanks, *Nuclear Engineering and Design*, 258 (2013) 51-56.
- [26] K.K. Mandal, D. Maity, Nonlinear finite element analysis of elastic water storage tanks, *Engineering Structures*, 99 (2015) 666-676.
- [27] M.A. Goudarzi, P.N. Danesh, Numerical investigation of a vertically baffled rectangular tank under seismic excitation, *Journal of Fluids and Structures*, 61 (2016) 450-460.
- [28] S.K. Nayak, K.C. Biswal, Nonlinear seismic response of a partially-filled rectangular liquid tank with a submerged block, *Journal of Sound and Vibration*, 368 (2016) 148-173.
- [29] M. Yazdaniyan, S. Razavi, M. Mashal, Seismic analysis of rectangular concrete tanks by considering fluid and tank interaction, *Journal of Solid Mechanics*, 8(2) (2016) 435-445.
- [30] V. Sanapala, M. Rajkumar, K. Velusamy, B. Patnaik, Numerical simulation of parametric liquid sloshing in a horizontally baffled rectangular container, *Journal of Fluids and Structures*, 76 (2018) 229-250.
- [31] M.E. Kalogerakou, C.A. Maniatakis, C.C. Spyarakos, P.N. Psarropoulos, Seismic response of liquid-containing tanks with emphasis on the hydrodynamic response and near-fault phenomena, *Engineering Structures*, 153 (2017) 383-403.
- [32] B. Bolt, 'San Fernando earthquake 1971. Magnitude, aftershocks and fault dynamics, *Bulletin*, 196 (1975) California Division of Mines and Geology, Sacramento, Chapter 21.
- ment, *Computers & Structures*, 59(3) (1996) 547-552.
- [6] A. Dogangun, R. Livaoglu, Hydrodynamic pressures acting on the walls of rectangular fluid containers, *Structural Engineering and Mechanics*, 17(2) (2004) 203-214.
- [7] G.W. Housner, Dynamic pressures on accelerated fluid containers, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 47(1) (1957) 15-35.
- [8] G.W. Housner, The dynamic behavior of water tanks, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2) (1963) 381-387.
- [9] J.Z. Chen, M.R. Kianoush, Generalized SDOF system for dynamic analysis of concrete rectangular liquid storage tanks: effect of tank parameters on response, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(2) (2010) 262-272.
- [10] S. Hashemi, M.M. Saadatpour, M.R. Kianoush, Dynamic behavior of flexible rectangular fluid containers, *Thin-Walled Structures*, 66(Supplement C) (2013) 23-38.
- [11] S.M. Hasheminejad, M. Mohammadi, M. Jarrahi, Liquid sloshing in partly-filled laterally-excited circular tanks equipped with baffles, *Journal of Fluids and Structures*, 44 (2014) 97-114.
- [12] R. Moradi, F. Behnamfar, S. Hashemi, Mechanical model for cylindrical flexible concrete tanks undergoing lateral excitation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106 (2018) 148-162.
- [13] L. Khezzar, A. Seibi, A. Goharzadeh, Water Sloshing in Rectangular Tanks—An Experimental Investigation & Numerical Simulation, *International Journal of Engineering (IJE)*, 3(2) (2009) 174.
- [14] P.K. Panigrahy, U.K. Saha, D. Maity, Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks, *Ocean Engineering*, 36(3) (2009) 213-222.
- [15] S.M. Zahrai, S. Abbasi, B. Samali, Z. Vrcelj, Experimental investigation of utilizing TLD with baffles in a scaled down 5-story benchmark building, *Journal of Fluids and Structures*, 28 (2012) 194-210.
- [16] S.K. Nayak, K.C. Biswal, Fluid damping in rectangular tank fitted with various internal objects—An experimental investigation, *Ocean Engineering*, 108 (2015) 552-562.
- [17] I. Cho, M. Kim, Effect of dual vertical porous baffles on sloshing reduction in a swaying rectangular tank, *Ocean Engineering*, 126 (2016) 364-373.
- [18] M.-A. Xue, J. Zheng, P. Lin, X. Yuan, Experimental study on vertical baffles of different configurations in suppressing sloshing pressure, *Ocean Engineering*, 136 (2017) 178-189.
- [19] D. Liu, P. Lin, A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks, *Journal of Computational physics*, 227(8) (2008) 3921-3939.

- [37] S. No, 2800-05. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Third Revision, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran, (2005).
- [38] F.E.M. Agency, Quantification of Building Seismic Performance Factors, in, FEMA P695, Washington, DC, 2009.
- [39] T.D. Ancheta, R.B. Darragh, J.P. Stewart, E. Seyhan, W.J. Silva, B.S.-J. Chiou, K.E. Wooddell, R.W. Graves, A.R. Kottke, D.M. Boore, T. Kishida, J.L. Donahue, NGA-West2 Database, Earthquake Spectra, 30(3) (2014) 989-1005.
- [40] F.A. Charney, American Society of Civil Engineers., ebrary Inc., Seismic loads guide to the seismic load provisions of ASCE 7-05, in, ASCE Press, Reston, VA, 2010, pp. xiii, 233 p.
- [33] ANSYS-Inc, ANSYS software (version 14.0), Global headquarters, Canonsburg, Cennsylvania, (2016).
- [34] M.A. Goudarzi, S.R. Sabbagh-Yazdi, W. Marx, Investigation of sloshing damping in baffled rectangular tanks subjected to the dynamic excitation, Bulletin of Earthquake Engineering, 8(4) (2010) 1055-1072.
- [35] A.C. 350, Seismic Design of Liquid-containing Concrete Structures (ACI 350.3-06): An ACI Standard, American Concrete Institute, 2006.
- [36] J.W. Baker, Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, 97(5) (2007) 1486-1501.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. R. Mardi Pirsoltan, F. Kilanehei , B. Mohebi, Effect of Near-Fault Earthquakes on the Sloshing Behavior of Concrete Rectangular Liquid Storage Tanks, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(3)(2019)401-414.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13553.5435

