

## بررسی اثر مقطع دیوار و نسبت میرایی بر روی پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن مستطیلی ذخیره آب

امیرصمد قدس<sup>۱</sup> و محمدرضا اصفهانی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه فردوسی مشهد و استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد

<sup>۲</sup> استاد گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

محاسبه فشار هیدرودینامیکی مهم‌ترین مسئله در تحلیل مخازن ذخیره آب می‌باشد. در آیین‌نامه‌های رایج، رابطه فشار هیدرودینامیکی بر روی بدنه مخزن با فرض صلب بودن دیوارها به دست می‌آید و در مدل دینامیکی مخازن اثر مایع به صورت یک جرم افزوده بر روی دیوارهای مخزن در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله به منظور در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری دیوارها در محاسبه فشار هیدرودینامیکی و در تحلیل دینامیکی سازه، از یک روش پیشنهادی المان محدود به صورت حل گام به گام استفاده می‌شود. روش پیشنهادی این مزیت را دارد که تحلیل در هر شرایطی دارای پایداری عددی بوده و در آن فشار هیدرودینامیکی به عنوان بار خارجی در هر گام زمانی در طول تحلیل تاریخچه زمانی بر روی دیوار مخزن قرار می‌گیرد. در تحلیل، دیوارهای مخازن مستطیلی با مقاطع مختلف منشوری و غیر منشوری مدل شده و پس از تحلیل تاریخچه زمانی با روش پیشنهادی تحت شتاب افقی زمین، پاسخ‌های دینامیکی شامل تغییر مکان‌ها و فشارهای هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای مدل‌های مختلف، جرم افزوده از رابطه میان شتاب دیوار مخزن و فشار هیدرودینامیکی تعیین شد. نتایج تحلیل نشان می‌دهند که جرم افزوده و فشار هیدرودینامیکی تابعی از انعطاف‌پذیری دیوارهای مخزن می‌باشند. در آیین‌نامه‌ها نسبت میرایی برای مخازن خالی و پر مقدار ثابت ۵٪ پیشنهاد شده است. به منظور بررسی اثر این نسبت بر روی پاسخ‌های دینامیکی، مخازن با نسبت‌های مختلف میرایی تحلیل شدند که نتایج نشان می‌دهند مقدار نسبت میرایی اثر زیادی بر روی پاسخ‌های دینامیکی دارد.

**واژگان کلیدی:** انعطاف‌پذیری دیوارها، المان محدود، جرم افزوده، فشارهای هیدرودینامیکی، مخازن آب، میرایی.

### ۱- مقدمه

طراحی، ساخت و نگهداری مخازنی که برای ذخیره‌سازی آب مورد استفاده قرار می‌گیرند 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 نمی‌باشد. حجم زیادی از مطالعات انجام شده در ارتباط با تخمین فشار هیدرودینامیکی در مخازن و سدها به گونه‌ای بوده است که از اثر اندرکنش آب و سازه صرف‌نظر شده به طوری که 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 می‌کند [۱].

محاسبه فشار هیدرودینامیکی مهم‌ترین مسئله در تحلیل سیستم‌های آب و سازه است. اثر فشار هیدرودینامیکی بر روی سازه از مدت‌ها پیش مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است.

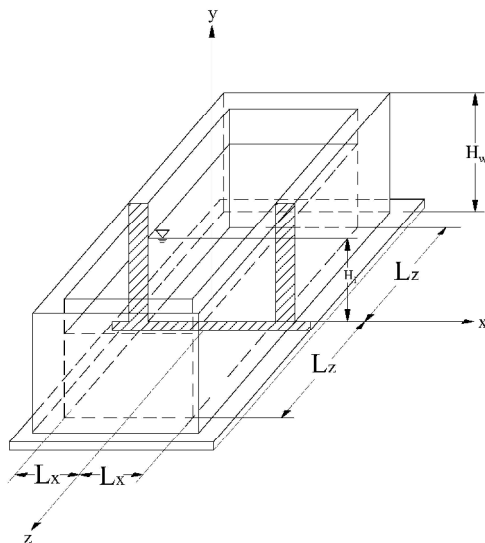
### Westergard [۲] اولین راه حل را برای یک سد عمودی

تحت شتاب افقی ارائه کرد. وی 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 Housner [۳] یک روش تقریبی برای تعیین فشار هیدرودینامیکی ناشی از شتاب افقی را ارائه داد و فرض کرد که مایع درون مخزن تراکم‌ناپذیر بوده و دیواره‌های آن صلب می‌باشد. این روش در بسیاری از آیین‌نامه‌ها 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 توسط دو جرم متمرکز می‌باشد. در این مدل جرم متمرکز اول که جرم سخت نامیده می‌شود آن قسمت از جرم مایع درون مخزن است که به همراه مخزن ارتعاش پیدا می‌کند و جرم متمرکز دوم، 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

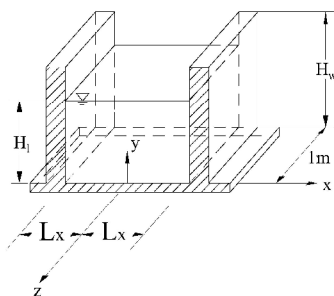
## ۲- فشار هیدرودینامیکی ناشی از شتاب افقی

شکل (۱-الف) یک مخزن مستطیلی سه بعدی را نشان می‌دهد که فرض شده به صورت صلب بر روی شالوده قرار گرفته است. در صورتی که فرض شود نسبت طول به عرض بسیار زیاد است می‌توان طول واحد از مخزن را مطابق شکل (۱-ب) در نظر گرفت.

در این مدل دیوارهای مخزن رفتار یک عضو طره‌ای را دارند. قابل توجه است که  $L_x$  و  $L_z$  به ترتیب به موازات و عمود بر راستای زلزله در نظر گرفته شده‌اند. ارتفاع مایع  $H_l$  از کف مخزن بوده و مایع به صورت غیر قابل تراکم‌پذیر و با چگالی  $\rho_l$  فرض شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- هندسه مخزن مستطیلی؛

(الف) مدل سه بعدی، (ب) مدل دو بعدی [۱]

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

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

می‌کند و جرم موج نامیده می‌شود. بر این اساس فشار هیدرودینامیکی با جرم‌های افزوده تقریب زده شده است. به این صورت که جرم افزوده ناشی از فشار جرم سخت را به صورت میله‌های 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 نمی‌باشد زیرا که دیوارهای مخزن در حین زلزله تغییر شکل‌های قابل توجهی می‌دهند. بنابر این مدل‌هایی توسط Abramson [۴]، Chiba و همکاران [۵] و Eberle و همکاران [۶] ارائه شد که در آن‌ها تغییر شکل دیوارها در نظر گرفته شده است.

با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری دیوار در مطالعات عددی اثر اندرکنش آب و سازه در مخازن وارد شد که اکثر این تحقیقات از جمله Veltso [۷] و Haroun و Housner [۸] برای مخازن استوانه‌ای بوده است. از جمله پژوهش‌های صورت گرفته در تحلیل دینامیکی مخازن مستطیلی ذخیره آب می‌توان به تحقیقات Kim و همکاران [۹] و Park و همکاران [۱۰] اشاره کرد. در این پژوهش‌ها یک روش حل عددی برای به دست آوردن پاسخ‌های دینامیکی مخازن مستطیلی تحت اثر تحریک افقی و قائم زمین ارائه شده است که در محاسبه پاسخ‌ها از روش ترکیبی المان محدود و المان مرزی، اندرکنش آب و سازه در نظر گرفته شده است. در این روش از مدل المان مرزی برای حرکت مایع و از مدل المان محدود برای دیوارها استفاده شده است. همچنین Chen [۱] و Kianoush و Chen [۱۱] یک روش حل تکراری را برای محاسبه فشار هیدرودینامیکی بر روی دیوارهای مخازن مستطیلی با در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری دیوارها پیشنهاد نموده‌اند.

در این مقاله، مطالعات تحلیلی با هدف بررسی اثر پارامترهای مختلف شامل ضخامت دیوارهای مخزن و نسبت میرایی بر روی مشخصه‌های ارتعاشی و پاسخ‌های دینامیکی برای مخازن مستطیلی بتنی صورت پذیرفته است و در تحلیل مخازن از یک روش پیشنهادی المان محدود استفاده شده است. در این روش با یک رابطه‌سازی، معادله حرکت سازه و رابطه فشار هیدرودینامیکی که تابعی از شتاب بدنه مخزن نیز می‌باشد، با یکدیگر ترکیب شده و در قالب یک رابطه ارائه شده‌اند.

## ۳- روش تحلیلی پیشنهادی

معادله حاکم دینامیکی سازه به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

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

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

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

در صورتی که نیرو و یا شتاب زمین تابع دلخواه و یا پیچیده‌ای از زمان باشند، حل تحلیلی معادلات حرکت غیر ممکن بوده و برای حل معادلات چنین سیستم‌هایی می‌توان از روش‌های عددی گام به گام زمانی بهره جست. به این صورت که پاسخ سازه در زمان  $t$  در حل مسئله در زمان  $t + \Delta t$  مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر  $\{P\}$  تابعی از شتاب گره‌های دیوار باشد، معادله (۸) مطابق روش گام به گام پیشنهادی چن و کیانوش [۱۱] حل می‌گردد. در این روش پیشنهادی، این رابطه در دو مرحله در طی هر گام حل می‌شود. در مرحله نخست پاسخ دینامیکی سازه تحت شتاب زمین در زمان  $t$  و فشار هیدرودینامیکی تعیین شده در گام زمانی  $t + \Delta t$  به دست می‌آید. سپس در مرحله دوم، از پاسخ به دست آمده و قرار دادن آن در رابطه (۶) فشار هیدرودینامیکی برای گام بعدی به عنوان بار خارجی روی دیوارها تعیین می‌شود.

یکی از معایب اصلی این روش گام به گام مربوط به ناپایداری تحلیل عددی است که این مشکل با بسیار کوچک نمودن زمان هر گام قابل حل می‌باشد که منجر به افزایش زمان تحلیل می‌گردد. همچنین استفاده از فشار هیدرودینامیکی به دست آمده از گام قبلی و استفاده آن به عنوان بار خارجی در گام فعلی می‌تواند خطا در محاسبات وارد نماید که باز هم فقط با بسیار کوچک کردن زمان هر گام به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود.

در این پژوهش با یک رابطه‌سازی، معادله حرکت و رابطه فشار هیدرودینامیکی با یکدیگر ترکیب شده و در قالب یک

که در آن  $\phi$  تابع پتانسیل سرعت است. مؤلفه‌های سرعت در دو جهت  $x$  و  $y$  به ترتیب  $v_x = \partial\phi/\partial x$  و  $v_y = \partial\phi/\partial y$  می‌باشند. 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 می‌باشند.  
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 می‌شود.

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

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 انعطاف‌پذیر بودن دیوارها می‌باشد. پس از جایگذاری شرایط مرزی و حل مسئله، توزیع فشار هیدرودینامیکی برای دیوارهای انعطاف‌پذیر به صورت رابطه (۶) قابل بیان است [۱۱].

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

که در رابطه (۶)،  $\lambda_i = (2i-1)\pi/2H_1$  و  $\ddot{u}(t)$  شتاب در طول دیوار می‌باشد. 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.

با فرض انتگرال گیری بر اساس قانون مستطیل ساده،  $[P_n]$  تابعی از شتابهای گره‌ای به صورت ماتریسی در معادله (۱۰) نوشته می‌شود.

$U$  به عنوان مجموعه‌هایی از  $(i, j)$  شامل گره‌های درجه آزادی افقی که با مایع در تماس است، تعریف شده است. فاصله قائم بین گره‌ها با  $dh$  و عرض دیواره‌های مخزن با  $db$  نشان داده شده است. رابطه (۱۰) با فرض روش انتگرال گیری مستطیلی به کار گرفته می‌شود. بر اساس رابطه (۱۰) بار خارجی کل به صورت معادله (۱۱) تعیین می‌شود.

با جای گذاری رابطه (۱۱) در رابطه (۸) معادله حرکت به صورت معادله (۱۲) نوشته می‌شود.

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (9)$$

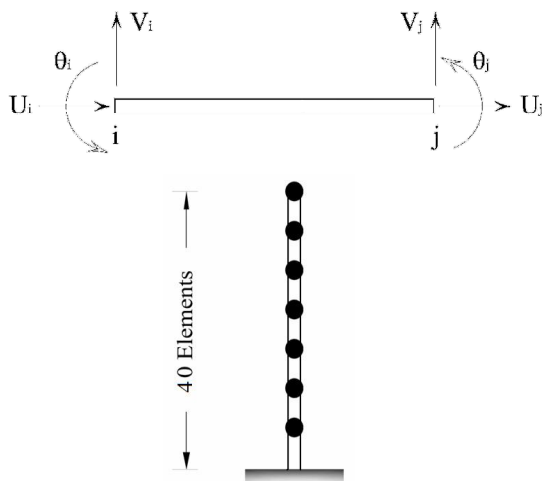
$$P_n = -\frac{2\rho_l}{\lambda_n H_l} \tanh(\lambda_n L_x) \cos(\lambda_n y) \int_{y=0}^{H_l} \cos(\lambda_n y) (\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)) dy, \quad \lambda_n = \frac{(2n-1)\pi}{2H_l}$$

$$[P_n] = [p_n dhdb] = -[M_n^*][\ddot{u} + \ddot{u}_g]$$

$$\begin{cases} (M_n^*)_{ij} = \left( \frac{2\rho_l}{\lambda_n H_l} \tanh(\lambda_n L_x) \cos(\lambda_n y_i) \right) (\cos(\lambda_n y_j) dh) & \text{if } (i, j) \in U \\ (M_n^*)_{ij} = 0 & \text{if } (i, j) \notin U \end{cases} \quad (10)$$

$$[P] = \sum [P_n] = -\sum [M_n^*][\ddot{u} + \ddot{u}_g] = -[M^*][\ddot{u} + \ddot{u}_g] \quad (11)$$

$$([M] + [M^*])\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = -([M] + [M^*])\ddot{u}_g \quad (12)$$



شکل ۲- مدل المان محدود مخزن با استفاده از المان قابی مرتبه سوم

رابطه ارائه شده‌اند که معادله حاکم جدید در یک مرحله در هر گام زمانی قابل حل می‌باشد. این روش پیشنهادی این مزیت را دارد که اگر از روش نیومارک با ضرایب  $\alpha = 0.5$  و  $\delta = 0.25$  استفاده شود، پاسخ در هر شرایطی دارای پایداری عددی می‌باشد. پارامترهای  $\alpha$  و  $\delta$  تغییرات شتاب را در یک گام زمانی تعریف می‌نمایند و مشخصه پایداری و دقت روش می‌باشند. علاوه بر آن در این روش فشار هیدرودینامیکی در گام مربوط به همان گام است. روابط پیشنهادی در ادامه ارائه شده است.

رابطه فشار هیدرودینامیکی و شتاب سازه به صورت معادله (۹) بیان می‌شود.

در تحلیل‌های پیش‌رو، نسبت میرایی  $\zeta = 5\%$  در نظر گرفته می‌شود و 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 می‌شوند.

$$\alpha = \frac{4\pi(T_j \lambda_j - T_i \lambda_i)}{T_j^2 - T_i^2} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{T_i T_j (T_j \lambda_j - T_i \lambda_i)}{T_j^2 - T_i^2} \quad (14)$$

در روابط فوق  $\lambda_n$  نسبت میرایی بحرانی در  $n$  امین مود و  $T_n$  دوره تناوب ارتعاشی در  $n$  امین مود می‌باشد.

شکل (۲) مدل المان محدود به کار رفته برای تحلیل دینامیکی مخزن را نشان می‌دهد.

$$\frac{h_i}{H_l} = 0.375 \quad \text{for} \quad \frac{2L_x}{H_l} > 1.333 \quad (17)$$

در این مقاله ابتدا به منظور بررسی اثر مقطع دیوار بر روی پاسخ‌های دینامیکی و نحوه توزیع فشار هیدرودینامیکی بر روی دیوار، پنج مدل مختلف با ضخامت‌های متفاوت و ارتفاع یکسان تعریف شدند. در چهار مدل اول مقطع دیوار در ارتفاع ثابت بوده و در مدل پنجم مقطع به صورت متغیر در نظر گرفته شده است که میانگین ضخامت دیوار در این مدل یک متر بوده که برابر ضخامت دیوار در مدل سوم می‌باشد. این مدل‌ها بر اساس روش پیشنهادی المان محدود مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. به منظور مقایسه پاسخ‌های دینامیکی حاصل از روش پیشنهادی با روش جرم افزوده که در آیین‌نامه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل ششم تعریف شد. هندسه مدل ششم مشابه مدل دوم است که جرم بخش سخت مایع از رابطه (۱۵) تعیین شده و به صورت متمرکز بر روی دیوار قرار داده شده است. شکل (۳) این شش مدل را نشان می‌دهد.

برای تحلیل دینامیکی، از شتاب ثابت شده شتاب‌نگاشت EL-Centro زلزله Imperial Valley 1940 با شتاب حداکثر 0.33g برای حرکت افقی زمین استفاده شده است (شکل (۴)). در مدل ایجاد شده  $E_c = 2.077 \times 10^4$  MPa و  $\rho_c = 2300 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده‌اند که به ترتیب ضریب ارتجاعی بتن و وزن مخصوص بتن می‌باشند.

این مدل از المان‌های دو بعدی مرتبه سه قابی با درجه آزادی‌های نشان داده شده در شکل (۲) ساخته شده است.

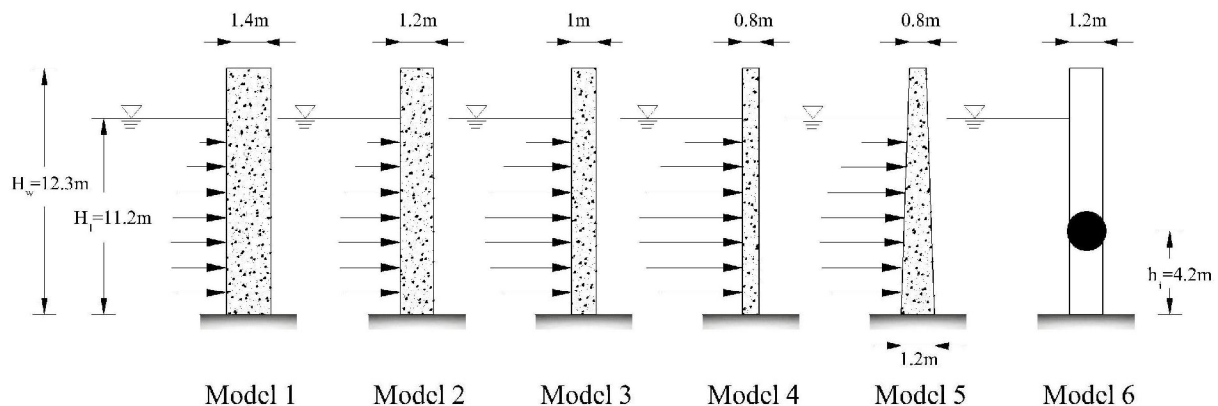
#### ۴- تحلیل تاریخچه زمانی

همان‌طور که بیان شد در روش پیشنهادی المان محدود اثر انعطاف‌پذیری دیوارها در محاسبه فشار هیدرودینامیکی در نظر گرفته شده است؛ در صورتی که در تعیین فشارهای هیدرودینامیکی در تحلیل و طراحی مخازن بر اساس آیین‌نامه ACI 350.3 از روش جرم افزوده استفاده می‌شود. اگر روش جرم افزوده در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد، ماتریس جرم افزوده ارائه شده برای فشار جرم سخت از شرایط مرزی دیوار صلب به دست آمده و با زمان تغییر نمی‌کند. بنابراین این رابطه فشار هیدرودینامیکی به علت انعطاف‌پذیری دیوارها در تحلیل دینامیکی سازه در نظر گرفته نمی‌شود. به این معنی که شرایط مرزی برای فشار جرم سخت در روش جرم افزوده کماکان به صورت صلب است و فقط در تحلیل دینامیکی اثر انعطاف‌پذیری دیوارها وارد می‌شود. جرم افزوده برای فشار هیدرودینامیکی ناشی از جرم سخت به کمک روش هاسنر قابل محاسبه است. این جرم متمرکز به صورت رابطه (۱۵) می‌باشد [۱۱].

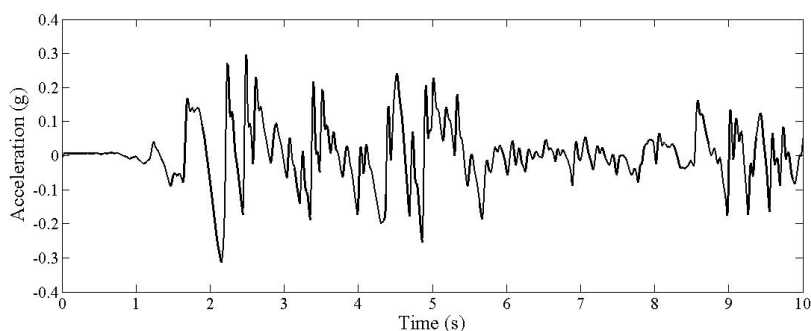
$$M_{i,total} = \frac{\tanh[0.866(2L_x/H_L)]}{0.866(2L_x/H_L)} M_L \quad (15)$$

قابل توجه است که محل قرارگیری جرم متمرکز در ارتفاع دیوار از روابط زیر تعیین می‌گردد.

$$\frac{h_i}{H_l} = 0.5 - 0.09375 \left( \frac{2L_x}{H_L} \right) \quad \text{for} \quad \frac{2L_x}{H_l} < 1.333 \quad (16)$$



شکل ۳- شش مدل مختلف از دیوارهای مخزن



شکل ۴- شتاب ثبت شده زلزله ۱۹۴۰ Imperial Valley

گرفته می‌شود که اگر اندرکنش آب و سازه در نظر گرفته شود، شتاب بدنه سازه تأثیر مستقیم در فشار هیدرودینامیکی دارد و با انعطاف پذیرتر شدن سازه مخزن فشار هیدرودینامیکی افزایش می‌یابد. قابل توجه است که در آیین‌نامه روابط مربوط به تعیین فشار هیدرودینامیکی با فرض صلب بودن دیوارهای مخزن به دست آمده‌اند و ضخامت دیوارها و انعطاف پذیری سازه در تعیین فشار هیدرودینامیکی وارد نمی‌شود.

در صورتی که سطح زیر فشار هیدرودینامیکی وارده بر دیوار مخزن تعیین گردد، برش پایه ناشی از این فشار هیدرودینامیکی به دست می‌آید. همچنین مرکز سطح این توزیع فشار محل برآیند نیرو را نشان می‌دهد. جدول (۲) مقادیر برش پایه ناشی از فشار هیدرودینامیکی و محل برآیند فشار را برای شش مدل ارائه می‌دهد. در این جدول  $F_{B_{hyd}}$  و  $h_i$  به ترتیب برش پایه ناشی از فشار هیدرودینامیکی و محل برآیند نیرو می‌باشند.

نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی پنج مدل در جدول (۱) خلاصه شده است. در این جدول  $T_i$  دوره تناوب مودهای مختلف سازه،  $d_A$  تغییر مکان سر آزاد دیوارهای طره‌ای و  $t_{max}$  زمانی است که برش پایه حداکثر در آن زمان اتفاق افتاده است. شکل (۵) نمودار تغییر مکان سر آزاد دیوار مخزن  $d_A$  را در تحلیل تاریخچه زمانی برای مدل‌های اول تا چهارم نشان می‌دهد.

نتایج جدول (۱) و شکل (۵) نشان می‌دهند که با کاهش ضخامت دیوارهای مخزن، تغییر مکان حداکثر سر آزاد دیوارها افزایش می‌یابد. شکل (۶) تغییرات شتاب و فشار هیدرودینامیکی در ارتفاع دیوار مخزن را برای زمانی که برش پایه به مقدار حداکثر خود رسیده، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۶-ب) مشاهده می‌گردد با تغییر ضخامت دیوارها توزیع فشار هیدرودینامیکی وارده بر دیوارها نیز تغییر می‌کند که مقادیر این فشار با کمتر شدن ضخامت افزایش می‌یابد. بنابر این نتیجه

جدول ۱- خلاصه نتایج تحلیل دینامیکی مدل‌های مخزن پر از آب

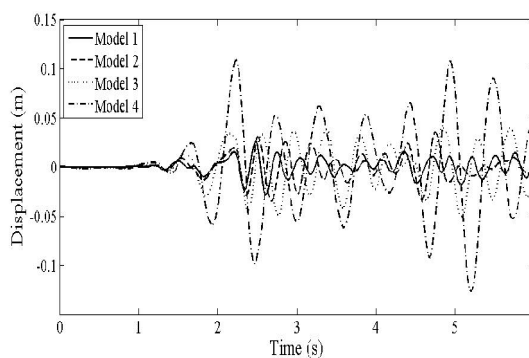
مدل	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم
دوره تناوب ( $T$ )	$T_1 = 0.30979$ $T_2 = 0.05169$	$T_1 = 0.3413$ $T_2 = 0.06365$	$T_1 = 0.43199$ $T_2 = 0.07885$	$T_1 = 0.57232$ $T_2 = 0.10493$	$T_1 = 0.35067$ $T_2 = 0.07368$
میرایی	$\alpha = 1.738182$ $\beta = 0.002215$	$\alpha = 1.552$ $\beta = 0.0027$	$\alpha = 1.22997$ $\beta = 0.003334$	$\alpha = 0.92775$ $\beta = 0.004434$	$\alpha = 1.48066$ $\beta = 0.003044$
$t_{max} (s)$	۲/۶۲۷۵	۲/۶۹۵	۵/۶۵	۵/۲۲	۲/۶۵
$d_A (cm)$	۲/۸۶	۳/۵۶	۵/۰۶	۱۲/۶۴	۳/۹۰

جدول ۲- برش پایه ناشی از این فشار هیدرودینامیکی و محل برآیند نیرو

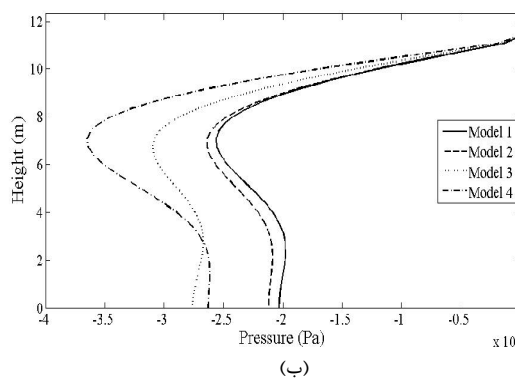
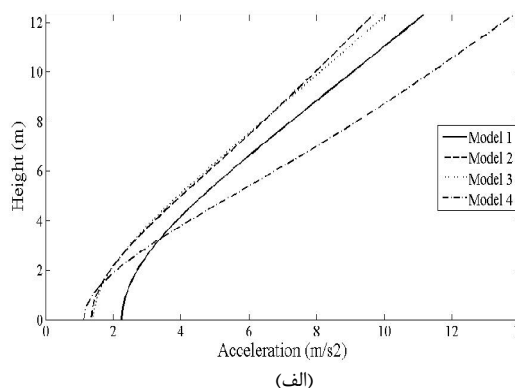
مدل	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم
$F_{B_{hyd}} (kN)$	۲۲۱/۵۸	۲۳۰/۳۴	۲۸۰/۳۵	۳۰۷/۲۶	۲۵۶/۴۴	۴۱۲/۲
$h_i (m)$	۵/۲۲	۵/۱۹	۵/۰۶	۵/۳۱	۴/۷۳	۴/۲

شتاب بدنه در سازه منجر به اعمال فشار هیدرودینامیکی در سطح مشترک سازه و آب می‌گردد که این فشار متناسب با شتاب در هر نقطه از ارتفاع مخزن می‌باشد. وابستگی این دو پارامتر (فشار هیدرودینامیکی و شتاب) از جرم مایع که در ارتعاش سیستم وارد می‌شود، ناشی می‌گردد [۱۲]. به این منظور از تقسیم منحنی فشار هیدرودینامیکی و شتاب سازه منحنی وابسته این دو پارامتر به دست می‌آید که واحد آن  $(N/m^2/g)$  می‌باشد. در صورتی که از این منحنی به دست آمده در ارتفاع دیوار انتگرال گرفته شود، مقدار به دست آمده واحد جرم  $(kg)$  را داشته که مفهوم جرم افزوده را دارد [۱۲]. این جرم افزوده از این روش برای مدل‌های مختلف تعیین شد که مقادیر به دست آمده برای هر مدل متفاوت می‌باشد. مقدار جرم افزوده برای مدل اول ۵۲۴۹۰ کیلوگرم، مدل دوم ۷۴۵۳۴ کیلوگرم و در مدل سوم ۸۹۶۱۴ کیلوگرم به دست آمد که می‌توان نتیجه گرفت جرم افزوده نیز تابعی از انعطاف‌پذیری سازه می‌باشد. در صورتی که رابطه پیشنهادی آیین‌نامه با فرض صلب بودن دیوارها تعیین شده و مقدار جرم افزوده برای کلیه مدل‌ها ثابت ۶۵۷۴۶ کیلوگرم می‌باشد. همچنین این مقادیر برای لحظه‌ای که برش پایه در تحلیل تاریخچه زمانی به مقدار حداکثر رسیده است تعیین شده و مقدار جرم می‌تواند برای هر لحظه زمانی نیز تغییر کند. قابل توجه است که جرم مایع بخش سخت برای مدل ششم از رابطه (۱۵) به دست آمده که تابعی از مشخصات دیوار مخزن نبوده و بنابر این مقدار جرم افزوده و برش پایه برای سایر مدل‌ها به روش آیین‌نامه یکسان می‌باشد. شکل (۷) توزیع فشار هیدرودینامیکی، شتاب بدنه مخزن و منحنی وابستگی این دو پارامتر را برای مدل دوم نشان می‌دهد.

مقایسه پاسخ‌های به دست آمده در مدل سوم و پنجم از جدول (۲) نشان می‌دهد که مقدار برش پایه حداکثر ناشی از فشار هیدرودینامیکی در مدل پنجم از مدل سوم کمتر بوده و تغییر مکان حداکثر (مطابق جدول (۱)) در مدل سوم نسبت به مدل پنجم از مقدار ۵/۰۶ به ۳/۹۰ سانتی‌متر کاهش یافته است. با توجه به ضخامت‌های انتخابی برای مدل سوم و پنجم و با توجه به آن که مقدار مصالح مصرفی در هر دو یکسان است، می‌توان نتیجه گرفت با توجه به کاربری مخازن مایعات که برای جلوگیری از رشد ترک‌ها بایستی مقدار حداکثر تغییر مکان‌ها محدود باشد، طرح دیوار به صورت متغیر مناسب‌تر می‌باشد. شکل (۸) نشان می‌دهد که توزیع فشار این دو مدل در زمان برش پایه حداکثر نزدیک به هم می‌باشند.



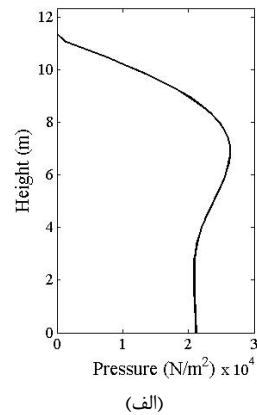
شکل ۵- نمودار تغییر مکان- زمان مدل‌های اول، دوم، سوم و چهارم



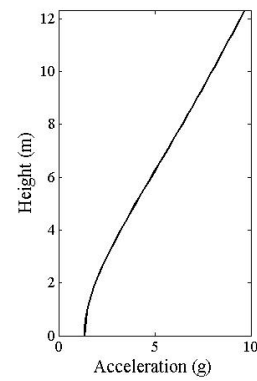
شکل ۶- الف) تغییرات شتاب دیوارهای مخزن  
ب) فشار هیدرودینامیکی

نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد با کاهش ضخامت دیوار برش پایه ناشی از فشار هیدرودینامیکی بر روی دیوار افزایش می‌یابد و همچنین محل قرارگیری برآیند نیز تغییر می‌کند. مقدار به دست آمده برش پایه در مدل ششم که بر پایه روابط آیین‌نامه و بر اساس روش جرم افزوده می‌باشد، ۴۱۲/۲ کیلونیوتن شده است که این مقدار بسیار بیشتر از برش پایه سایر مدل‌ها می‌باشد که بیان‌کننده محافظه‌کارانه بودن رابطه آیین‌نامه است.

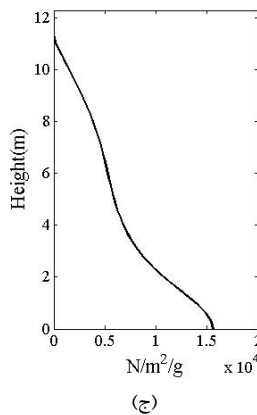
نسبت میرایی از خواص مهم سازه بوده که تعیین تحلیلی آن امکان‌پذیر نیست و برای تعیین نسبت میرایی هر سازه نیاز به آزمایش‌هایی از قبیل آزمایش مودال بر روی سازه مورد نظر و یا سازه‌های مشابه آن می‌باشد. پژوهشگران با آزمایش‌های مختلف نسبت میرایی را برای برخی از سازه‌ها با مصالح متفاوت تعیین نموده و آن‌ها را به آیین‌نامه‌ها پیشنهاد کرده‌اند [۱۳]. اغلب آیین‌نامه‌ها به صورت متعارف نسبت میرایی را ۵٪ برای مخزن خالی و پر از آب در نظر می‌گیرند و این در حالی است که آب درون مخزن موجب تغییر میرایی سیستم آب و سازه می‌شود. در پژوهش‌های صورت گرفته بر روی مخازن مستطیلی بتنی [۹، ۱۱] نسبت میرایی برای مخزن خالی و پر از آب ۵٪ در نظر گرفته شده است. در این پژوهش به منظور بررسی اثر نسبت میرایی (ک) بر روی پاسخ‌های دینامیکی مخازن، مدل دوم با نسبت‌های مختلف میرایی به روش پیشنهادی گام به گام تحلیل شد. جدول (۳) خلاصه نتایج و شکل‌های (۹) و (۱۰) نیز به ترتیب توزیع فشار هیدرودینامیکی و برش پایه مخزن را برای نسبت‌های مختلف میرایی ارائه می‌دهند.



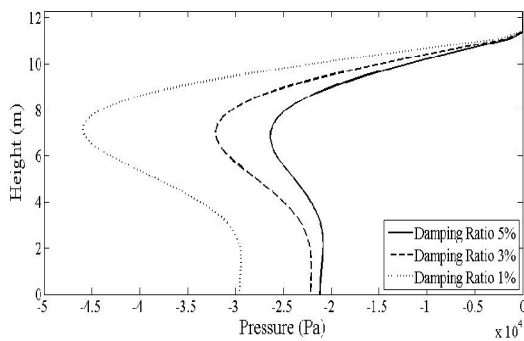
(الف)



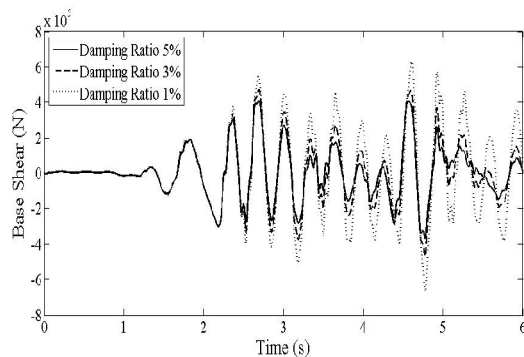
(ب)



(ج)

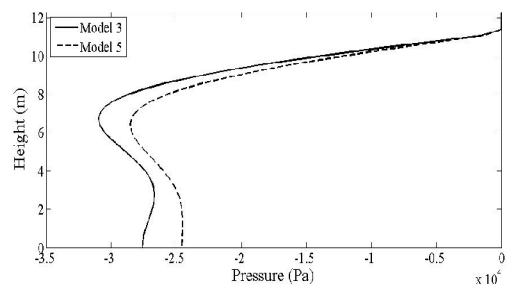


شکل ۹- توزیع فشار هیدرودینامیکی برای مدل دوم برای نسبت‌های مختلف میرایی



شکل ۱۰- نمودار تغییرات زمان- برش پایه مدل دوم برای نسبت‌های مختلف میرایی

شکل ۷- الف) توزیع فشار هیدرودینامیکی، ب) شتاب بدنه مخزن، ج) منحنی وابستگی این دو پارامتر برای مدل دوم



شکل ۸- توزیع فشار هیدرودینامیکی برای مدل‌های سوم و پنجم



جدول ۳- خلاصه نتایج تحلیل دینامیکی مدل دوم با نسبت‌های میرایی متفاوت

$\zeta$ (%)	$\alpha$	$\beta$	$F_{max}$ (kN)	$M_{max}$ (kN.m)	$d_{max}$ (cm)
۵	۱/۵۵۲۰	۰/۰۰۲۶۷	۴۰۹/۴۴	۲۷۰۰/۰	۳/۵۸
۳	۰/۹۳۰۹	۰/۰۰۱۶۰	۴۷۱/۷۳	۳۲۷۷/۹	۴/۳۷
۱	۰/۳۱۰۳	۰/۰۰۰۵۳	۶۶۷/۶۸	۴۶۲۷/۱	۶/۰۴

مقایسه نتایج تحلیلی مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری دیوارها، فشار هیدرودینامیکی بر روی دیوارها و مقدار برش پایه ناشی از آن تغییر می‌کند؛ به طوری که با کاهش ضخامت دیوارها، فشار هیدرودینامیکی وارده بر دیوارها افزایش می‌یابد. با کاهش ضخامت دیوار از ۱/۴ به ۰/۸ متر، مقدار برش پایه ناشی از فشار هیدرودینامیکی از ۲۲۱/۵۸ به ۳۰۷/۲۶ کیلونیوتن افزایش یافته است. در این تحقیق با استفاده از نتایج به دست آمده از تحلیل برای هر مخزن، منحنی وابسته میان فشار هیدرودینامیکی و شتاب بدنه مخزن ترسیم و جرم افزوده متناظر آن تعیین شد. مقادیر این جرم افزوده برای هر مدل متفاوت بوده و می‌توان نتیجه گرفت جرم افزوده نیز تابعی از انعطاف‌پذیری سازه می‌باشد. این در حالی است که روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌ها با فرض صلب بودن دیوارها تعیین شده و مقدار جرم افزوده برای کلیه مدل‌ها ثابت است.

به منظور بررسی اثر نسبت میرایی بر روی پاسخ‌ها، مدلی با درصد‌های مختلف میرایی با استفاده از روش پیشنهادی تحلیل شد. نتایج نشان می‌دهند که با کاهش نسبت میرایی در روابط، مقادیر برش پایه، لنگر پای دیوار و تغییر مکان سر آزاد دیوار مخزن افزایش می‌یابد. مقادیر برش پایه، لنگر پای دیوار و تغییر مکان سر آزاد دیوار مخزن برای کاهش میرایی از ۵٪ به ۱٪ حدود ۴۰٪ افزایش داشته‌اند. از آن‌جا که نسبت میرایی برای مخازن با ابعاد مختلف و میزان ارتفاع آب درون آن متفاوت می‌باشد، فرض ثابت ۵٪ برای نسبت میرایی صحیح نبوده و با توجه به نقش بسیار مهمی که این نسبت در تحلیل و طراحی مخازن دارد باید در تحلیل لرزه‌ای مخازن به صورت دقیق‌تری در نظر گرفته شود.

#### ۶- مراجع

- [1] Chen, J., "Dynamic Response of Concrete Rectangular Liquid Storage Tanks", MSc Thesis, Ryerson University, Toronto, Canada, 2003.
- [2] Westergard, H. M., "Water Pressure on Dams during Earthquakes", Transaction of American Society of Civil Engineering, 1933, 98, (2), 418-433.

از مقادیر ارائه شده در جدول (۳) و نمودار شکل‌های (۸) و (۹) نتیجه می‌شود که با کم شدن نسبت میرایی، مقادیر برش پایه، لنگر پای دیوار و تغییر مکان سر آزاد دیوار مخزن به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند. مقادیر برش پایه، لنگر پای دیوار و تغییر مکان سر آزاد دیوار مخزن برای کاهش میرایی از ۵٪ به ۱٪ حدود ۴۰٪ افزایش داشته‌اند. بنابراین مشاهده می‌شود که مقدار نسبت میرایی نقش بسیار مهمی در تحلیل و طراحی مخازن دارد که باید در تحلیل لرزه‌ای مخازن مورد توجه قرار گیرد. نسبت میرایی برای مخازن با ابعاد هندسی مختلف و همچنین با تغییرات ارتفاع آب درون مخزن از حالت خالی تا پر کامل می‌تواند متفاوت باشد. در آیین‌نامه‌ها که مدل دینامیکی مخازن بر اساس روش جرم افزوده است، این مسئله به صورت مستقیم در نظر گرفته نمی‌شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش معادله حرکت دیوارهای مخازن ذخیره آب و رابطه فشار هیدرودینامیکی که در آن اثر انعطاف‌پذیری دیوارها در نظر گرفته شده با یکدیگر ترکیب و به صورت یک رابطه ارائه شدند. سپس به کمک این رابطه، یک روش گام به گام پیشنهاد شد که در آن فشار هیدرودینامیکی به عنوان یک بار خارجی که با شتاب دیوارها در هر لحظه زمانی تغییر می‌کند، بر روی دیوارها در نظر گرفته می‌شود و دیگر نیازی به استفاده از جرم افزوده بر روی دیوارها نمی‌باشد. روش پیشنهادی این مزیت را دارد که پاسخ در هر شرایطی دارای پایداری عددی می‌باشد و در حل مسئله، فشار هیدرودینامیکی در هر گام زمانی مربوط به همان گام است و از نتایج گام قبل به عنوان شرایط مرزی گام فعلی استفاده نمی‌شود. به منظور مقایسه پاسخ‌های دینامیکی از روش پیشنهادی گام به گام با نتایج حاصل از روش جرم افزوده که مبنای آیین‌نامه‌ها می‌باشد و همچنین بررسی اثر مشخصات هندسی دیوارها و نسبت میرایی مخزن بر روی پاسخ‌ها، پنج مدل از دیوارهای مخازن با ضخامت‌های مختلف تعریف و تحلیل شد.

- [9] Kim, J., Koh, H. Kwah, I., "Dynamic Response of Rectangular Flexible Fluid containers", ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1996, 122, (9), 807-816.
- [10] Park, J. H., Koh, H. M., Kim, J., "Liquid-Structure Interaction Analysis by Coupled Boundary Element-Finite Element Method in Time Domain", The 7th International Conference on Boundary Element Technology, BE-TECH/92, Computational Mechanics Publication, Southampton, England, 1992, pp 89-92.
- [11] Chen, J. Z., Kianoush, M. R., "Seismic Response of Concrete Rectangular Tanks for Liquid Containing Structures", Canadian Journal of Civil Engineering, 2005, 32, (4), 739-752.
- [12] Maheri, M. R., Severn, R. T., "Experimental Added-Mass in Modal Vibration of Cylindrical Structures", Engineering Structures, 1992, 14 (3), 163-175.
- [13] Newmark, N. M., Hall, W. J., "Earthquake Spectra and Design", Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, USA, 1982.
- [3] Housner, G. W., "The Dynamic Behavior of Water Tank", Bulletin of the Seismological Society of American, 1963, 74 (3), 1031-1041.
- [4] Abramson, H. N., "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., 1966.
- [5] Chiba, M., Yamaki, N., Tani, J., "Free Vibration of a Clamped-free Circular Cylindrical Shell Partially Filled with Liquid", Thin-Walled Structure, 1984, 2, 265-284.
- [6] Eberle, F., Kadlec, J., Haifinger, G., Sharnowell, R., "Experimental Modal Survey of a Vertical Cylindrical Shell Partly Filled with Water", Rep. KFK 4004, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Germany, 1986.
- [7] Veltsos, A. S., "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, 1984, pp 255-370.
- [8] Haroun, M. A., Housner, G. W., "Seismic Design of Liquid Storage Tanks", Journal of Technical Councils of ASCE, 1981, 107, 191-207.