



اثر مؤلفه قائم زلزله بر مخازن بتنی با دیواره انعطاف‌پذیر به روش ترکیبی المان محدود و هیدرودینامیک ذرات هموار

سپهر رسول پور، محمد صافی*

*دانشکده مهندسی عمران آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۷-۲۹
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۹-۱۴
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۰-۱۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۰-۱۸

کلمات کلیدی:

مخازن بتنی
مؤلفه قائم
ارتفاع تلاطم
اندرکنش آب-سازه
هیدرودینامیک ذرات هموار

خلاصه: در این مطالعه به بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن سیال بتنی مستطیلی پرداخته شده و اهمیت اثر مؤلفه قائم زلزله بر پاسخ تلاطم و پاسخ سازه بررسی گردید؛ دیواره‌ها انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده و اثر پارامتر ضخامت دیواره نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله سازه مخزن به روش المان محدود و محیط سیال به روش هیدرودینامیک ذرات هموار، که یک روش بدون مش و دارای مزایای زیادی نسبت به روش‌های سنتی بر پایه مش است، مدل‌سازی گردید. به منظور صحت‌سنجی، درستی مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و عددی معتبر موجود مقایسه شد. تحلیل‌ها تحت رکوردهای افقی با پریودهای غالب در محدوده‌های مختلف یک بار با در نظرگیری مؤلفه قائم و بار دیگر بدون در نظرگیری آن انجام شدند و پارامترهای ارتفاع تلاطم، برش پایه، نیرو در عرض واحد و جابه‌جایی دیواره برای مقایسه به دست آورده شدند. نتایج نشان دادند که در نظرگیری مؤلفه قائم در تحلیل، اثر به نسبت ناچیزی بر روی پاسخ تلاطم دارد اما اثر آن بر روی پاسخ سازه بسیار زیاد است، در عین حال حداکثر تلاطم در تحلیل تحت رکورد افقی با پریود غالب بالا مشاهده می‌شود. مخازن با ضخامت متفاوت یا به عبارت دیگر انعطاف‌پذیری متفاوت دیواره‌ها، پاسخ تلاطم و پاسخ سازه بسیار متفاوتی از هم نشان دادند. همچنین اثر انعطاف‌پذیری دیواره‌های موازی با جهت اعمال زلزله بر روی پاسخ سازه مقدار قابل توجهی دارد. نتیجه‌گیری می‌شود که اثر مؤلفه قائم و انعطاف‌پذیری دیواره‌ها در تحلیل لرزه‌ای مخازن باید در نظر گرفته شود.

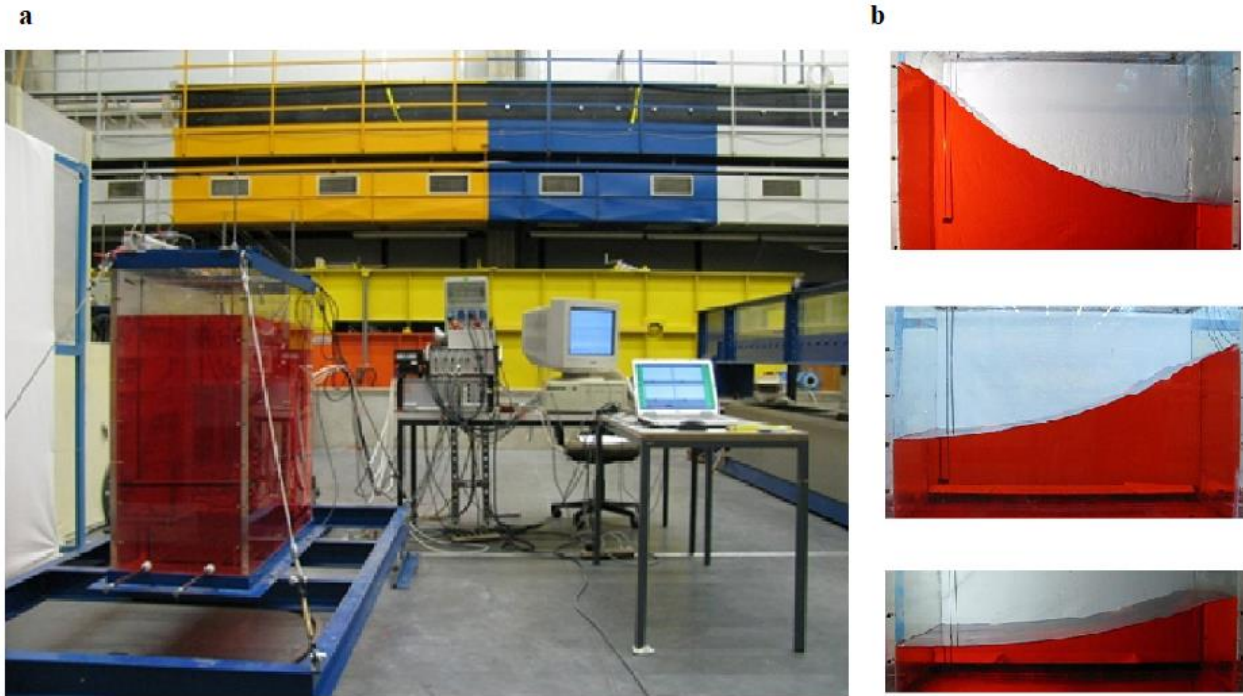
۱- مقدمه

از مدل تحلیلی استفاده کرد که در آن فشار هیدرودینامیکی ناشی از تحریک‌های لرزه‌ای به دو بخش نوسانی و ضربانی جدا شد که فشار نوسانی در اثر حرکت قسمتی از سیال که مواج است به وجود می‌آید [۱]. هارون یک مدل از مخزن استوانه‌ای ۳ درجه آزادی که به زمین مهار شده بود را ارائه کرد؛ که در نمودارهای طراحی برای تخمین جرم‌های صلب، تلاطم و نوسان به کار گرفته شد [۲]. کیم و همکاران رفتار دینامیکی مخازن مستطیلی انعطاف‌پذیر را با استفاده از روش رایلی - ریتس مطالعه کردند. روش آن‌ها مناسب و ساده برای اهداف کاربردی است. با این حال در مطالعه آن‌ها تنها دو دیواره عمود بر راستای حرکت زمین انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شد در حالی که دو دیواره دیگر صلب بودند و تاثیرات تلاطم یا امواج سطحی در محاسبات

پاسخ دینامیکی مخزن‌های منعطف می‌تواند مشخصاتی بسیار متفاوت از مخازن صلب مشابه داشته باشد. درباره این موضوع به صورت گسترده در طراحی لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای مطالعه شده است. با این وجود مطالعات بر روی پاسخ لرزه‌ای مخازن مستطیلی بسیار اندک است. علاوه بر این در اکثر مطالعات موجود بر روی مخازن مستطیلی سازه صلب در نظر گرفته شده است. در مطالعات اولیه بر روی پاسخ لرزه‌ای مخازن مایعات، مخازن صلب فرض شده و توجه بیشتر بر روی پاسخ دینامیکی سیال متمرکز شده بود. هاوزنر با مطالعه بر روی مخازن مستطیلی و استوانه‌ای و با فرض صلب بودن مخزن

* نویسنده‌دار عهده‌دار مکاتبات: m_safi@sbu.ac.ir





شکل ۱. تصاویر آزمایش میز لرزه گودرزی و صباغ در انستیتو هیدرولیک دانشگاه اشتوتگارت (a) میز لرزه و مدل مورد آزمایش (b) تصاویر لحظه‌ای تلاطم از مدل‌های با عمق آب مختلف تحت بار هارمونیک [۹]

Fig. 1. Images of Goudarzi and Sabbagh's shake table test at the Hydraulic Institute of Stuttgart University (a) shake table and testing prototype (b) images of prototypes sloshing with different water depth under harmonic excitation.

عمود بر زلزله، پاسخ دیواره مخزن ناشی از شتاب افقی و قائم زمین به‌طور جداگانه به‌دست آمده و در انتها روش‌های جمع مستقیم و جذر مجموع مربعات (روند آیین نامه 350.3.01 ACI [۷]) برای ترکیب پاسخ‌ها در بیشینه مقدار مقایسه شده‌اند [۸]. گودرزی و صباغ یزدی یک سری آزمایش‌های میز لرزه تحت تحریک بار هارمونیک سینوسی انجام دادند. آزمایش‌های آن‌ها برای مخازن نیمه‌پر با عمق آب متفاوت و فرکانس نیروی افقی متفاوت بود. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها در تطابق خوبی با نتایج عددی غیر خطی بود؛ در شکل ۱ تصاویر آزمایش میز لرزه این مطالعه نشان داده شده‌است [۹].

ایده اصلی روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)^۴ که روش مدل‌سازی محیط سیال در این مطالعه است؛ به‌طور جداگانه به وسیله لوسی [۱۰] و گینگولد و موناکان [۱۱] در سال ۱۹۹۷ برای حل مسائل ذره‌ای اختر فیزیک^۵ پیشنهاد شد. در ابتدا SPH به‌عنوان روش آماری توصیف شد و تخمین‌های خطا با استفاده از آمار مونت کارلو انجام شد با این حال در بررسی‌های بعدی مشخص شد که در

وارد نشدند [۳]. کو و همکاران از روش المان مرزی غیرمستقیم^۱ و المان‌محدود ترکیبی برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای مخازن مستطیلی که تحت تاثیر حرکت زمین لرزه افقی قرار گرفته، استفاده کردند. بررسی‌ها در ادامه برای مطالعه خصوصیات پاسخ لرزه‌ای مدل‌های سه‌بعدی مخازن مستطیلی مورد استفاده قرار گرفته‌است. در پژوهش مذکور نه تنها اندرکنش بین سازه منعطف و سیال ذخیره شده، بلکه اثرات سطح آزاد تلاطم نیز در نظر گرفته شد [۴]. چن و کیانوش، یک روش ساده شده با استفاده از سیستم یک درجه آزادی تعمیم‌یافته جهت تعیین پاسخ دینامیکی مخازن مستطیلی ارائه دادند. نتایج آن‌ها در تطابق خوبی با روش‌های المان محدود است [۵]؛ در ادامه آن‌ها بر مبنای این سیستم یک روند طراحی برای مخازن بتنی مستطیلی ارائه دادند [۶]. کیانوش و چن اثر مؤلفه قائم بر روی پاسخ مخازن مستطیلی بتنی را بررسی و روش ترکیبی جرم‌افزوده^۲ و ترتیبی^۳ را ارائه دادند، در مطالعه آن‌ها تنها با در نظرگیری انعطاف‌پذیری دیواره‌های

1 Indirect Boundary Element Method
2 Added Mass
3 Sequential

4 Smoothed Particle Hydrodynamics
5 Astrophysics

ساخته شده تحت رکوردهای مختلف یک بار بدون در نظرگیری مؤلفه قائم و بار دیگر با در نظرگیری هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم، تحلیل شدند. در این مقاله سازه مخزن به روش المان محدود و محیط سیال به روش هیدرودینامیک ذرات هموار در نرم‌افزار آباکوس^۱ مدل‌سازی شده است. به منظور صحت‌سنجی، پاسخ‌های مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی میز لرزه و پاسخ مدل‌سازی عددی کو و همکاران [۴] مقایسه شد. با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان درک بهتری از تاثیر مؤلفه قائم و انعطاف‌پذیری دیواره‌ها بر پاسخ لرزه‌ای مخازن به دست آورد.

۲- معادلات حاکم

معادلات اصلی توصیف‌کننده حرکت یک سیال لزج تراکم‌پذیر به صورت زیر است:

- معادلات ناویر - استوکس (معادله تکانه) و

- معادله پیوستگی

برای جریانات با سطح آزاد همانند حرکت تلاطم، روندهای فیزیکی در جریان سیال شبه هم‌دما هستند (مشخص است که مقدار کمی از انرژی به حرارت تبدیل می‌شود). این موضوع هم دما در نظر گرفتن کامل جریان، حذف معادله انرژی از معادلات حاکم را ممکن می‌سازد. معادلات ناویر- استوکس حاکم بر بقای تکانه هستند، درحالی‌که معادله پیوستگی بیانگر بقای جرم است. ویژگی مهم فرمول‌بندی SPH استفاده از رویکرد لاگرانژی برای توصیف حرکت سیال است. بر اساس توصیف لاگرانژی، معادلات حاکم در سیستم مختصات پیوسته به محیط در حال حرکت (ذرات) نوشته می‌شوند؛ که این باعث از بین رفتن عبارت انتقالی در معادله تکانه، تا زمانی که سیستم مختصات با محیط شبه‌سازی شده حرکت می‌کند، می‌شود. بدین ترتیب معادلات حاکم در توصیف لاگرانژی به فرم معادلات ۱ و ۲ تعریف می‌گردند:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\text{div } \rho\vec{v} = -\nabla \cdot (\rho\vec{v}), \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + V_t + \vec{F}, \quad (2)$$

عمل خطاها از تخمین‌های مونت کارلو بسیار کوچک‌تر هستند [۱۲] و [۱۳] این مطالعات اولیه ارزش زیاد روش SPH را نشان داد و سپس باعث کاربرد این روش برای مسائل گسترده‌ای از اختر فیزیک شد [۱۴ و ۱۵].

فرمول‌بندی اصلی روش SPH [۱۰ و ۱۱] بقای کامل تکانه خطی و زاویه‌ای را تامین نمی‌کرد. بهبود بیشتر فرمول‌بندی برای اطمینان از بقای این کمیت‌ها با استفاده از ذره معادل برای تابع لاگرانژی انجام گرفت [۱۶]، در نسخ بعدی [۱۷ و ۱۸]، موناکان روش SPH را برای شبیه‌سازی جریانات تراکم‌پذیر با توجه ویژه به دقت روش تحلیل و ارزیابی خطاهای درون‌یابی که بر اثر نامنظمی ذرات به وجود می‌آید، شرح داد و سپس فرمول‌بندی روش SPH را برای جریانات با سطح آزاد به کار گرفت [۱۹]. از آخرین تحقیقات بر روی شبیه‌سازی تلاطم به روش SPH می‌توان به مطالعه گرین و پیرو اشاره نمود. آن‌ها فرمول‌بندی SPH برای شبیه‌سازی‌های طولانی تلاطم در مخازن با سطح آب پایین ارائه دادند که در تطابق با نتایج آزمایشگاهی بود [۲۰].

ترجیح روش SPH به دیگر روش‌های سنتی در این مطالعه بنا به دلایل زیر است:

- در روش‌های ذرات بدون مش، نظیر SPH، دامنه مسئله به وسیله ذرات بدون یک اتصال ثابت جداسازی شده است. در نتیجه تغییر شکل‌های بزرگ به نسبت بسیار ساده‌تر مدل‌سازی می‌شوند.
- از آنجایی که روش‌های اویلری نیاز به شبکه‌بندی بزرگ‌تری برای پوشش کل دامنه محاسباتی که ماده ممکن است در آن جریان پیدا کند هستند، معمولاً شبکه‌بندی درشت‌تری برای به صرفه بودن محاسبات انجام می‌شود که می‌تواند بر دقت حل تاثیرگذار باشد.
- به‌علت ماهیت لاگرانژی روش SPH دست یافتن به ویژگی‌های کل سیستم فیزیکی از طریق ردیابی حرکات ذرات آسان است.

در مطالعه حاضر مدل‌سازی به‌صورت سه‌بعدی انجام گرفته و انعطاف‌پذیری همه دیواره‌های مخزن در نظر گرفته شده و به‌منظور بررسی اثر انعطاف‌پذیری دیواره‌ها بر تلاطم سیال و پاسخ سازه اصلی دو مخزن با ضخامت دیواره‌های ۱ m و ۰/۵ m مدل‌سازی شدند. سه رکورد به‌نحوی انتخاب شدند که مؤلفه افقی آن‌ها دارای پریرود غالب در محدوده‌های مختلف باشد؛ تا تفاوت پاسخ سازه و پاسخ تلاطم مشخص گردد. سپس برای در نظرگیری اثرات مؤلفه قائم، مدل

۳-۱- کرنل درون‌یابی

تابع کرنل مستقیماً بر نتایج روش هیدرودینامیک ذرات هموار اثر می‌گذارد. بنابراین باید دارای ویژگی‌های به‌خصوصی مانند مثبت بودن، خاصیت نرمال، داشتن تکیه‌گاه فشرده، نزولی یکنواخت بودن و رفتار تابع دلتا را داشته‌باشد. موناکان درباره کرنل هموارساز رابطه ۶ بر اساس توابع اسپلاین درجه ۳ بحث کرد [۱۸]. در این مطالعه نیز از این تابع به‌عنوان تابع کرنل استفاده شده‌است.

$$W(r, h) = \frac{1}{\pi h^3} \begin{cases} 1 - \frac{3}{2} \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{r}{h}\right)^3 & 0 < \frac{r}{h} \leq 1 \\ \frac{1}{4} \left(2 - \frac{r}{h}\right)^3 & 0 < \frac{r}{h} \leq 2 \\ 0 & \frac{r}{h} > 2 \end{cases} \quad (6)$$

۳-۲- معادله حالت

روش SPH در اصل برای مسائل اخت‌فیزیکی، شامل مدل‌سازی اندرکنش ابرگاز^۱، شکل‌گیری ستاره‌ها و کهکشان‌ها و دیگر موارد پیشنهاد شد [۱۰]. همه این مسائل می‌توانند با استفاده از برخی معادلات حالت برای محیط‌گازی، همانند معادله حالت برای گازهای ایده‌آل حل شوند. سپس روش برای مایعات تراکم‌ناپذیر گسترش یافت [۱۷]. ایده اصلی این است که مایع واقعی که تقریباً تراکم‌ناپذیر است، با سیالی که تراکم‌پذیری کمی دارد تقریب زده می‌شود. هدف معرفی تراکم‌پذیری مصنوعی، به‌دست آوردن گرادیان فشار که معرف حرکت ذره است، می‌باشد.

در این مطالعه از معادله حالت می-گرونایزن^۲ به فرم رابطه ۷ برای توصیف تغییر فشار با تغییر چگالی آب واقعی استفاده شد:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2}\right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m, \quad (7)$$

که در آن ρ_0 چگالی اولیه ماده؛ c_0 ، سرعت صوت در ماده؛ s ، شیب هیوگونویت^۳ شوک؛ $\eta = 1 - \rho_0 / \rho$ ، کرنش فشاری حجمی اسمی؛ Γ_0 ، ثابت ماده؛ و E_m مقدار افزایش انرژی داخلی بر واحد جرم است. برای تعریف ماده در معادله حالت فوق چهار خاصیت آب مشخص شد: $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ ، $c_0 = 1480 \text{ m/s}$ ، $\Gamma_0 = 0$ ،

که \vec{v} سرعت جریان، ρ چگالی سیال، P فشار، V_i ترم لزجت و \vec{F} مجموع نیرویی که بر روی واحد جرم اثر می‌کند. عبارت d/dt به معنی مشتق پارامتر جریان که در نقطه‌ای که با سیال حرکت می‌کند، محاسبه می‌شود.

۳- فرمول‌بندی روش هیدرودینامیک ذرات هموار

روش هیدرودینامیک ذرات هموار که به وسیله موناکان پیشنهاد شد [۱۷] بر اساس تکنیک درون‌یابی است، که در آن مقدار هر تابع در نقطه مورد نظر با استفاده از مقدار آن در تعدادی از نقاط مجاور آن به‌دست می‌آید. در این درون‌یابی تابع ناپیوسته دلتای دیراک به وسیله تابع پیوسته کرنل تخمین زده می‌شود. در روش SPH هر تابع دلخواه و گرادیان آن به‌ترتیب به وسیله رابطه‌های ۳ و ۴ تخمین زده می‌شوند:

$$f_i(\vec{r}) = \sum_j f_j \frac{m_j}{\rho_j} W(\vec{r}_i - \vec{r}_j, h), \quad (3)$$

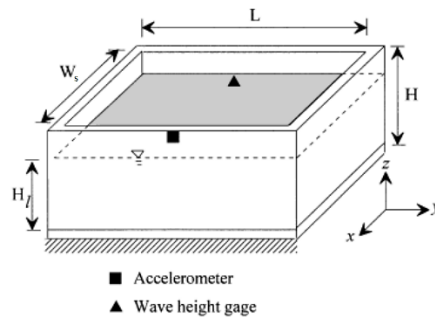
$$\nabla f_i(\vec{r}) = \sum_j f_j \frac{m_j}{\rho_j} \nabla W(\vec{r}_i - \vec{r}_j, h), \quad (4)$$

که m_j و ρ_j به‌ترتیب جرم و چگالی j امین ذره هستند، h شعاع هموارساز، $f_i(\vec{r})$ مقدار تخمین تابع f در نقطه‌ای که به وسیله بردار شعاع \vec{r} تعریف می‌شود. شعاع هموارساز پارامتری کلیدی در تخمین‌های SPH است. شعاع هموارساز فاصله‌ای که در آن ذرات با هم اندرکنش دارند را تعریف می‌کند، یعنی همان فاصله‌ای که مقدار تابع کرنل در آن غیر صفر است (که تکیه‌گاه دامنه کرنل نامیده می‌شود). عموماً مقدار دامنه تکیه‌گاه ضریبی از مقدار شعاع هموارساز است که به صورت رابطه ۵ تعریف می‌گردد:

$$R_{(s, domain)} = k \cdot h, \quad (5)$$

مقدار ثابت k به وسیله انتخاب کرنل هموارساز تعیین می‌شود. برای مقدار معمول $k=2$ ، ذرات پخش‌شده در فاصله بزرگ‌تر از دو شعاع هموارساز اثری بر روی پارامترهای نقطه (ذره) در نظر گرفته‌شده ندارند. این موضوع زمانی درست است که اگر فاصله نقطه مجاور بزرگ‌تر مساوی $2h$ باشد، آنگاه مقدار تابع هموارساز برابر صفر شود. در مدل‌سازی مطالعه حاضر، طول هموارساز به‌نحوی انتخاب شد که هر ذره حدوداً ۶۰ ذره دیگر را در دامنه تاثیر خود جای دهد.

1 Gas Cloud Interaction
2 Mie-Grüneisen
3 Hugoniot



شکل ۲. مدل سه بعدی مخزن مستطیلی و نقاط اندازه گیری پارامترها

Fig. 2. 3 dimensional model of a rectangular storage tank and the measuring points of its parameters.

۵- صحت سنجی

.s = ۰

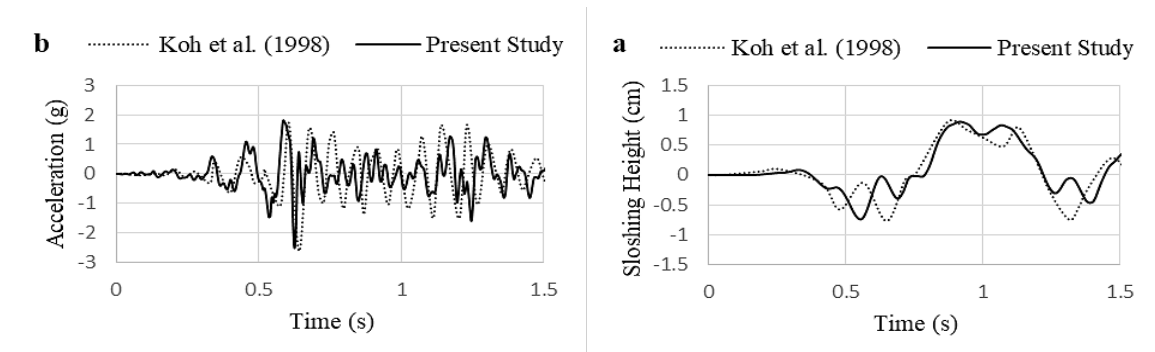
بهمنظور صحت سنجی روش مدل سازی این مقاله، نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی میز لرزه و نتایج مدل سازی عددی کو و همکارانش [۴] مقایسه شد. تست های میز لرزه برای یک مخزن مستطیلی سه بعدی که از صفحات آکرلیک ساخته شده اند، انجام شد. مشخصات مصالح آکرلیک عبارتند از چگالی، 1200 kg/m^3 ؛ مدول یانگ، $E = 2/9 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ؛ و ضریب پواسون، $\nu = 0/35$ m. مدل بر اساس هندسه نشان داده شده در شکل ۲: ارتفاع، $H = 0/9 \text{ m}$ ؛ ضخامت دیواره ها، $t_w = 0/035 \text{ m}$ ؛ طول، $L = 2/2 \text{ m}$ ؛ و عرض، $W_s = 1/15 \text{ m}$ ؛ تعریف شده است. برای ارضای فرض صلبیت کف، یک صفحه فولادی به قطعه کف متصل شده است. از آزمون های مقدماتی انجام شده بر روی مخزن خالی نسبت میرایی ویسکوز حدود ۵٪ به دست آورده شد. سپس مخزن با آب تا عمق $0/7 \text{ m}$ پر شد. همه آزمایش ها با استفاده از میز لرزه شش درجه آزادی انجام شدند. مؤلفه شمالی جنوبی رکورد زلزله ال سنتر و ۱۹۴۰ با فاکتور ۴ مقیاس زمان شده و به عنوان حرکت ورودی آزمایش میز لرزه در جهت افقی، عمود بر دیواره های بلند استفاده شد. تاریخچه زمان شتاب و ارتفاع تلاطم به دست آمده در مکان نشان داده شده در شکل ۲ از مدل عددی آباکوس و مدل آزمایشگاهی کو و همکارانش در شکل ۳ نشان داده شده است. در نمودارهای تاریخچه زمان شتاب و ارتفاع تلاطم به ترتیب تفاوت ۳/۵٪ و ۱٪ در مقادیر اولین شوک مشاهده می شود که بسیار رضایت بخش است. در نتایج مطالعه حاضر در تاریخچه خروجی های شتاب از فیلتر باترورث^۲ مرتبه دوم با فرکانس قطع $33/3 \text{ Hz}$ به منظور جلوگیری از بروز

رویکرد استفاده کننده از معادله حالت در شبیه سازی SPH سیالات تراکم ناپذیر به عنوان هیدرودینامیک ذرات هموار با تراکم پذیری کم^۱ اطلاق می شود. راه های دیگری برای حل کامل سیالات تراکم ناپذیر با روش SPH موجود است که خارج از بحث این مطالعه می باشد.

۴- مدل سازی عددی

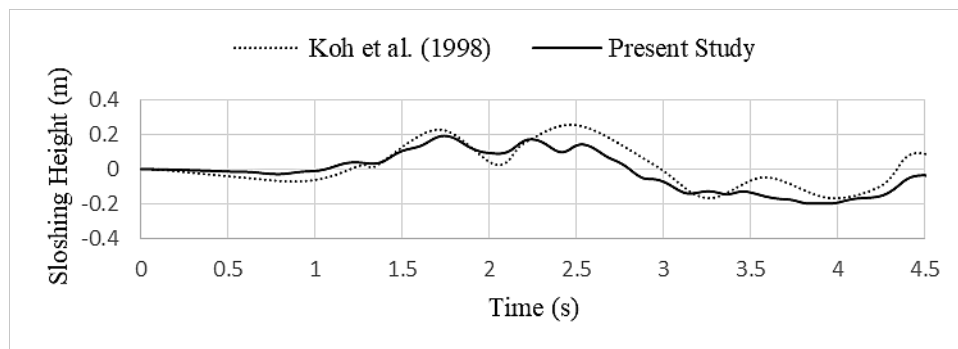
روش هیدرودینامیک ذرات هموار از طریق فرمول بندی همراه با المان های ذرات پیوسته (یا PC3D) به کار گرفته می شود. این المان های تک گرهی وسیله ای برای تعریف ذرات در فضا هستند که یک جسم یا اجسام مشخص (در این مطالعه محیط سیال) را مدل سازی می کنند. یک روش جایگزین برای تعریف مستقیم المان های PC3D تعریف مدل به وسیله المان محدود لاگرانژی و تبدیل خودکار آن ها به ذرات SPH در ابتدای تحلیل یا در حین آن است. در مطالعه حاضر سازه مخزن و محیط سیال با استفاده از المان C3D8R یعنی المان ۸ گرهی مکعبی یا آجری سه بعدی با فرمول بندی کاهش یافته مدل سازی شدند. سپس المان های محیط سیال بر اساس معیار زمان و در زمان صفر ثانیه (یا به عبارت دیگر ابتدای تحلیل) به المان های PC3D تبدیل شدند. به صورتی که در هر جهت المان مکعبی ۲ ذره تولید شود.

لازم به ذکر است که مشخصات مصالح تعریف شده در بخش تحلیل لرزه ای برای بتن: چگالی، 2400 kg/m^3 ؛ مدول یانگ، N/m^2 ؛ $2/1 \times 10^9$ ، با فرض رفتار خطی؛ و برای آب: مشخصات همانند بخش ۲-۳ با لزجت دینامیکی $\mu = 0/001 \text{ Pa.s}$ است.



شکل ۳. مقایسه تاریخچه زمان (a) ارتفاع تلاطم (b) شتاب آزمایش میز لرزه کو و همکارانش ۱۹۹۸ و مطالعه حاضر

Fig. 3. Comparison of (a) sloshing height time histories (b) acceleration time histories of Koh et al. (1998) shake table test and present study.



شکل ۴. مقایسه تاریخچه زمان ارتفاع تلاطم مدل عددی کو و همکارانش ۱۹۹۸ و مطالعه حاضر

Fig. 4. Comparison of sloshing height time history of Koh et al. (1998) numerical model and present study.

در اینجا نیز تفاوت ۱۲٪ در مقادیر شوک اول مشاهده می‌شود که رضایت‌بخش است.

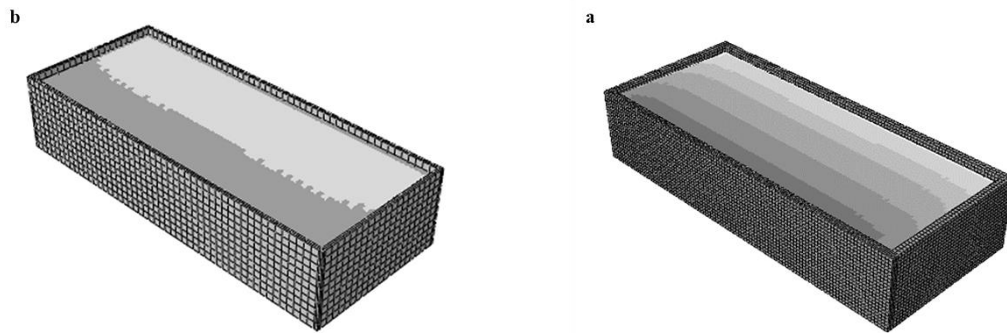
۶- تحلیل لرزه‌ای

برای بررسی تاثیر مؤلفه قائم و ضخامت دیواره بر روی رفتار دینامیکی مخازن از دو نوع مدل، که مدل اول از نظر مشخصات مصالح بتنی و هندسه کاملاً مشابه با مدل عددی کو و همکارانش و مدل دوم تنها با تغییر ضخامت دیواره به مقدار $t_w = 0.5 \text{ m}$ و مدل‌سازی شده‌است، استفاده شد (شکل ۵)؛ پارامترهای ارتفاع تلاطم در مکان نشان داده‌شده در شکل ۲، نیروی وارد بر عرض واحد وسط دیواره بلند، جابه‌جایی دیواره و همچنین برش پایه کل دیواره بلند برای مقایسه به‌دست آورده شدند. مشخصات رکوردهای زلزله‌های انتخاب شده مطابق جدول ۱ هستند:

رکوردهای افقی به شتاب بیشینه $0.35g$ و رکوردهای قائم به

فرکانس‌های اشتباه بالقوه در نتایج که باعث خسارت داده‌های معتبر می‌شوند استفاده شده‌است.

روش مدل‌سازی صورت‌گرفته در این مطالعه با مدل عددی کو و همکارانش نیز مقایسه‌شد. در مدل‌سازی کو و همکاران سازه مخزن به روش المان محدود و سیال به روش المان مرزی غیرمستقیم مدل شده‌اند. مشخصات مصالح بتنی استفاده شده برای یک مخزن متعارف ذخیره مایعات: چگالی، $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ ؛ مدول یانگ، N/m^2 ؛ $E = 21 \times 10^9$ ؛ و ضریب پواسون، $\nu = 0.17$ ؛ تعریف شده‌است. مدل بر اساس هندسه تعریف شده در شکل ۲: ارتفاع، $H = 10 \text{ m}$ ؛ ضخامت دیواره‌ها، $t = 1 \text{ m}$ ؛ طول، $L = 50 \text{ m}$ ؛ و عرض، 20 m ؛ $W_s =$ شبیه‌سازی گردیده‌است. این بار نیز مؤلفه شمالی جنوبی زلزله ال‌سنترو به‌عنوان حرکت ورودی به سازه اعمال شد. تاریخچه زمان ارتفاع تلاطم در وسط دیواره بلند مخزن با مدل‌سازی مطالعه حاضر همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده‌است مقایسه شد.



شکل ۵. مدل سازی انجام شده در نرم افزار آباکوس: (a) ضخامت دیواره ۱ m (b) ضخامت دیواره ۰/۵ m
 Fig. 5. Modelling done in ABAQUS software: (a) wall thickness of 1m (b) wall thickness of 0.5m.

جدول ۱. مشخصات حرکات زمین مورد مطالعه

Table 1. Characteristics of the ground motions in this study.

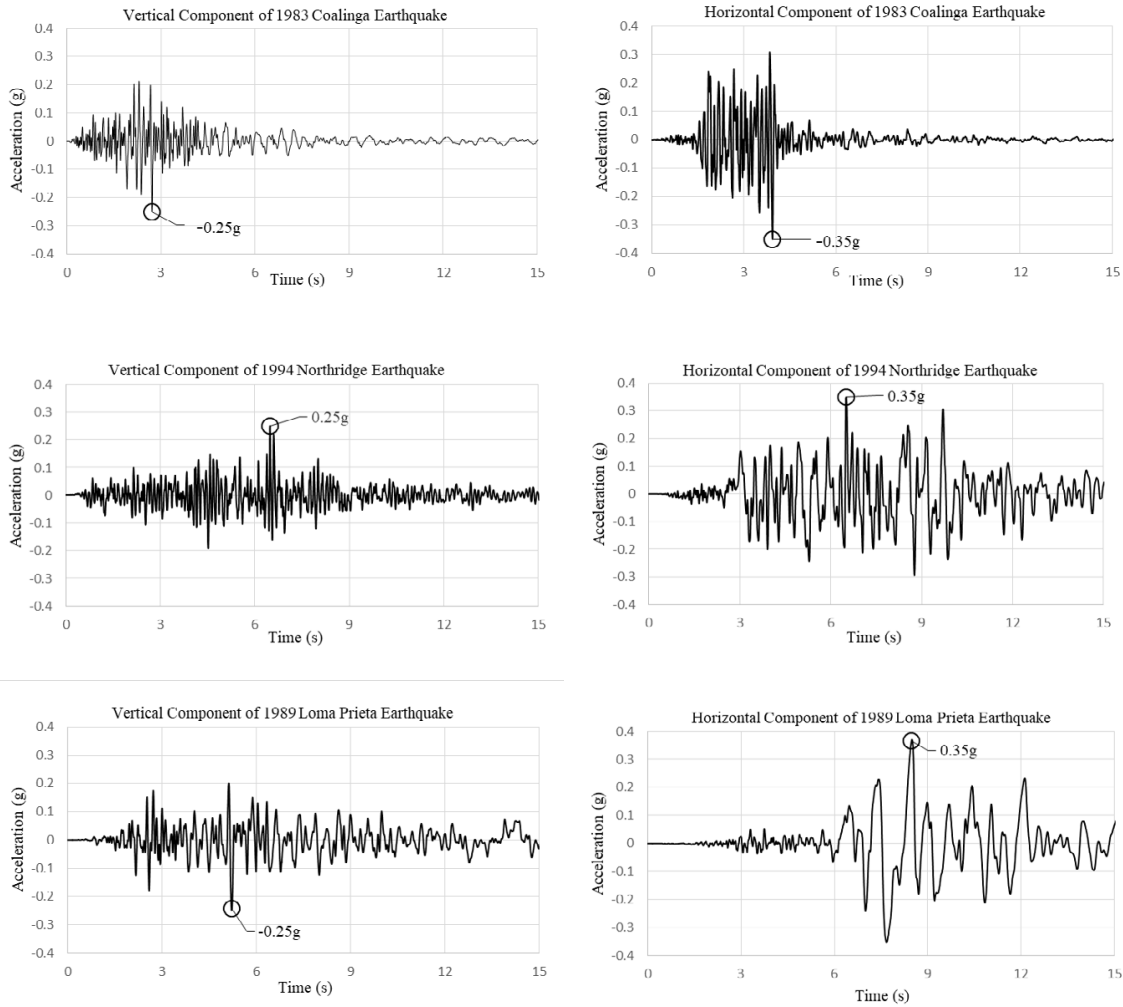
رکورد زلزله	ایستگاه	مؤلفه	رکورد /مؤلفه	شتاب بیشینه (g)
کولینگا ۱۹۸۳	1604 Oil City	افقی	COALINGA/C-OLC360	۰/۳۷۴
		قائم	COALINGA/C-OLC-UP	۰/۲۰۶
نورثریج ۱۹۹۴	90053 Canoga Park-Topanga Canyon	افقی	NORTHR/CNP106	۰/۳۵۸
		قائم	NORTHR/CNP-UP	۰/۴۹۳
لوما پریتا ۱۹۸۹	47524 Hollister-South & Pine	افقی	LOMAP/HSP000	۰/۳۷۰
		قائم	LOMAP/HSP-UP	۰/۱۹۷

قدرمطلق ارتفاع تلاطم از ۷ cm به ۲/۱ cm، تحت زلزله نورثریج باعث افزایش قدرمطلق ارتفاع تلاطم از ۱۳/۸ cm به ۱۴/۷ cm و تحت زلزله لوما پریتا باعث افزایش قدرمطلق ارتفاع تلاطم از ۳۳/۷ cm به ۴۲/۳ cm می شود. در این بین می توان گفت تغییرات نسبی بیشینه مربوط به زلزله کولینگا بوده که باعث کاهش ۷۰٪ ارتفاع تلاطم می شود. از طرفی با در نظرگیری مؤلفه قائم کاهش ضخامت دیواره از ۱ m به ۰/۵m تحت زلزله کولینگا باعث کاهش قدرمطلق ارتفاع تلاطم از ۶/۳ cm به ۳/۴ cm، تحت زلزله نورثریج باعث افزایش قدرمطلق ارتفاع تلاطم از ۱۰/۶ cm به ۱۵/۱ cm و تحت زلزله لوما پریتا باعث افزایش قدرمطلق ارتفاع تلاطم از ۳۳/۸ cm به ۴۰/۷ cm می شود. که در اینجا نیز بیشترین تغییرات نسبی مربوط به زلزله کولینگا است که باعث کاهش ۴۶٪ ارتفاع تلاطم می شود. در حالی تغییرات مربوط به زلزله کولینگا دارای بیشترین تغییرات نسبی در دو حالت است که بیشترین تغییرات مطلق مربوط به زلزله لوما پریتا بوده که با در نظر گرفتن مؤلفه قائم ۲۶٪ و بدون در نظر

شتاب بیشینه ۰/۲۵g مقیاس شدند؛ تاریخچه زمان شتاب رکوردها پس از اعمال مقیاس در شکل ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که پیوند غالب رکوردهای افقی، که خود نمایانگر محدوده فرکانسی متفاوت این رکوردها است در شکل ۶ قابل تشخیص است. زلزله لوما پریتا دارای پیوند غالب بالا، زلزله نورثریج دارای پیوند غالب متوسط و زلزله کولینگا دارای پیوند غالب پایین است. پارامترهای دامنه و پیوند غالب رکوردها پس از اعمال مقیاس شتاب در جدول ۲ آورده شده اند:

۱-۶- ارتفاع تلاطم

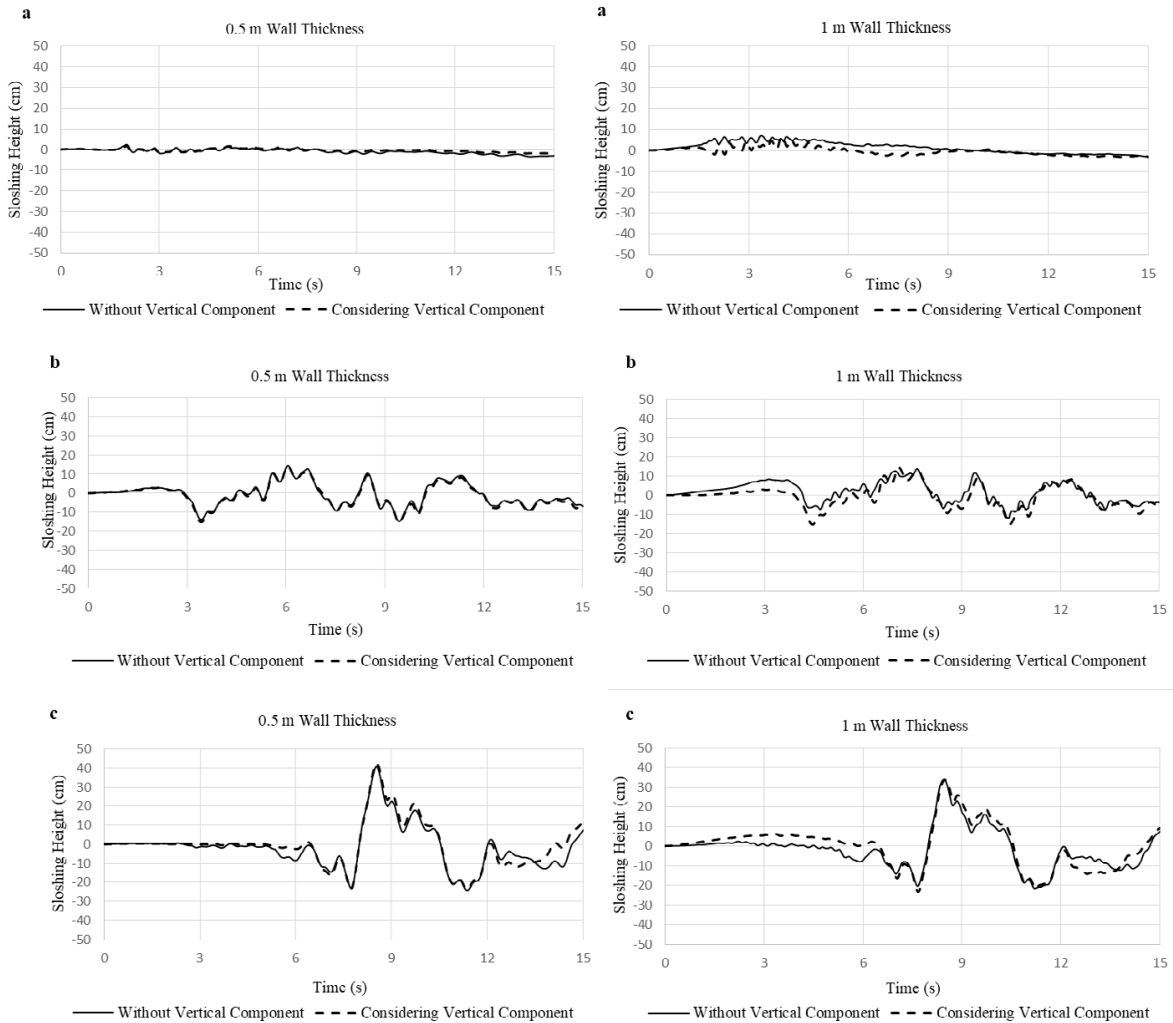
تلاطم ناشی از شتاب قائم، مربوط به تغییر ارتعاش دیواره ها است که با توجه به خروجی های ارائه شده در شکل ۷ بر روی ارتفاع تلاطم اثر کمی داشته در حالی که تغییر ضخامت دیواره ها اثر به سزایی در ارتفاع تلاطم دارد. به طوری که کاهش ضخامت دیواره از ۱ m به ۰/۵m بدون در نظرگیری مؤلفه قائم تحت زلزله کولینگا باعث کاهش



شکل ۶. تاریخچه زمان‌های شتاب‌های افقی و قائم استفاده‌شده در این مقاله پس از اعمال مقیاس
Fig. 6. Vertical and horizontal accelerations time histories used in this paper after scaling.

جدول ۲. پارامترهای دامنه و پریود غالب رکورد‌های انتخاب‌شده پس از اعمال مقیاس
Table 2. Predominant period and amplitude of chosen records after scaling.

زلزله	مؤلفه	حداکثر شتاب (g)	زمان حداکثر شتاب (s)	حداکثر سرعت (cm/s)	زمان حداکثر سرعت (s)	حداکثر جابه‌جایی (cm)	زمان حداکثر جابه‌جایی (s)	پریود غالب (s)
کولینگا ۱۹۸۳	افقی	۰/۳۵	۳/۹۳	۹/۵۴	۱/۸۲۵	۰/۷۵	۱/۸۸۰	۰/۱۴
	قائم	۰/۲۵	۲/۷۲	۶/۳۳	۲/۶۹	۰/۶۴	۲/۷۲۵	۰/۱۶
نورث‌ریج ۱۹۹۴	افقی	۰/۳۵	۶/۵۱	۳۳/۰۱	۸/۲۵۰	۸/۲۰	۸/۵۰۰	۰/۲۸
	قائم	۰/۲۵	۶/۴۸	۶/۷۸	۸/۶۷	۱/۵۱	۶/۹۵	۰/۱۲
لوما پریتا ۱۹۸۹	افقی	۰/۳۵	۸/۴۹۵	۵۹/۵۹	۷/۵۳۵	۳۰/۵۶	۷/۷۶۵	۰/۵۴
	قائم	۰/۲۵	۵/۲۲	۶/۳۸	۱۳/۷۸	۸/۸۹	۱۴/۲۷	۰/۱۴



شکل ۷. تاریخچه زمان‌های ارتفاع تلاطم با در نظر گرفتن مؤلفه قائم و بدون در نظر گیری آن تحت رکورد زلزله (a) کولینگا ۱۹۸۳ (b) نورثریج ۱۹۹۴ (c) لوما پریتا ۱۹۸۹

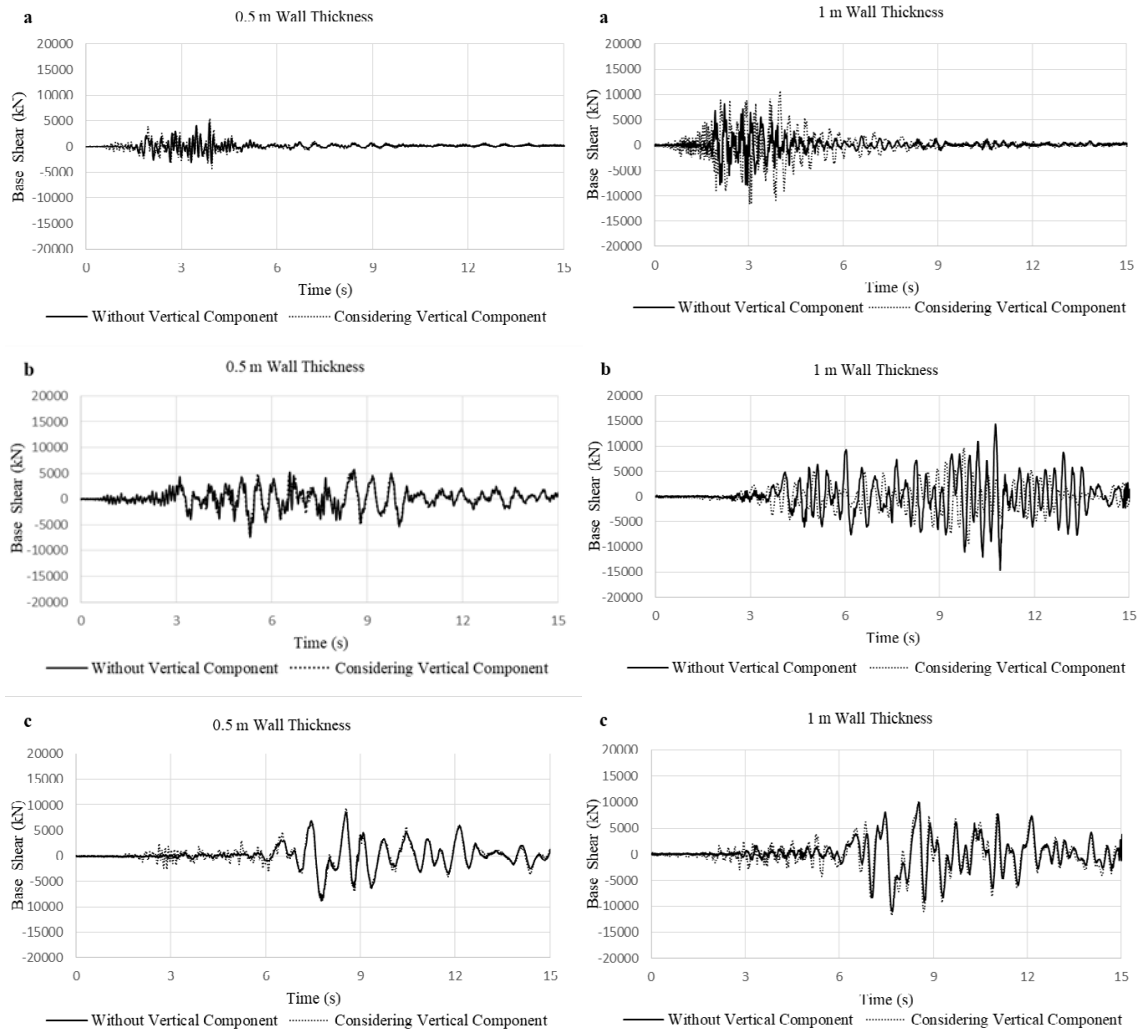
Fig. 7. Sloshing height time histories with and without considering vertical component of (a) Coalinga 1983 (b) Northridge 1994 (c) Loma Prieta 1989 earthquakes.

افزایش حداکثر قدرمطلق برش پایه از ۸۱۹۳ kN به ۱۱۵۶۲ kN، تحت زلزله نورثریج باعث کاهش حداکثر قدرمطلق برش پایه از ۱۴۶۱۶ kN به ۹۷۴۷ kN و تحت زلزله لوما پریتا باعث افزایش حداکثر قدرمطلق برش پایه از ۱۱۰۳۶ kN به ۱۱۶۷۱ kN می‌گردد. از طرفی در نظرگیری مؤلفه قائم در تحلیل مدل با ضخامت دیواره ۰/۵ m تحت زلزله کولینگا باعث افزایش حداکثر قدرمطلق برش پایه از ۴۶۷۰ kN به ۵۴۵۵ kN، تحت زلزله نورثریج باعث افزایش قدرمطلق برش پایه از ۶۸۷۱ kN به ۷۴۰۹ kN و تحت زلزله لوما پریتا باعث افزایش حداکثر قدرمطلق برش پایه از ۸۸۶۷ kN به ۹۴۳۸ kN می‌گردد. مشاهده می‌شود که در نظرگیری مؤلفه قائم می‌تواند بازه

گرفتن آن ۲۰٪ افزایش ارتفاع تلاطم مشاهده شده‌است. هم‌چنین در مقایسه بین رکوردها مشخص است که با افزایش پریود غالب پاسخ تلاطم نیز افزایش پیدا کرده‌است.

۶-۲- برش پایه

تغییر ضخامت دیواره‌ها باعث تغییر در سختی و جرم سازه و در نتیجه تغییر در نیروها می‌شود. با توجه به شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد که کاهش ضخامت دیواره‌ها از ۱ m به ۰/۵ m در همه موارد باعث کاهش بازه تغییرات برش پایه می‌شود؛ در نظرگیری مؤلفه قائم در تحلیل مدل با ضخامت دیواره ۱ m تحت زلزله کولینگا باعث



شکل ۸. تاریخچه زمان های برش پایه با در نظر گرفتن مؤلفه قائم و بدون در نظرگیری آن تحت رکورد زلزله (a) کولینگا ۱۹۸۳ (b) نورتریج ۱۹۹۴ (c) لوما پریتا ۱۹۸۹

Fig. 8. Base shear time histories with and without considering vertical component of (a) Coalinga 1983 (b) Northridge 1994 (c) Loma Prieta 1989 earthquakes

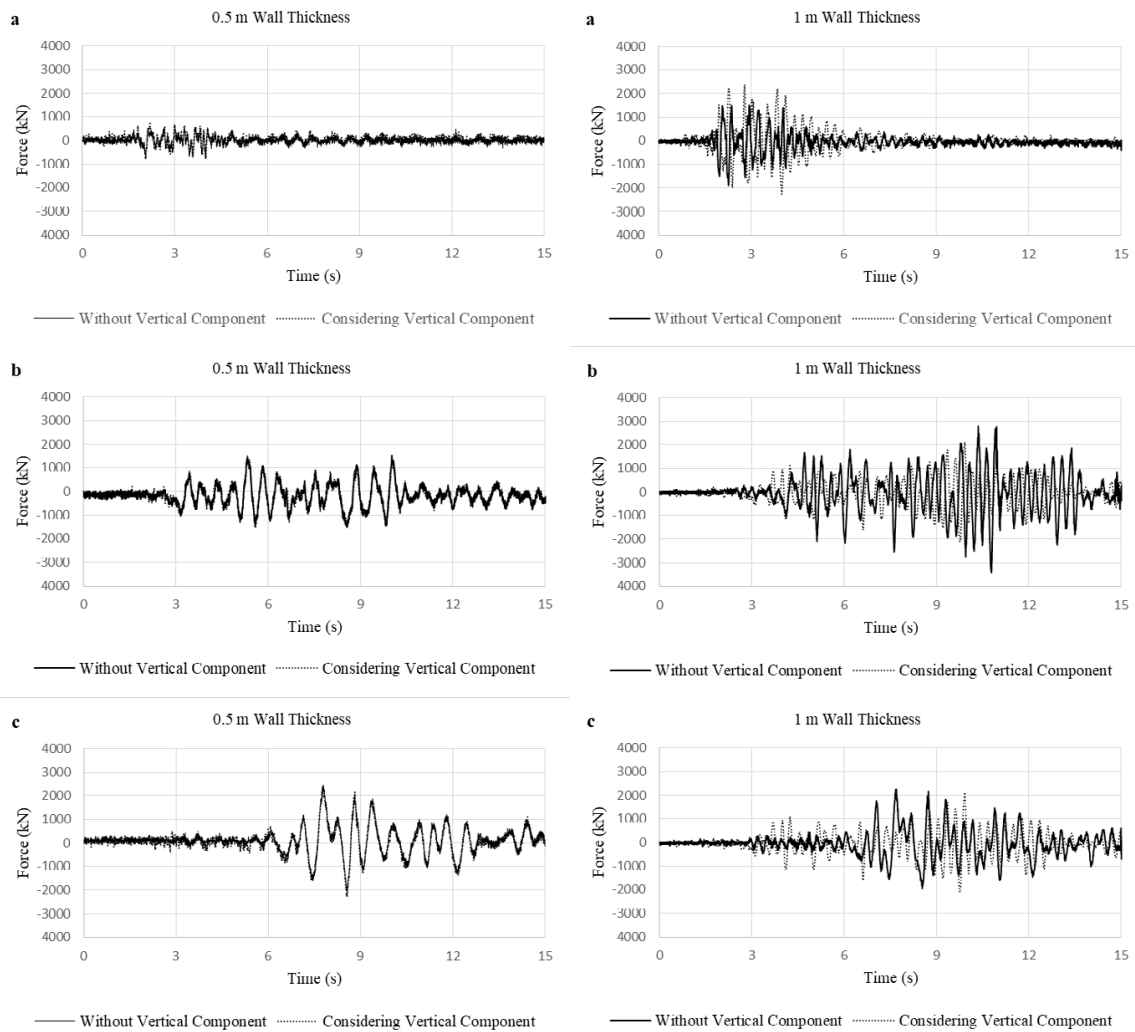
رکورد زلزله لوما پریتا باعث افزایش نیروی در عرض واحد چه با در نظر گرفتن مؤلفه قائم (۵٪) چه بدون در نظر گرفتن آن (۸٪) می شود؛ در حالی که این تغییر باعث کاهش برش پایه در هر دو حالت با در نظر گرفتن مؤلفه قائم (۱۹٪) و بدون در نظر گرفتن (۲۰٪) آن شد. این اثر انعطاف پذیر در نظر گرفتن دیواره های عمود بر راستای زلزله (دیواره های کوتاه) و اثر این انعطاف پذیری، بر انعطاف پذیری دیواره بلند است که باعث تغییر پاسخ در گوشه های مخزن می شود.

در نظرگیری مؤلفه قائم در تحلیل مدل با ضخامت دیواره ۱ m تحت زلزله کولینگا باعث افزایش حداکثر قدرمطلق نیروی در عرض

تغییرات برش پایه را افزایش یا کاهش دهد، و این تغییرات بر روی مدل با ضخامت دیواره ۱ m، بیشتر هستند. که بیشترین کاهش تحت رکورد زلزله نورتریج، به مقدار ۳۳٪ و بیشترین افزایش تحت رکورد زلزله کولینگا به مقدار ۴۲٪ است.

۶-۳- نیرو در عرض واحد

این پارامتر مقدار نیروی عمود بر وسط دیواره بلند که در نواری قائم به عرض ۱ m اثر می کند را نشان می دهد. با توجه به شکل ۹، کاهش ضخامت دیواره ها از ۱ m به ۰/۵ m در تحلیل تحت



شکل ۹. تاریخچه زمان‌های نیرو در عرض واحد با در نظر گرفتن مؤلفه قائم و بدون در نظر گیری آن تحت رکورد زلزله (a) کولینگا ۱۹۸۳ (b) نورثریج ۱۹۹۴ (c) لوما پریتا ۱۹۸۹

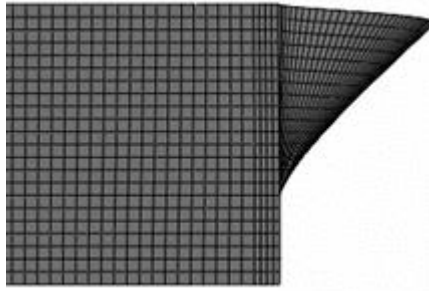
Fig. 9. Force in unit width time histories with and without considering vertical component of (a) Coalinga 1983 (b) Northridge 1994 (c) Loma Prieta 1989 earthquakes.

به 2376 kN می‌گردد.

۶-۴- جابه‌جایی دیواره بلند مخزن

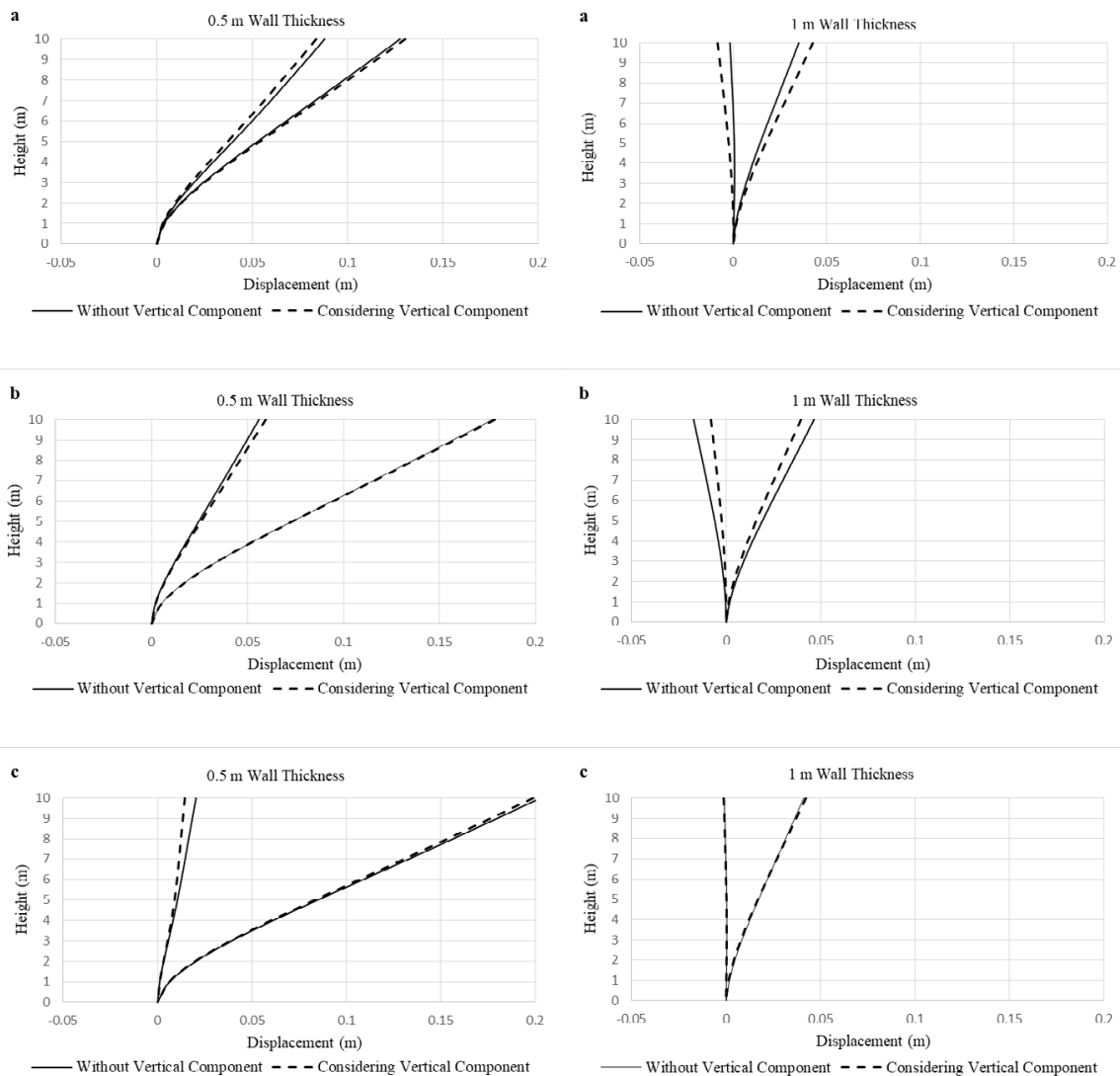
حداکثر جابه‌جایی دیواره در طول زمان تحلیل در وسط دیواره بلند مخزن اتفاق می‌افتد که برای درک بهتر، جابه‌جایی این دیواره (مقیاس شده با فاکتور ۵۰۰ در جهت افقی) در مدل با ضخامت ۱ m در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است؛ بازه جابه‌جایی این دیواره در طول تحلیل در شکل ۱۱ به صورت شماتیک نشان داده شده‌است به این معنی که دیواره در بین نمودارهای نشان داده شده در طول

واحد از 1880 kN به 2360 kN ، تحت زلزله نورثریج باعث کاهش حداکثر قدرمطلق نیروی در عرض واحد از 3412 kN به 2107 kN و تحت زلزله لوما پریتا حداکثر قدرمطلق نیروی در عرض واحد در مقدار 2256 kN حدوداً ثابت می‌ماند. از طرفی در نظرگیری مؤلفه قائم در تحلیل مدل با ضخامت دیواره 0.5 m تحت زلزله کولینگا باعث کاهش حداکثر قدرمطلق نیروی در عرض واحد از 851 kN به 784 kN ، تحت زلزله نورثریج حداکثر قدرمطلق نیروی در عرض واحد تقریباً بدون تغییر و برابر با 1524 kN و تحت زلزله لوما پریتا باعث افزایش قدرمطلق حداکثر نیروی در عرض واحد از 2449 kN



شکل ۱۰. جابه‌جایی دیواره بلند مخزن در مدل با ضخامت ۱ m که با فاکتور ۵۰۰ در جهت افقی مقیاس شده‌است.

Fig. 10. Long sidewall displacement in the model with 1m wall thickness, scaled with the factor of 500 in horizontal direction.



شکل ۱۱. جابه‌جایی‌های دیواره بلند مخزن با در نظر گرفتن مؤلفه قائم و بدون در نظر گیری آن تحت رکورد زلزله (a) کولینگا ۱۹۸۳ (b) نورتریج ۱۹۹۴ (c) لوما پریتا ۱۹۸۹

Fig. 11. Long sidewall displacement with and without considering vertical component of (a) Coalinga 1983 (b) Northridge 1994 (c) Loma Prieta 1989 earthquakes.

برش پایه نیز بشود، که این تغییرات بر روی مدل با ضخامت دیواره m ۱، بیشتر هستند؛ بیشترین کاهش حداکثر قدرمطلق برش پایه تحت رکورد زلزله نورثریج، به مقدار ۳۳٪ و بیشترین افزایش آن تحت رکود زلزله کولینگا به مقدار ۴۲٪ اتفاق می‌افتد. پس مؤلفه قائم حرکات زمین باید در تحلیل مخازن ذخیره سیال در نظر گرفته شوند.

۴- انعطاف‌پذیر در نظر گرفتن دیواره‌های موازی با راستای زلزله بر روی انعطاف‌پذیری دیواره‌های عمود بر این راستا اثر گذار هستند که مقدار این اثر در گوشه دیواره‌ها بزرگ‌تر است؛ به‌طوری که با کاهش ضخامت دیواره‌ها از m ۱ به m ۰/۵ در تحلیل تحت رکورد زلزله لوما پریتا باعث افزایش نیروی در عرض واحد چه با در نظر گرفتن مؤلفه قائم (۵٪) چه بدون در نظر گرفتن آن (۸٪) می‌شود؛ در حالی که این تغییر باعث کاهش برش پایه در هر دو حالت با در نظر گرفتن مؤلفه قائم (۱۹٪) و بدون در نظر گرفتن (۲۰٪) آن شد.

۵- در نظرگیری مؤلفه قائم بازه جابه‌جایی دیواره‌ها را در تحلیل تحت رکورد زلزله نورثریج، در هر دو مدل کاهش و در دیگر تحلیل‌ها افزایش داد. که این کاهش خود ناشی از کاهش برش پایه است. همچنین به‌علت وجود فشار آب جابه‌جایی‌ها به سمت خارج مخزن مقادیر بسیار بیشتری دارند و در هیچ یک از تحلیل‌های مدل با ضخامت دیواره m ۰/۵ جابه‌جایی به سمت داخل مخزن رخ نمی‌دهد. در حالی که در تحلیل همه مدل‌ها با ضخامت دیواره m ۱ جابه‌جایی به سمت داخل مخزن رخ داده‌است.

۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی

c_0	سرعت صوت در ماده، m/s
E	مدول یانگ، N/m^2
E_m	انرژی داخلی بر واحد جرم، J/kg
f	تابع پیوسته، -
\bar{F}	ترم نیروهای خارجی، m/s^2
h	شعاع هموارساز، m
H	ارتفاع دیواره‌های مخزن، m
k	ضریب تعیین مقدار دامنه تکیه‌گاه، -
L	طول مخزن، m
m	جرم، kg
p	فشار، N/m^2

زمان زلزله نوسان می‌کند. لازم به ذکر است که در این نمودارها خط $x = 0$ مکان اولیه دیواره مخزن خالی است. مشاهده می‌شود که در نظرگیری مؤلفه قائم در تحلیل تحت رکورد زلزله نورثریج باعث کاهش بازه جابه‌جایی دیواره در هر دو مدل می‌شود درحالی‌که در تحلیل تحت دو رکورد دیگر این بازه افزایش پیدا کرده‌است. می‌توان دریافت که مشخصاً به‌دلیل وجود فشار آب جابه‌جایی‌ها به سمت خارج مخزن مقادیر بسیار بالاتری دارند و در مدل با ضخامت m ۰/۵ هیچ یک از رکوردها چه با احتساب مؤلفه قائم چه بدون احتساب آن، نیرویی که باعث جابه‌جایی به سمت داخل مخزن شود ایجاد نخواهد شد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن و اثر انعطاف‌پذیری دیواره‌ها، در دو حالت بدون در نظرگیری مؤلفه قائم و با در نظرگیری آن پرداخته شد. شتاب نگاشت‌های مؤلفه افقی و قائم به‌ترتیب به مقدار g ۰/۳۵ و g ۰/۲۵ مقیاس شدند. دو مخزن با ضخامت دیواره‌های m ۰/۵ و m ۱ مدل‌سازی شدند و هر کدام یک بار تحت رکورد افقی و بار دیگر تحت اثر توأم مؤلفه افقی و قائم تحلیل شدند. پارامترهای ارتفاع تلاطم، جابه‌جایی دیواره بلند، برش پایه دیواره بلند و نیرو در عرض واحد برای مقایسه رفتار مخازن به‌دست آورده شدند. نتایج بیانگر رفتار مستقل تلاطم آب از سازه مخزن هستند. به‌طور خلاصه از مطالعه حاضر نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱- تلاطم ناشی از شتاب عمودی مربوط به ارتعاش دیواره‌ها است که مقدار آن برای هر دو مدل ناچیز است؛ و با افزایش پررود غالب رکورد افقی، ارتفاع تلاطم افزایش پیدا می‌کند.

۲- با تغییر ضخامت دیواره‌ها ارتفاع تلاطم تغییرات قابل توجهی می‌کند؛ به‌طوری‌که در تحلیل تحت رکورد زلزله کولینگا بدون در نظر گرفتن مؤلفه قائم با تغییر ضخامت دیواره‌ها از m ۱ به m ۰/۵ بیشترین تغییر نسبی ارتفاع تلاطم به مقدار ۷۰٪ (از cm ۷ به cm ۲/۱) مشاهده شد؛ و حداکثر مطلق این تغییر در مورد زلزله لوما پریتا بدون در نظرگیری مؤلفه قائم به مقدار ۲۶٪ (از cm ۳۳/۷ به cm ۴۲/۳) است. در حالی که در صورت صلب فرض کردن دیواره‌ها پاسخ یکسان به‌دست می‌آمد.

۳- در نظرگیری مؤلفه قائم می‌تواند باعث کاهش بازه تغییرات

- [6] J. Chen, M. Kianoush, Design procedure for dynamic response of concrete rectangular liquid storage tanks using generalized SDOF system, Canadian Journal of Civil Engineering, 11(42) (2015) 965-960.
- [7] A.C. Institute, Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary, in: ACI 350.3, Farmington Hills, MI, 2006, pp. 17.
- [8] M. Kianoush, J. Chen, Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks, Engineering Structures, 5(28) (2006) 715-704.
- [9] M.A. Goudarzi, S.R. Sabbagh-Yazdi, Investigation of nonlinear sloshing effects in seismically excited tanks, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 43 (2012) -355 365.
- [10] L.B. Lucy, A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, The astronomical journal, 82 (1977) 1024-1013.
- [11] R.A. Gingold, J.J. Monaghan, Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, Monthly notices of the royal astronomical society, 3(181) (1977) 389-375.
- [12] R.A. Gingold, J.J. Monaghan, Binary fission in damped rotating polytropes, Monthly notices of the royal astronomical society, 3(184) (1978) 499-481.
- [13] J.J. Monaghan, Why particle methods work, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 4(3) (1982) 433-422.
- [14] W. Benz, J.G. Hills, Three-dimensional hydrodynamical simulations of stellar collisions. I-Equal-mass main-sequence stars, The Astrophysical Journal, 323 (1987) 628-614.
- [15] W.L. Slattery, W. Benz, A. Cameron, Giant impacts on a primitive Uranus, Icarus, 1(99) (1992) 174-167.
- [16] R. Gingold, J. Monaghan, Kernel estimates as a basis for general particle methods in hydrodynamics, Journal of Computational Physics, 3(46) (1982) 453-429.
- [17] J. Monaghan, Particle methods for hydrodynamics, Computer Physics Reports, 2(3) (1985) 124-71.
- [18] J.J. Monaghan, Smoothed particle hydrodynamics, Annual review of astronomy and astrophysics, 1(30)

شیب هیوگونیوت شوک، -	s
بردار مکان، -	r
شعاع دامنه تکیه گاه، m	$R_{s, domain}$
زمان، s	t
ضخامت دیواره‌های مخزن، m	t_w
سرعت جریان، m/s	\bar{v}
ترم لزجت، m/s^2	V_t
تابع هموارساز، $1/m^3$	W
عرض مخزن، m	W_s

علائم یونانی

ثابت ماده، -	Γ
کرنش فشاری حجمی اسمی، -	η
لزجت دینامیکی، Pa.s	μ
ضریب پواسون، -	ν
چگالی، kg/m^3	ρ
چگالی اولیه ماده، kg/m^3	ρ_0
مقدار برای ذره مورد نظر	i
مقدار برای ذرات مجاور	j

زیرنویس

مراجع

- [1] G.W. Housner, The dynamic behavior of water tanks, Bulletin of the Seismological Society of America, 2(53) (1963) 387-381.
- [2] M.A. Haroun, Vibration studies and tests of liquid storage tanks, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2(11) (1983) 206-179.
- [3] J.K. Kim, H.M. Koh, I.J. Kwahk, Dynamic response of rectangular flexible fluid containers, Journal of Engineering Mechanics, 9(122) (1996) 817-807.
- [4] H.M. Koh, J.K. Kim, J.-H. Park, Fluid-structure interaction analysis of 3-D rectangular tanks by a variationally coupled BEM-FEM and comparison with test results, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2(27) (1998) 124-109.
- [5] J. Chen, M. Kianoush, Generalized SDOF system for seismic analysis of concrete rectangular liquid storage tanks, Engineering Structures, 10(31) (2009) 2435-2426.

- [20] M.D. Green, J. Peiró, Long duration SPH simulations of sloshing in tanks with a low fill ratio and high stretching, *Computers & Fluids*, 174 (2018) 199-179.
- [19] J.J. Monaghan, Simulating free surface flows with SPH, *Journal of Computational Physics*, 2(110) (1994) 406-399.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Rassoulpour, M. Safi, Effect of Vertical Component of Earthquake on Concrete Storage Tanks with Flexible Walls Using Coupled Finite Element and Smoothed Particle Hydrodynamics Method, Amirkabir J. Civil Eng., 52(4) (2020) 873-888.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15153.5841](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15153.5841)



