



## بررسی اثر مقاطع مختلف دیوارها بر روی پاسخ های دینامیکی مخازن مستطیلی ذخیره آب

امیر صمد قدس<sup>۱</sup>، محمد رضا اصفهانی<sup>۲</sup>، سینا سینایی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه دانشگاه فردوسی مشهد و عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

۲- استاد گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

۳- کارشناس ارشد سازه

asamadgh@yahoo.com  
esfahani@ferdowsi.um.ac.ir  
sina\_sinaie@yahoo.com

### خلاصه

مخازن ذخیره آب بایستی پس از وقوع زلزله نیز قابل استفاده باشند زیرا برآورد کننده نیازهای اولیه از جمله آبرسانی در زمان آتش نشانی و تأمین کننده آب مصرفی مردم می باشند. بنابراین درک صحیح از رفتار لرزه ای این نوع سازه ها هم برای ایمن بودن آنها و هم برای کاهش هزینه های نگهداری ضروری می باشد. محاسبه فشار هیدرودینامیکی مهمترین مسئله در تحلیل سیستم های آب و سازه می باشد که در آیین نامه ها فشار هیدرولیکی آب بر روی بدنه مخزن با فرض صلب بودن دیوارها بدست آمده است. در این مقاله به منظور در نظر گرفتن اثر انعطاف پذیری دیوارها در محاسبه فشار هیدرودینامیکی و هم در تحلیل دینامیکی سازه از روش المان محدود به صورت حل گام به گام استفاده شده است. بنابراین دیوارهای مخازن مستطیلی با مقاطع مختلف منشوری و غیر منشوری مدل گردیده و پس از تحلیل تاریخچه زمانی تحت شتاب افقی زمین، پاسخ های دینامیکی شامل تغییر مکان ها، برش های پایه و فشارهای هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته اند.

کلمات کلیدی: فشارهای هیدرودینامیکی، انعطاف پذیری دیوارها، المان محدود

### ۱. مقدمه

طراحی، ساخت و نگهداری مخازنی که برای ذخیره سازی آب مورد استفاده قرار می گیرند با توجه به رشد فزاینده جمعیت و توسعه شهرها، از اهمیت بسزایی برخوردار است. به دلیل فقدان ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه، ساخت این مخازن از وضعیت مطلوبی برخوردار نمی باشد. با توجه به کاربرد این سازه ها بررسی رفتارشان در هنگام زلزله بسیار مهمتر از مباحث اقتصادی آن می باشد. حجم زیادی از مطالعات انجام شده در ارتباط با تخمین فشار هیدرودینامیکی در مخازن و سدها به گونه ای بوده است که از اثر اندرکنش آب و سازه صرف نظر شده به طوریکه اثر آنها به صورت نیروها و جرم افزوده در نظر گرفته شده است. ولی هنگامی که دوره تناوب ارتعاشی سازه از آب کمتر باشد، بررسی اندرکنش سازه و آب اهمیت زیادی پیدا می کند. محاسبه فشار هیدرودینامیکی مهمترین مسئله در تحلیل سیستم های آب و سازه است. اثر فشار هیدرودینامیکی بر روی سازه از مدت ها پیش مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. وسترگارد [1] اولین راه حل را برای یک سد عمودی تحت شتاب افقی ارائه کرد. وسترگارد نشان داد که فشار هیدرودینامیکی اعمال شده بر روی سطح به علت زلزله ناشی از حرکت زمین، معادل نیروی اینرسی جسم آب قرار گرفته بر روی سد است. پس از آن هاسنر [2] یک روش تقریبی برای تعیین فشار هیدرودینامیکی ناشی از شتاب افقی را ارائه داد و فرض کرد که مایع درون مخزن تراکم ناپذیر بوده و دیوارهای آن صلب می باشد. این روش در بسیاری از آیین نامه ها جهت محاسبه فشار هیدرودینامیکی مخازن وارد شده است. طبق تئوری هاسنر، مدل دینامیکی مایعات که در درون یک مخزن با جدار سخت قرار دارند، یک مدل با دو درجه آزادی می باشد. در این مدل  $m_1$  آن قسمت از جرم مایع درون مخزن است که به همراه مخزن ارتعاش پیدا می کند و جرم سخت نامیده می شود.  $m_2$  آن قسمت از مایع درون مخزن است که به طور مستقل با زمان تناوبی به مراتب بزرگتر از زمان تناوب قسمت سخت و سازه نوسان می کند و جرم موج نامیده می شود. بر این اساس فشار هیدرودینامیکی با جرم های افزوده تقریب زده شده است. به این صورت که جرم افزوده ناشی از فشار جرم سخت را به صورت میله های صلب و جرم افزوده ناشی از فشار هیدرودینامیکی

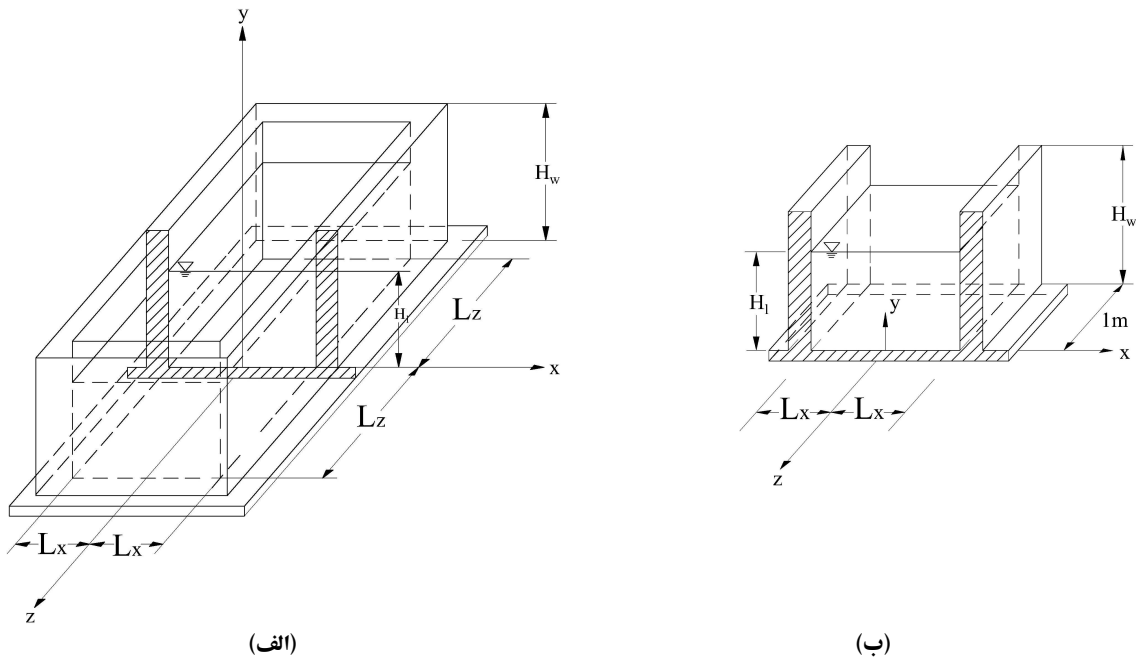


جرم موج را توسط فنرهایی بر جداره مخزن قرار داد. پس از وقوع زلزله شدید در کشور آمریکا و ژاپن مخازن ذخیره آب دچار خسارات زیادی شدند. این مسئله منجر به آن شد که محققین دریابند که صلب در نظر گرفتن دیوارها مدل صحیحی نمی باشد زیرا که دیوارهای مخزن در حین زلزله تغییر شکل های قابل توجهی می دهد. بنابراین مدل هایی توسط آمبرسون [3]، چیبا و همکاران [4] و ابرل و همکاران [5] ارائه شد که در این آنها تغییر شکل دیوارها در نظر گرفته شده است.

با در نظر گرفتن انعطاف پذیری دیوار در مطالعات عددی اثر اندرکنش آب و سازه در مخازن وارد شد که اکثر این تحقیقات از جمله ولتس [6] و هارون و هاسنر [7] برای مخازن استوانه ای بوده است. یکی از پژوهش های صورت گرفته در تحلیل دینامیکی مخازن مستطیلی ذخیره آب توسط کیم و پارک و همکاران [8,9] می باشد. در این پژوهش یک روش حل عددی برای بدست آوردن پاسخ های دینامیکی مخازن مستطیلی تحت اثر تحریک افقی و قائم زمین ارائه شده است که در محاسبه پاسخ ها از روش ترکیبی المان محدود و المان مرزی، اندرکنش آب و سازه در نظر گرفته شده است. همچنین چن و کیانوش [10,11] یک روش حل تکراری را برای محاسبه فشار هیدرو دینامیکی بر روی دیوارهای مخازن مستطیلی با در نظر گرفتن اثر انعطاف پذیری دیوارها پیشنهاد نموده اند. در بالا بردن دقت تحلیل دینامیکی مخازن ذخیره آب علاوه بر در نظر گرفتن انعطاف پذیری دیوارها، بررسی مشخصه ها و رفتار ارتعاشی سیستم آب و سازه نیز دارای اهمیت می باشد.

## ۲. فشار هیدرو دینامیکی ناشی از شتاب افقی

شکل (۱-الف) یک مخزن مستطیلی سه بعدی را نشان می دهد که فرض شده به صورت صلب بر روی شالوده قرار گرفته است. در صورتیکه فرض شود نسبت طول به عرض بسیار زیاد است می توان طول واحد از مخزن را مطابق شکل (۱-ب) در نظر گرفت. در این مدل دیوارهای مخزن رفتار یک عضو طره ای را دارند. قابل توجه است که  $L_x$  و  $L_z$  به ترتیب به موازات و عمود بر راستای زلزله در نظر گرفته شده اند. ارتفاع مایع  $H_l$  از کف مخزن بوده و مایع به صورت غیر قابل تراکم پذیر و با چگالی  $\rho_l$  فرض شده است.



شکل ۱- هندسه مخزن مستطیلی (الف) مدل سه بعدی و (ب) مدل دو بعدی

شکل (۱-ب) هندسه مخزن با عرض  $L = 2L_x$  و عمق مایع  $H_l$  در یک مخزن مستطیل دو بعدی را نشان می دهد. معادله دیفرانسیلی جزئی حاکم به صورت زیر است [10].

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$



که در آن  $\phi$  تابع پتانسیل سرعت است. مؤلفه های سرعت در دو جهت  $x$  و  $y$  به ترتیب  $v_x = \partial\phi/\partial x$  و  $v_y = \partial\phi/\partial y$  می باشد. فشار هیدرودینامیکی  $p$  به صورت رابطه (۲) است.

$$p(x, y, t) = -\rho_1 \frac{\partial\phi(x, y, t)}{\partial t} \quad (2)$$

برای فشار ناشی از جرم سخت شرایط مرزی به صورت زیر می باشد.  
در سطح آزاد مایع  $y = H_1$  فشار مایع ثابت برابر صفر است.

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}(x, H_1, t) + g \frac{\partial\phi}{\partial y}(x, H_1, t) = 0 \quad (3)$$

در کف مخزن  $y = 0$  سرعت قائم به علت حرکت افقی صفر می شود.

$$\frac{\partial\phi}{\partial y}(x, 0, t) = 0 \quad (4)$$

در سطح آب و در مکان تماس آب با بدنه ( $x = \pm L_x$ ) رابطه زیر برقرار است.

$$\frac{\partial\phi}{\partial x}(\pm L_x, y, t) = \dot{u}(t) = \dot{u}_g(t) + \dot{u}_r(t) \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $\dot{u}_g(t)$  سرعت حرکت افقی زمین و  $\dot{u}_r(t)$  سرعت نسبی زمین به علت انعطاف پذیر بودن دیوارها می باشد. پس از جایگذاری شرایط مرزی و حل مسئله، توزیع فشار هیدرودینامیکی برای دیوارهای انعطاف پذیر به صورت رابطه (۶) ارائه می شود [11].

$$p = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\rho_1 \tanh(\lambda_i L_x)}{\lambda_i H_1} \cos(\lambda_i y) \int_0^H \cos(\lambda_i y) \ddot{u}(t) dy \quad (6)$$

که در رابطه (۶)  $\lambda_i = (2i-1)\pi/2H_1$  و  $\ddot{u}(t)$  شتاب در طول دیوار می باشد. برای مخزن با دیوارهای صلب  $\ddot{u}(t) = \ddot{u}_g(t)$  بوده بدین معنی که شتاب در طول ارتفاع دیوار با شتاب زمین برابر است.  
معادله حاکم دینامیکی سازه به صورت رابطه زیر نوشته می شود:

$$[M_w]\{\ddot{u}_a\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (7)$$

که در آن  $[M_w]$ ،  $[C]$  و  $[K]$  به ترتیب جرم، میرایی و سختی سازه می باشد.  $u$  و  $\dot{u}$  تغییر مکان و سرعت نسبی و  $\ddot{u}_a$  شتاب مطلق سازه را نشان می دهد.  $\{P\}$  نیروی خارجی بوده که تابعی از زمان می باشد و از رابطه (۶) تعیین می شود. با جدا نمودن شتاب مطلق به دو شتاب زمین ( $\ddot{u}_g$ ) و شتاب نسبی ( $\ddot{u}$ ) رابطه فوق را می توان به صورت زیر نوشت:

$$[M_w]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} - [M]\{\ddot{u}_g\} \quad (8)$$

در این پژوهش با یک رابطه سازی، معادله حرکت و رابطه فشار هیدرودینامیکی با یکدیگر ترکیب شده و در قالب یک رابطه ارائه شده اند. سپس چهار مدل از یک مخزن مستطیلی بتنی با ضخامت های متفاوت دیوارها تعریف گشت و با روش گام به گام بر پایه روش المان محدود مورد تحلیل تاریخچه زمانی قرار گرفتند. بنابراین در تحلیل پیشنهادی گام به گام فشار هیدرودینامیکی به صورت بار خارجی بر روی دیوار مخزن قرار گرفته که در آن اثر انعطاف پذیری وارد شده است. این مدل ها از المان های دو بعدی مرتبه سه قابی با درجه آزادی های نشان داده شده در شکل (۲) ساخته شده است.



شکل ۲-المان قابی مرتبه سوم

در روش پیشنهادی، میرایی رایلی  $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$  مورد استفاده قرار گرفته است که در این رابطه پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  از روابط زیر تعیین می شوند.

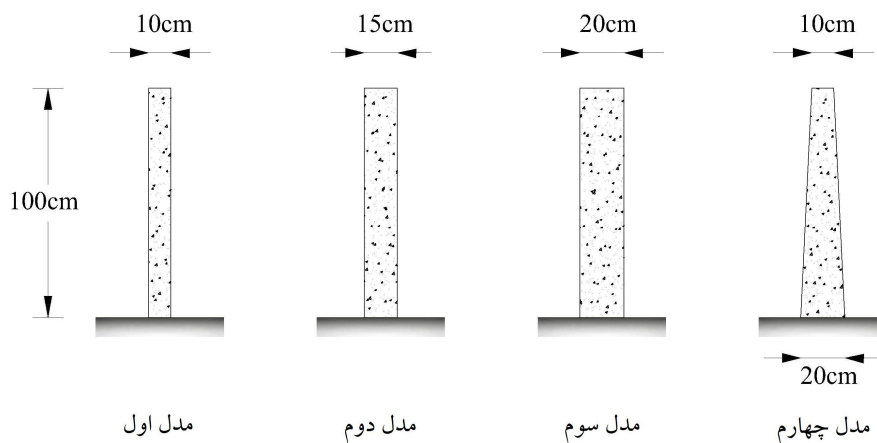
$$\alpha = \frac{4\pi(T_j \lambda_j - T_i \lambda_i)}{T_j^2 - T_i^2} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{T_i T_j (T_j \lambda_j - T_i \lambda_i)}{T_j^2 - T_i^2} \quad (10)$$

در روابط فوق  $\lambda_n$  نسبت میرایی بحرانی در n امین مود که برابر 5% در نظر گرفته شده و  $T_n$  دوره تناوب ارتعاشی در n امین مود می باشد.

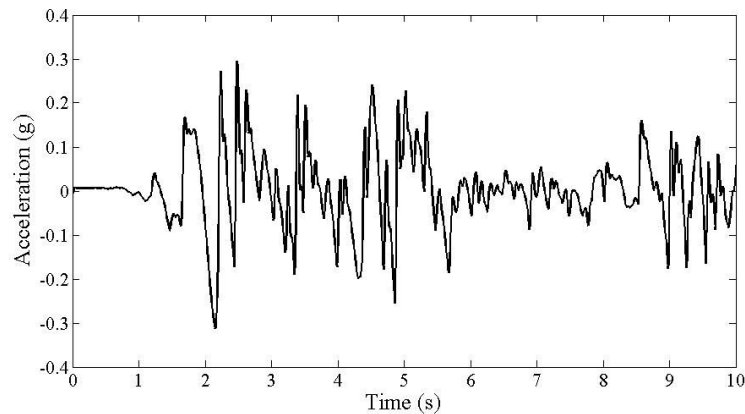
### ۳. تحلیل تاریخچه زمانی

در این مقاله به منظور بررسی اثر مقطع دیوار بر روی پاسخ های دینامیکی و نحوه توزیع فشار هیدرودینامیکی بر روی دیوار، چهار مدل مختلف با ضخامت های متفاوت و ارتفاع یکسان تعریف شدند. در سه مدل اول مقطع دیوار در ارتفاع ثابت بوده و در مدل چهارم به صورت متغیر در نظر گرفته شده است که میانگین ضخامت دیوار در مدل چهارم 15cm بوده که برابر ضخامت دیوار در مدل دوم می باشد. شکل (۳) این چهار مدل را نشان می دهد.



شکل ۳-چهار مدل مختلف از دیوارهای مخزن

برای تحلیل دینامیکی، از شتاب ثبت شده شتاب نگاشت EL-Centro زلزله Imperial Valley 1940 با شتاب حداکثر 0.33g برای حرکت افقی زمین استفاده شده است (شکل ۴). در مدل ایجاد شده  $E_c = 2.4 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$  و  $\rho_c = 2.35 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$  در نظر گرفته شده اند که به ترتیب ضریب ارتجاعی بتن و وزن مخصوص بتن می باشند.

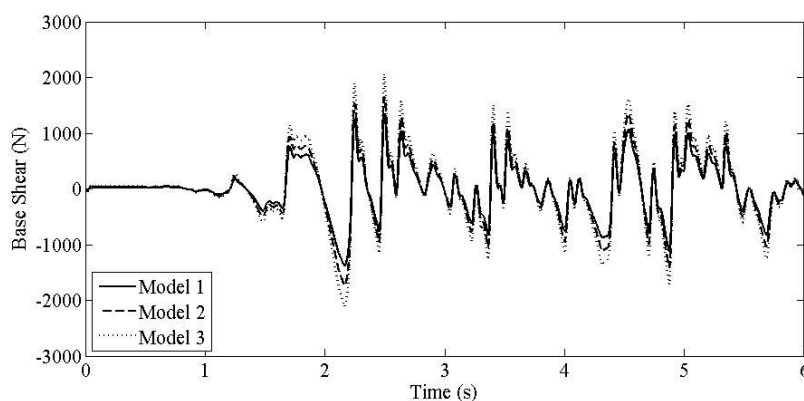


شکل ۴- شتاب ثبت شده زلزله ۱۹۴۰ Imperial Valley

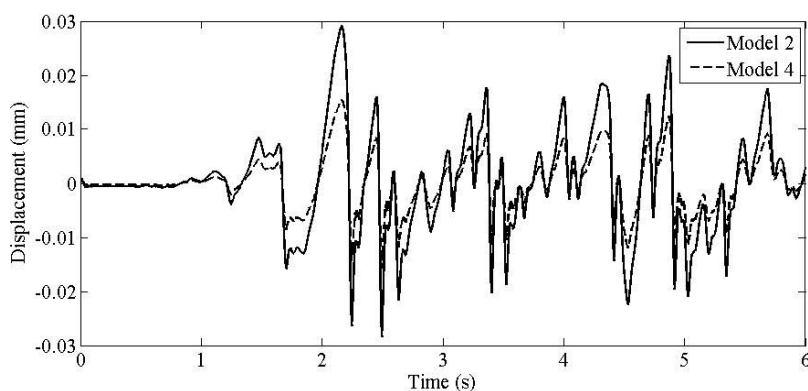
نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی چهار مدل فوق در جدول (۱) خلاصه شده است. در این جدول  $T_i$  دوره تناوب مودهای مختلف سازه،  $F_B$  برش پایه،  $d_A$  تغییر مکان سر آزاد دیوارهای طره ای و  $t_{max}$  زمانی است که برش پایه حداکثر در آن زمان اتفاق افتاده است. شکل (۵) نمودار نیروی برش پایه- زمان را برای سه مدل اول و همچنین شکل های (۶ و ۷) تغییر مکان سر آزاد دیوار مخزن و برش پایه را در تحلیل تاریخچه زمانی برای مدل های دوم و چهارم نشان می دهد.

جدول ۱- خلاصه نتایج تحلیل دینامیکی مدل های مخزن پر از آب

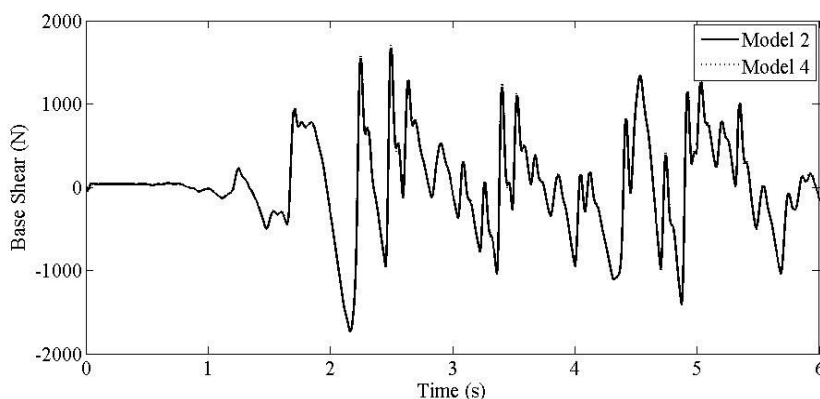
مدل	اول	دوم	سوم	چهارم
فرکانس (Hz)	$T_1 = 0.04881$ $T_2 = 0.00901$ $\alpha = 10.86679$	$T_1 = 0.03024$ $T_2 = 0.00548$ $\alpha = 17.59009$	$T_1 = 0.02177$ $T_2 = 0.00389$ $\alpha = 24.48628$	$T_1 = 0.02104$ $T_2 = 0.00534$ $\alpha = 23.81797$
میرایی	$\beta = 0.00038$	$\beta = 0.000232$	$\beta = 0.000165$	$\beta = 0.000213$
$t_{max} (s)$	2.55	2.55	2.55	2.55
$F_B (N)$	1381.4	1741.15	2107.3	1747.6
$d_A (mm)$	0.0766	0.0291	0.0154	0.0156



شکل ۵- نمودار برش پایه- زمان مدل های اول، دوم و سوم



شکل ۶- نمودار تغییر مکان-زمان مدل های دوم و چهارم

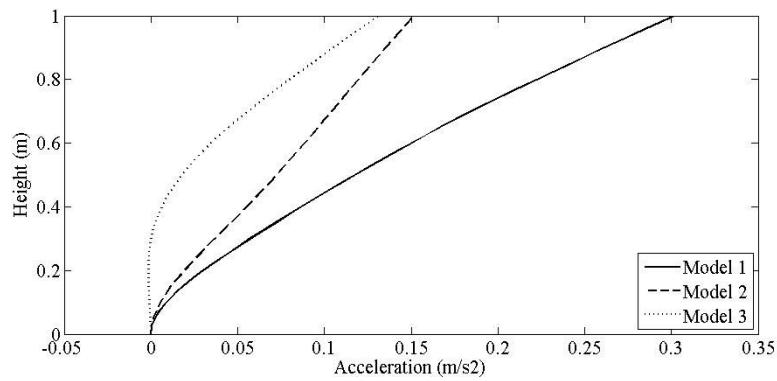


شکل ۷- نمودار برش پایه-زمان مدل های دوم و چهارم

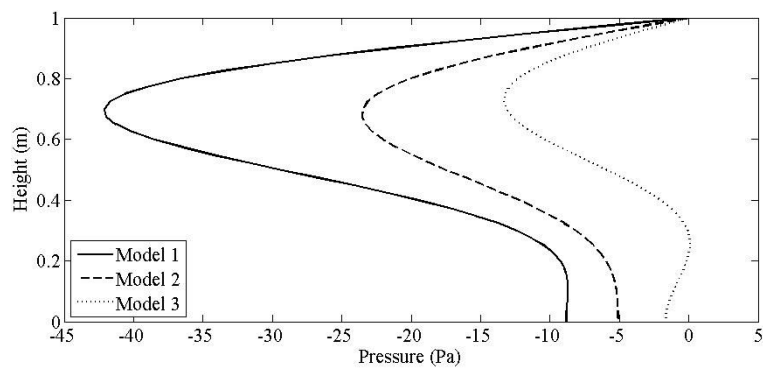
نتایج جدول (۱) و شکل (۵) نشان می دهند که با افزایش ضخامت دیوارهای مخزن، برش پایه نیز افزایش می یابد در حالیکه تغییر مکان حداکثر کاهش داشته است. همچنین می توان نتیجه گرفت که نحوه تغییرات برش پایه در هر سه مدل در طول زمان یکسان بوده و فقط مقادیر آن با زیاد شدن ضخامت تغییر کرده و در هر سه مدل حداکثر برش پایه در یک زمان و در  $t=2.55s$  اتفاق افتاده است.

مقایسه پاسخ های بدست آمده در مدل دوم و چهارم نشان می دهد که مقدار برش پایه حداکثر در هر دو مدل تقریباً با هم برابر بوده در صورتیکه تغییر مکان حداکثر در مدل دوم نسبت به مدل چهارم از مقدار  $0.0291mm$  به  $0.0156mm$  کاهش داشته است. نمودار شکل (۶) اختلاف میان تغییر مکان در دو مدل دوم و چهارم را برای زمان های مختلف نشان می دهد و همچنین شکل (۷) نشان از انطباق کامل میان تغییرات برش پایه برای هر دو مدل دارد. با توجه به ضخامت های انتخابی برای مدل دوم و چهارم و با توجه به آنکه مقدار مصالح مصرفی در هر دو یکسان است، می توان نتیجه گرفت در صورتیکه نیاز به محدود کردن مقدار حداکثر تغییر مکان باشد، طرح دیوار به صورت متغیر مناسب تر می باشد.

شکل (۸) تغییرات شتاب و فشار هیدرودینامیکی در ارتفاع دیوار مخزن را برای زمانیکه برش پایه به مقدار حداکثر خود رسیده، برای سه مدل اول نشان می دهد. همانطور که در شکل (۸-ب) مشاهده می گردد فشار هیدرودینامیکی در صورتیکه که انعطاف پذیری دیوار در نظر گرفته شود، با بیشتر شدن ضخامت کاهش پیدا می کند. این در حالی است که در روابط پیشنهادی آیین نامه اثر انعطاف پذیری دیوارها دیده نشده و فشار هیدرودینامیکی در طراحی بر پایه روابط آیین نامه مستقل از مشخصات مقطع دیوار می باشد.



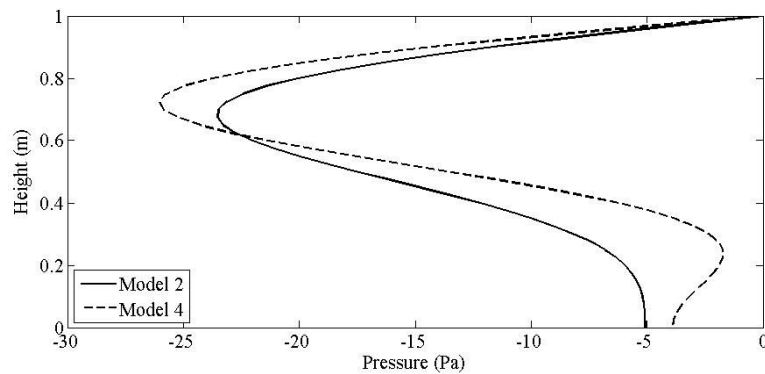
(الف)



(ب)

شکل ۸- (الف) تغییرات شتاب دیوارها (ب) فشار هیدرودینامیکی

شکل (۹) توزیع فشار هیدرودینامیکی در ارتفاع دیوار مخزن را برای مدل دوم و چهارم در زمانیکه برش پایه به مقدار حداکثر خود رسیده، نشان می دهد. همانطور که در شکل (۹) مشاهده می شود در پایین دیوار مدل چهارم که ضخامت آن بیشتر از ضخامت دیوار در مدل دوم است، مقدار فشار هیدرودینامیکی توزیع شده در ارتفاع کمتر می باشد. در ارتفاع های بالاتر که در مدل چهارم ضخامت در حال کمتر شدن است، مقدار فشار هیدرودینامیکی بیشتر شده تا در بالای دیوار که در هر دو مدل به صفر می رسد. بنابراین شکل های (۸ و ۹) اثر مقطع دیوار را بر روی مقدار فشار هیدرودینامیکی نشان می دهند که با بیشتر شدن ضخامت مقطع مقدار فشار هیدرودینامیکی بر روی دیوار کاهش می یابد.



شکل ۹- فشار هیدرودینامیکی برای مدل های دوم و چهارم



#### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش معادله حرکت سازه و رابطه فشار هیدرودینامیکی که در آن اثر انعطاف پذیری دیوارها در نظر گرفته شده با یکدیگر ترکیب شده و بصورت یک رابطه ارائه شده اند. سپس به کمک این رابطه یک روش گام به گام پیشنهاد شده که در آن فشار هیدرودینامیکی به عنوان یک بار خارجی که با شتاب دیوارها در هر لحظه زمانی تغییر می کند، بر روی دیوارها در نظر گرفته می شود. به منظور بررسی اثر مقطع دیوار بر روی پاسخ های دینامیکی مخزن چهار مدل مختلف تعریف شده و به کمک روش پیشنهادی مورد تحلیل تاریخچه زمانی قرار گرفتند. در سه مدل اول مقطع دیوار در ارتفاع ثابت بوده و در مدل چهارم به صورت متغیر در نظر گرفته شده است. از مقایسه برش پایه های حاصل از مدل های مختلف فوق نتیجه گرفته می شود که برش پایه با افزایش ضخامت دیوارهای مخزن افزایش یافته در صورتیکه تغییر مکان حداکثر کاهش داشته است. مقایسه پاسخ های بدست آمده در مدل دوم و چهارم نشان می دهد که مقدار برش پایه حداکثر در هر دو مدل تقریباً با هم برابر بوده در صورتیکه تغییر مکان حداکثر در مدل دوم نسبت به مدل چهارم کاهش داشته است. همچنین نتایج نشان می دهد که با تغییر ضخامت دیوارهای مخزن، فشار هیدرودینامیکی وارد بر آن نیز تغییر می کند که با کمتر شدن ضخامت مقطع دیوار مقدار فشار هیدرودینامیکی کاهش می یابد.

#### ۵. مراجع

1. Westergard, H. M., (1933) "Water Pressure on Dams During Earthquakes", Transaction, American Society of Civil Engineering, Vol. 98.
2. Housner, G. W., (1963) "The dynamic behavior of water tank", Bulletin of the Seismological Society of American, Vol. 74(3), 1031-1041.
3. Abramson, H. N., (1966) "The dynamic behavior of liquids in moving containers with application to space vehicle technology", NASA SP-106, National Aeronautic and Space Administration, Washington, D.C.
4. Chiba, M., Yamaki, N., and Tani, J., (1984) "Free vibration of a clamped-free circular cylindrical shell partially filled with liquid", Thin-Walled structure, Vol. 2, 265-284.
5. Eberle, F., Kadlec, J., Haifinger, G., and Sharnowell, R., (1986) "Experimental modal survey of a vertical cylindrical shell partly filled with water", Rep. KFK 4004, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Germany.
6. Veltsos, A. S., (1984) "Seismic response and design of liquid storage tanks", Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems. Tech. Council in Lifeline Earthquake Eng. ASCE, New York, N. Y., 255-370.
7. Haroun, M. A., Housner, G. W., (1981) "Seismic design of liquid storage tanks", J. Tech. Councils of ASCE, ASCE, 107, 191-207.
8. Kim, J., Koh, H. and Kwah, I., (1996) "Dynamic response of rectangular flexible fluid containers", Journal of Eng. Mechanics" ASCE. Vol. 122, No. 9, 807-816.
9. Park, J. H., Koh, H. M. and Kim, J., (1992) "Liquid-structure interaction analysis by coupled boundary element-finite element method in time domain". Proceedings of the 7th International Conference on Boundary Element Technology, BE-TECH/92, Computational Mechanics Publication, Southampton, England, 89-92.
10. Chen, J., (2003) "Dynamic response of concrete rectangular liquid storage tanks", Master Thesis, Ryerson university, Toronto, Canada.
11. Chen, J.Z. and Kianoush, M.R., (2005) "Seismic response of concrete rectangular tanks for liquid containing structures", Canadian Journal Of Civil Engineering, 739-752.