

# بررسی رفتار ارتعاشی و پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن مستطیلی ذخیره آب

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

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

esfahani@um.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۹/۱۵

**چکیده-** برای بالا بردن دقت تحلیل دینامیکی مخازن ذخیره آب، بررسی مشخصه‌ها و رفتار ارتعاشی سیستم آب و سازه اهمیت دارد. برای بررسی رفتار ارتعاشی مخازن آب، یک مخزن مستطیلی فولادی ساخته و برای حالت‌های مختلف ارتفاع آب، آزمایش مودال روی آن انجام شد. محاسبه فشار هیدرودینامیکی، مهم‌ترین مسئله در تحلیل سیستم‌های آب و سازه است. در آیین‌نامه‌های طراحی، فشار هیدرودینامیکی آب بر بدنه مخزن با فرض صلب بودن دیوارها به دست می‌آید. در این مقاله برای در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری دیوارها در محاسبه فشار هیدرودینامیکی و در تحلیل دینامیکی سازه از یک روش پیشنهادی المان محدود به صورت حل گام‌به‌گام استفاده شده است. پس از تحلیل تاریخچه زمانی، تحت شتاب افقی زمین، پاسخ‌های دینامیکی شامل تغییر مکان‌ها، برش‌های پایه و فشارهای هیدرودینامیکی بررسی شد. از مقایسه پاسخ‌ها نتیجه گرفته می‌شود که استفاده از روش جرم افزوده که به وسیله آیین‌نامه‌ها بر پایه مدل هاسنر پیشنهاد شده، محافظه کارانه است.

**کلید واژگان:** آزمایش مودال، انعطاف‌پذیری دیوارها، رفتار ارتعاشی، فشار هیدرودینامیکی، مخازن آب

## ۱- مقدمه

فشار هیدرودینامیکی، مهم‌ترین مسئله در تحلیل سیستم‌های آب و سازه است. اثر فشار هیدرودینامیکی، از مدت‌ها پیش بر سازه مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. وسترگارد [۱] اولین راه حل را برای یک سد عمودی تحت شتاب افقی ارائه کرد. او نشان داد که فشار هیدرودینامیکی اعمال شده بر سطح به علت زلزله ناشی از حرکت زمین، معادل نیروی اینرسی جسم آب قرار گرفته روی سد است. پس از آن هاسنر [۲] یک روش تقریبی برای تعیین فشار

با توجه به رشد فزاینده جمعیت و توسعه شهرها، طراحی، ساخت و نگهداری مخازنی که برای ذخیره‌سازی آب استفاده می‌شود از اهمیت دارد. حجم زیادی از مطالعات انجام شده در ارتباط با تخمین فشار هیدرودینامیکی در مخازن و سدها به گونه‌ای بوده که از اثر اندرکنش آب و سازه چشم‌پوشی شده؛ به طوری که اثر آن‌ها به صورت نیروها و جرم افزوده در نظر گرفته شده است. محاسبه

شکل‌مودها) با بررسی روابط و مدل‌های تئوری انجام می‌شود که به‌عنوان یک آزمایش غیرمخرب می‌توان از آن بهره برد. در این مقاله مطالعات آزمایشی و تحلیلی با هدف بررسی پارامترهای مختلف روی مشخصه‌های ارتعاشی و پاسخ‌های دینامیکی برای مخازن مستطیلی فولادی انجام شده است. در قسمت تحلیلی از یک روش جدید پیشنهادی المان محدود استفاده شده است که در آن اثر انعطاف‌پذیری دیوارهای مخزن در محاسبه فشار هیدرودینامیکی در نظر گرفته می‌شود.

## ۲- فشار هیدرودینامیکی ناشی از شتاب افقی

شکل (۱-الف) یک مخزن مستطیلی سه‌بعدی را نشان می‌دهد که فرض شده به‌صورت 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  $L_y$  به ترتیب به موازات و عمود بر راستای زلزله در نظر گرفته شده‌اند. ارتفاع مایع  $H_1$  از کف مخزن است و مایع به‌صورت تراکم‌ناپذیر و با چگالی  $\rho_1$  فرض شده است.

شکل (۱-ب) هندسه مخزن با عرض  $L = 2L_x$  و عمق مایع  $H_1$  در یک مخزن مستطیل دوبعدی را نشان می‌دهد. معادله دیفرانسیلی جزئی حاکم به‌صورت زیر است [۱۰]:

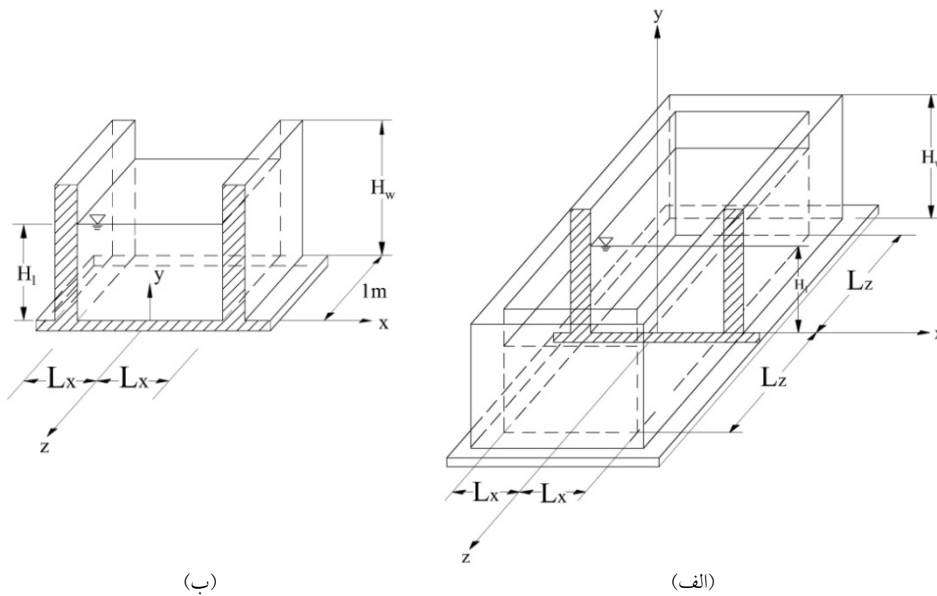
$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

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  $v_y = \partial \phi / \partial y$  است. فشار هیدرودینامیکی  $p$  به‌صورت رابطه (۲) است.

هیدرودینامیکی ناشی از شتاب افقی ارائه داد و فرض کرد که مایع درون مخزن تراکم‌ناپذیر بوده و دیواره‌های آن صلب است. این روش در بسیاری از آیین‌نامه‌ها برای محاسبه فشار هیدرودینامیکی مخازن گفته شده است. طبق تئوری هاسنر، مدل دینامیکی مایعات که درون مخزنی با جدار سخت قرار دارند، یک مدل با دو درجه آزادی است. در این مدل  $m_1$  آن قسمت از جرم مایع درون مخزن است که به همراه مخزن ارتعاش پیدا می‌کند و جرم سخت نامیده می‌شود.  $m_2$  آن قسمت از مایع درون مخزن است که به‌طور مستقل با زمان تناوبی بزرگ‌تر از زمان تناوب قسمت سخت و سازه نوسان می‌کند و جرم موج نامیده می‌شود. در ادامه، مدل‌هایی به‌وسیله‌ی آمبرسون [۳]، چپیا و همکاران [۴] و ابرل و همکاران [۵] 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 بیشتر این تحقیقات از جمله ولتسس [۶] و هارون و هاسنر [۷] برای مخازن استوانه‌ای بوده است. یکی از پژوهش‌های انجام شده در تحلیل دینامیکی مخازن مستطیلی ذخیره آب به‌وسیله‌ی کیم و پارک و همکاران [۸] و [۹] است که در محاسبه پاسخ‌ها از روش ترکیبی المان محدود و المان مرزی استفاده شده است. همچنین چن و کیانوش [۱۰] یک روش حل تکراری را برای محاسبه فشار هیدرودینامیکی روی دیوارهای مخازن مستطیلی [با در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری دیوارها] پیشنهاد کرده‌اند.

در بالا بردن دقت تحلیل دینامیکی مخازن ذخیره آب، علاوه بر در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری دیوارها، بررسی مشخصه‌ها و رفتار ارتعاشی سیستم آب و سازه نیز اهمیت دارد. آزمایش‌های ارتعاشی سازه‌ها برای مشخص کردن پارامترهای مودال (فرکانس‌های طبیعی، میرایی و



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

سرعت نسبی زمین به علت انعطاف پذیر بودن دیوارها است. پس از جایگذاری شرایط مرزی و حل مسئله، توزیع فشار هیدرودینامیکی برای دیوارهای انعطاف پذیر به صورت رابطه (۶) است [۱۰].

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

در رابطه (۶)  $\lambda_i = (2i-1)\pi/2H_1$  و  $\ddot{u}(t)$  شتاب در طول دیوار است. برای مخزن با دیوارهای صلب  $\ddot{u}(t) = \ddot{u}_g(t)$  است.

### ۳- آزمایش مودال

تحلیل مودال، روند شناسایی ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها با به کار بردن مدهای ارتعاشی آنها است. ویژگی‌های دینامیکی مورد نظر شامل فرکانس‌های ویژه، میرایی و شکل مودها است. پاسخ سازه در حوزه فرکانسی از ضرب ساده زیر به دست خواهد آمد [۱۱]:

$$U(\omega) = 2\pi H(\omega) \cdot P(\omega) \quad (7)$$

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

برای فشار ناشی از جرم سخت، شرایط مرزی به صورت زیر است.

• 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

اصلی و این دو صفحه فولادی از لوله‌های انعطاف‌پذیر و چسب استفاده شد تا بدین وسیله دیواره‌های اصلی تا حد خیلی زیادی همان رفتار طره‌ای را حفظ کنند. شکل (۲) نمونه و دستگاه آزمایشی و نحوه اتصال دیواره‌های کناری به دیواره‌های اصلی را نشان می‌دهد.

### ۳-۲- آزمایش مودال و نتایج

آزمایش مودال روی مخزن در سه حالت مخزن، بدون آب، نیمه پر و پر از آب انجام شد. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود در سطح دیوار تعداد ۱۸ درجه آزادی تعریف شده است. در همه‌ی آزمایش‌ها شتاب‌سنج در محل درجه آزادی خاصی انتخاب شد به طوری که در آن نقطه در سه شکل مود اول، دیوار دارای حرکت ارتعاشی باشد. در همه‌ی ۱۸ درجه آزادی، تحریک به وسیله‌ی چکش ضربه انجام شد. شکل (۳) یک نمونه از نمودارهای Coherence و FRF به دست آمده از آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودارهای عاری از اغتشاش بوده و قله‌های به وجود آمده در نمودار FRF بیانگر فرکانس مودهای خمشی و پیچشی است.

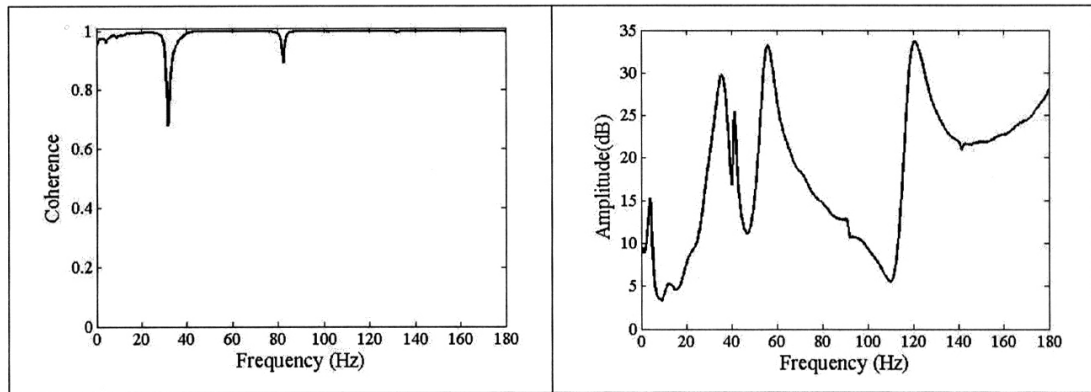
در آزمایش مودال تجربی، باید سازه را در درجه‌های آزادی مورد نظر با چکش ضربه تحریک کرد. پاسخ سازه با حسگرهای بسیار دقیق اندازه‌گیری و از نسبت پاسخ به تحریک، ماتریس  $H(\omega)$  بر پا می‌شود که این تحلیل‌ها به وسیله‌ی دستگاه تحلیل گر دوکاناله انجام می‌شود. نمودارهای پاسخ سازه در حوزه فرکانسی، همان نمودار  $H(\omega)$  نسبت به تغییرات  $\omega$  است. این نمودارها FRF نامیده می‌شوند و پارامترهای تجربی مودال (فرکانس، میرایی و شکل مود) از مجموعه‌ای از اندازه‌گیری FRFها به دست می‌آیند.

### ۳-۱- نمونه آزمایشی

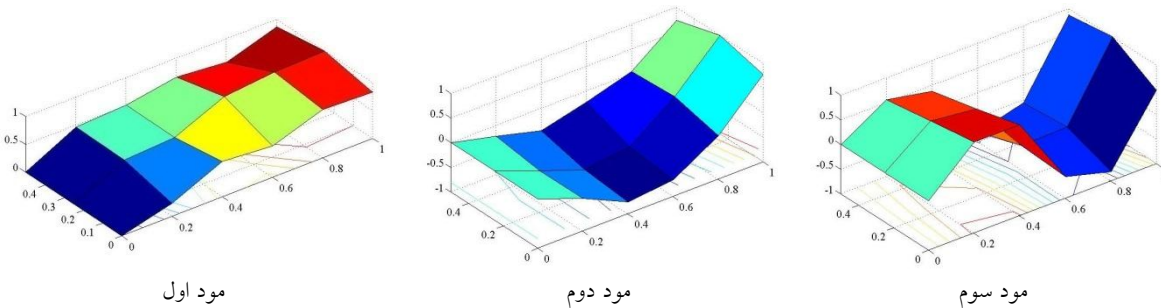
نمونه آزمایشی به صورت دو دیوار طره‌ای ساخته شد. ارتفاع دیواره‌های مخزن از صفحات فولادی به ابعاد  $1000 \times 500 \times 8 \text{ mm}$  طرح شد. دو دیواره مخزن روی یک صفحه به ابعاد  $900 \times 500 \times 10 \text{ mm}$  جوش داده شد و سپس مخزن به وسیله‌ی دو میله مهار رزوه شده به کف صلب آزمایشگاه متصل شد. برای محفوظ نگه داشتن آب مخزن در میان دو دیواره اصلی، از دو صفحه فولادی دیگر استفاده شد که این دو صفحه توسط دو میله مهار طولی به دیواره‌های اصلی نگه داشته شدند. برای اتصال دو دیوار



شکل (۲) دستگاه و نمونه آزمایشی



شکل (۳) نمودارهای Coherence و FRF



شکل (۴) سه شکل مود آزمایشی دیوارهای مخزن

جدول (۱) سه فرکانس اول مخزن را برای سه حالت آزمایش ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع مایع در مخزن، فرکانس‌های سازه کاهش می‌یابند.

#### ۴- روش تحلیلی پیشنهادی

معادله حاکم دینامیکی سازه به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$[M_w]\{\ddot{u}_a\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (۸)$$

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 می باشد و از رابطه (۶) تعیین می‌شود. با جدا نمودن شتاب مطلق به دو شتاب زمین ( $\ddot{u}_g$ ) و شتاب نسبی ( $\ddot{u}$ )، رابطه بالا را می‌توان به صورت زیر

پس از تحلیل نمودارها، فرکانس‌ها و شکل سه مود اول خمشی برای سه آزمایش مخزن خالی، نیمه‌پر و پر از آب به دست آمد. شکل (۴) سه شکل مود اول خمشی را برای مخزن خالی از آب نشان می‌دهد.

شکل مودها مشابه شکل مودهای یک صفحه طره‌ای است و نشان‌دهنده آن است که رفتار دیوارهای مخزن با توجه به قرار دادن لوله‌های لاستیکی در مرز آن، مشابه با صفحه طره‌ای است.

جدول (۱) فرکانس‌های به دست آمده از آزمایش (Hz)

فرکانس	خالی	نیمه‌پر	کامل‌پر
$f_1$	۶/۷۵	۴/۰	۳/۱۰
$f_2$	۵۷/۳	۵۰/۲۵	۳۶/۵۱
$f_3$	۱۲۲/۶	۹۵/۷۵	۷۱/۷۸

نوشت:

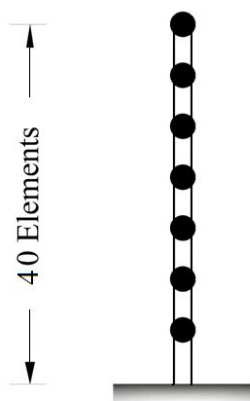
$U$  به عنوان مجموعه‌هایی از  $(i, j)$  شامل گره‌های درجه آزادی افقی که با مایع در تماس است، تعریف شده است. فاصله قائم بین گره‌ها با  $dh$  و عرض دیواره‌های مخزن با  $db$  نشان داده شده است. رابطه فوق با فرض روش انتگرال‌گیری مستطیلی بکار گرفته می‌شود. در کلیه تحلیل‌های پیش رو نسبت میرایی  $\zeta = 5\%$  در نظر گرفته می‌شود و در روش پیشنهادی، میرایی رابلی  $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$  مورد استفاده قرار گرفته است که در این رابطه پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  از روابط زیر تعیین می‌شوند.

$$\alpha = \frac{4\pi(T_j \lambda_j - T_i \lambda_i)}{T_j^2 - T_i^2} \quad (12)$$

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

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

شکل (۵) مدل المان محدود به‌کاررفته برای تحلیل دینامیکی مخزن را نشان می‌دهد. این مدل از المان‌های دوبعدی مرتبه سه قابی با درجه آزادی‌های نشان‌داده شده در شکل (۵-ب) ساخته شده است.



(الف) مشخصات هندسه و مواد

$$\begin{aligned} A &= 4 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \\ I &= 2.133 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \\ E_{st} &= 2.05 \times 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \\ \rho_{st} &= 77008 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \\ \nu &= 0.3 \end{aligned}$$

$$[M_w] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{P\} - [M] \{\ddot{u}_g\} \quad (9)$$

در این پژوهش با یک رابطه‌سازی، معادله حرکت و رابطه فشار هیدرودینامیکی با یکدیگر ترکیب شده و در قالب یک رابطه ارائه شده‌اند. رابطه فشار هیدرودینامیکی و شتاب سازه به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} p &= \sum_{n=1}^{\infty} P_n \\ P_n &= -\frac{2\rho_l}{\lambda_n H_l} \tan(\lambda_n L_x) \cos(\lambda_n y) \\ \int_{y=0}^{H_l} \cos(\lambda_n y) (\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)) dy, \lambda_n &= \frac{(2n-1)\pi}{2H_l} \end{aligned} \quad (10)$$

با فرض انتگرال‌گیری بر اساس قانون مستطیل ساده،  $[P_n]$  تابعی از شتاب‌های گره‌ای به صورت ماتریسی زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} [P_n] &= [p_n dh db] = -[M_n^*] [\ddot{u} + \ddot{u}_g] \\ (M_n^*)_{ij} &= \left( \frac{2\rho_l}{\lambda_n H_l} \tanh(\lambda_n L_x) \cos(\lambda_n y_i) \right) \\ &(\cos(\lambda_n y_j) dh) \quad \text{if } (i, j) \in U \\ (M_n^*)_{ij} &= 0 \quad \text{if } (i, j) \notin U \end{aligned} \quad (11)$$



(ب) المان قابی مرتبه‌سوم

شکل (۵) مدل المان محدود مخزن

## ۴-۱-۱-۱ نتایج تحلیلی

در این بخش مخزن مورد نظر با روش پیشنهادی گام به گام و روش معمول آیین نامه ای مورد تحلیل تاریخچه زمانی و تحلیل مودال قرار گرفته است. در روش پیشنهادی المان محدود، اثر انعطاف پذیری دیوارها در محاسبه فشار هیدرو دینامیکی در نظر گرفته شده است در صورتی که مخزن بر اساس روش آیین نامه ACI 350.3 با فرض صلب بودن دیوارها و استفاده از جرم افزوده به سازه و به کمک نرم افزارهای تحلیلی المان محدود، تحلیل شده است. جرم افزوده برای فشار هیدرو دینامیکی ناشی از جرم سخت به کمک روش هاسنر قابل محاسبه است. این جرم برای حالت توزیع شده به صورت رابطه (۱۴) و برای حالت متمرکز به صورت رابطه (۱۵) است [۱۰].

در این بخش مخزن مورد نظر با روش پیشنهادی گام به گام و روش معمول آیین نامه ای مورد تحلیل تاریخچه زمانی و تحلیل مودال قرار گرفته است. در روش پیشنهادی المان محدود، اثر انعطاف پذیری دیوارها در محاسبه فشار هیدرو دینامیکی در نظر گرفته شده است در صورتی که مخزن بر اساس روش آیین نامه ACI 350.3 با فرض صلب بودن دیوارها و استفاده از جرم افزوده به سازه و به کمک نرم افزارهای تحلیلی المان محدود، تحلیل شده است. جرم افزوده برای فشار هیدرو دینامیکی ناشی از جرم سخت به کمک روش هاسنر قابل محاسبه است. این جرم برای حالت توزیع شده به صورت رابطه (۱۴) و برای حالت متمرکز به صورت رابطه (۱۵) است [۱۰].

$$m_i(y) = -\frac{\sqrt{3}\rho_1 H_1}{2} \left[1 - \frac{y^2}{H_1^2}\right] \tanh\left(\frac{\sqrt{3}L_x}{H_1}\right) \quad (14)$$

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

این روابط را می توان از رابطه (۶) برای شرایط دیوار در حالت صلب که مشابه رابطه هاسنر است استخراج کرد.

$$m_i(y) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2(-1)^i \rho_1}{\lambda_i^2 H_1} \tanh(\lambda_i L_x) \cos(\lambda_i y) \quad (16)$$

$$M_{i, total} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\lambda_i^3 H_1^2 L_x} \tanh(\lambda_i L_x) M_L \quad (17)$$

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

$$\frac{h_i}{H_1} = 0.5 - 0.09375\left(\frac{L}{H_L}\right) \text{ for } \frac{L}{H_1} < 1.333 \quad (18)$$

$$\frac{h_i}{H_1} = 0.375 \text{ for } \frac{L}{H_1} > 1/333 \quad (19)$$

برای تحلیل دینامیکی، از شتاب ثبت شده شتاب نگاشت

## ۴-۱-۱-۲ مخزن خالی

برای مخزن خالی سه مدل متفاوت تحلیل و بررسی شد:

۱- مدل جرم متمرکز شده معادل.

۲- در این مدل جرم دیوار مخزن مستطیلی در ارتفاع توزیع شده و در تحلیل دینامیکی از روش برهمنهی مودها استفاده شده است.

۳- در مدل سوم، جرم دیوار مخزن در ارتفاع آن توزیع شده و مدل از روش پیشنهادی گام به گام تحلیل شده است. در این روش بازه تغییرات زمانی  $\Delta t = 0/0025$  در نظر گرفته شده است. شکل (۶) سه مدل مخزن خالی را نشان می دهد. نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی سه مدل بالا در جدول (۲) خلاصه شده است. در این جدول  $f_i$  فرکانس مودهای مختلف سازه،  $\gamma$  درصد میرایی،  $F_B$  برش پایه،  $d_A$  تغییر مکان سر آزاد دیوارهای طره ای و  $t_{max}$  زمانی است که تغییر مکان بیشینه در آن اتفاق افتاده است.

نتایج جدول (۲) نشان می دهد که برش پایه در مدل اول که جرم متمرکز است، ۱۹۱/۳N بوده که این مقدار از برش پایه در مدل های دوم و سوم که در آن جرم دیوار توزیع شده بیشتر است.

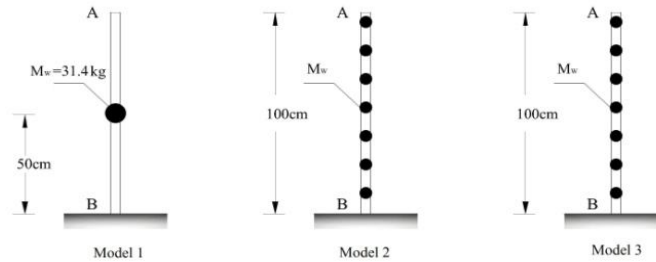
## ۴-۱-۲-۱ مخزن پر از آب

برای حالتی که مخزن پر از آب باشد، شش مدل در نظر گرفته شده است. در مدل ۱ جرم مایع سخت از روش هاسنر (رابطه ۱۵) تعیین شده است که این جرم و جرم دیوارهای سازه هر دو به صورت متمرکز روی دیوار قرار

در رابطه بالا  $h_i$  ارتفاع از پایه دیوار تا مرکز جرم قسمت سخت مایع،  $h_w$  ارتفاع از پایه دیوار تا مرکز جرم دیوارها،  $M_i$  جرم متمرکز معادل مایع سخت و  $M_w$  جرم متمرکز معادل دیوار است.

گرفته‌اند. مدل دوم مشابه مدل اول است با این تفاوت که جرم سخت متمرکز از روش پیشنهادی کیانوش (رابطه ۱۷) به دست آمده است. این جرم‌ها در ارتفاع معادل ( $h$ ) که از رابطه زیر تعیین می‌شوند، قرار گرفته‌اند.

$$h = \frac{M_i h_i + M_w h_w}{M_i + M_w} \quad (20)$$



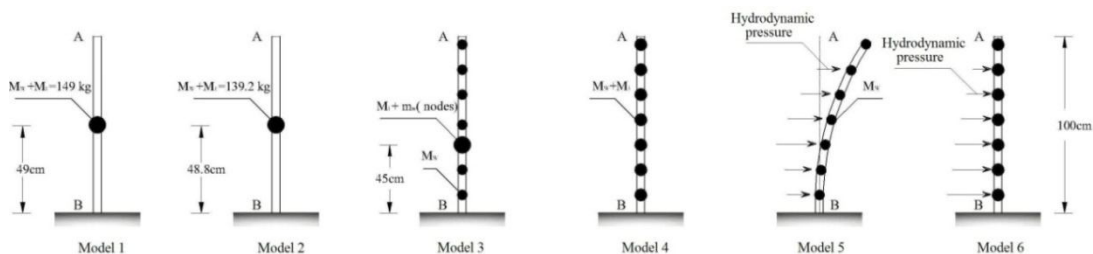
شکل (۶) سه مدل مخزن خالی از آب

جدول (۲) نتایج پاسخ دینامیکی برای مخزن خالی از آب

سوم	دوم	اول	مدل
-----	$f_1 = 6/7, f_2 = 42/12, f_3 = 117/78$	$f_1 = 9/53$	فرکانس (Hz)
$\alpha = 3/6731$ $\beta = -0.0102$	0/05	0/05	میرایی
3/595	3/575	5/05	$t_{max} (s)$
115/8	130	191/3	$F_B (N)$
4/7	5/47	4/28	$d_A (mm)$

جدول (۳) خواص مختلف مدل‌های مخزن پر از آب

مدل	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم
دیوار	جرم متمرکز- انعطاف پذیر	جرم متمرکز- انعطاف پذیر	جرم توزیع شده- انعطاف پذیر	جرم توزیع شده- انعطاف پذیر	جرم توزیع شده- انعطاف پذیر	جرم توزیع شده- صلب
مایع	جرم متمرکز	جرم متمرکز	جرم متمرکز	جرم توزیع شده	فشار توزیع شده	فشار توزیع شده
مدل تعریف شده	مدل تعریف شده	چن و کیانوش	هاسنر (آیین نامه)	هاسنر (آیین نامه)	رابطه ۶	رابطه ۶



شکل (۷) شش مدل مخزن پر از آب



است. البته این مقدار برش پایه از مقادیر برش پایه به دست آمده در سه مدل اول کمتر است.

شکل (۸) تغییرات شتاب و فشار هیدرودینامیکی در ارتفاع دیوار مخزن را زمانی که برش پایه به مقدار بیشینه رسیده، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۸-ب) مشاهده می‌شود فشار هیدرودینامیکی در صورتی که انعطاف‌پذیری دیوار در نظر گرفته شود، بیشتر از فشاری است که دیوار به صورت صلب در نظر گرفته شود.

مدل ششم، مشابه مدل پنجم است با این تفاوت که دیوارهای مخزن صلب است. همان‌طور که از جدول (۴) برداشت می‌شود برش پایه در مدل ششم از مدل پنجم که دیوارهای آن انعطاف‌پذیر است از مقدار  $N$  به  $783N$  به  $419/5$  کاهش یافته است. در واقع مدل ششم یک مدل خاصی است که در آن دیوار مخزن کاملاً صلب است و دیوار با حرکت زمین جابه‌جا می‌شود.

#### ۴-۲- مقایسه نتایج آزمایشی و تحلیلی

آزمایش و تحلیل‌ها در سه مرحله مخزن خالی، نیمه‌پر و پر از آب انجام شده است. شکل (۹) نمودار تغییرات نسبی فرکانس مود دوم و سوم از نتایج آزمایش و تحلیل را نشان می‌دهد.

در نمودارهای بالا  $H/H_w$  نسبت ارتفاع آب به ارتفاع دیوار است. از مقایسه پاسخ‌های جدول (۱) و مدل چهارم در جدول (۴) نتیجه گرفته می‌شود که فرکانس‌های به دست آمده از آزمایش و تئوری در حالت مخزن خالی با یکدیگر مطابقت دارد ولی با افزایش ارتفاع آب با توجه به نمودارهای شکل (۸) نتیجه گرفته می‌شود که اختلاف میان آن‌ها بیشتر می‌شود. از علت‌های نبود تطابق کامل نتایج آزمایشی و تحلیلی در حالت مخزن پر از آب می‌توان به متمرکز در نظر گرفتن جرم مایع روی دیوارها اشاره کرد. همچنین جرم‌های متمرکز با فرض صلب بودن دیوارها تعیین شده‌اند که در واقعیت دیوارها انعطاف‌پذیر است.

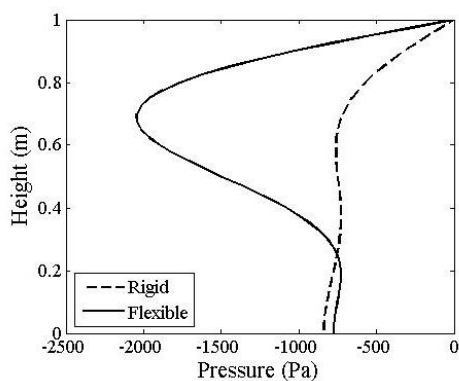
در مدل سوم، جرم دیوار در ارتفاع توزیع شده و جرم مایع سخت به صورت متمرکز مطابق رابطه هاسنر در ارتفاع  $h_i$  قرار گرفته است. در مدل چهارم، جرم مایع سخت از رابطه (۱۴) تعیین شده و در ارتفاع دیوار توزیع شده است. در مدل پنجم که از روش پیشنهادی تحلیل شده است، فشار هیدرودینامیکی با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری دیوارها تعیین شده و به عنوان بار خارجی روی دیوار اعمال می‌شود. مدل ششم مشابه مدل پنجم بوده با این تفاوت که دیوارها به صورت صلب در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۷) شش مدل مخزن پر از آب را نشان می‌دهد. خواص مختلف شش مدل و نتایج تحلیل دینامیکی آن‌ها به ترتیب در جداول ۳ و ۴ خلاصه شده است.

نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد که پاسخ‌های مدل دوم که جرم روی دیوار آن از روابط چن و کیانوش و با فرض صلب بودن دیوارهای مرزی استخراج شده با مدل اول که از رابطه هاسنر استفاده شده مشابه است ولی برش پایه حدود ۱۲٪ کاهش داشته است. از مقایسه برش پایه مدل‌های اول و سوم که طبق دستورالعمل و رابطه آیین‌نامه‌های معتبر است با مدل‌های چهارم و پنجم نتیجه گرفته می‌شود که برش پایه در این مدل‌ها بسیار بیشتر است که نشان از محافظه‌کارانه بودن آیین‌نامه‌ها دارد.

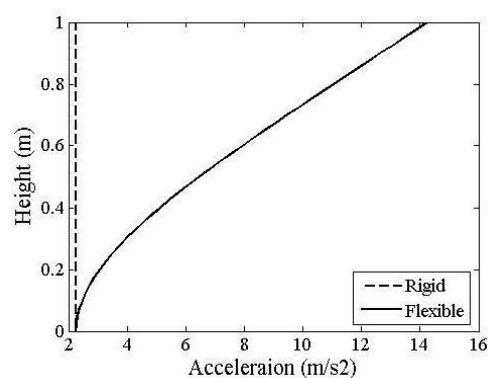
فرکانس‌های طبیعی سازه در مدل چهارم در دو مود اول نزدیک به مدل سوم است ولی برش پایه آن به‌طور چشم‌گیری کاهش داشته است. این کاهش تأثیر توزیع جرم در ارتفاع دیوار مخزن است. در تحلیل مدل پنجم از روش پیشنهادی گام‌به‌گام استفاده شده است که در آن فشار هیدرودینامیکی با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری دیوارها محاسبه شده و به عنوان بار خارجی روی دیوارها وارد شده است. برش پایه در این مدل نسبت به مدل چهارم افزایش داشته است که علت این افزایش انعطاف‌پذیری دیوار و افزایش فشار هیدرودینامیکی

جدول (۴) خلاصه نتایج تحلیل دینامیکی مدل‌های مخزن پر از آب

ششم	پنجم	چهارم	سوم	دوم	اول	مدل
---	---	$f_1 = 4/24$ $f_2 = 22/73$ $f_3 = 61$	$f_1 = 4/48$ $f_2 = 19/8$ $f_3 = 109/53$	$f_1 = 4/71$	$f_1 = 4/55$	فرکانس (Hz)
$\alpha = 0, \beta = 0$	$\alpha = 2/2456, \beta = 0/00185$	0/05	0/05	0/05	0/05	میرایی
2/165	2/6025	2/55	2/55	2/55	2/55	$t_{max} (s)$
419/5	783	581/7	910	889	1004	$F_B (N)$
0	29/3	19/96	21/43	19	21/45	$d_A (mm)$

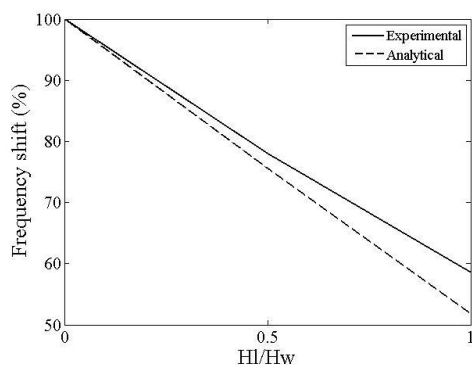


(ب)

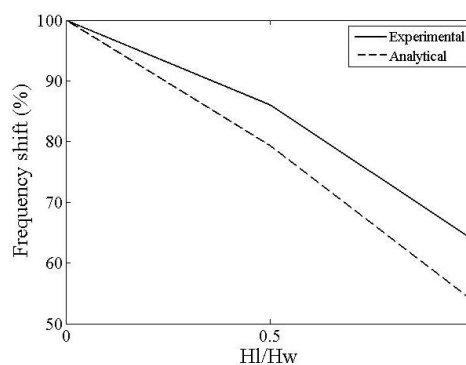


(الف)

شکل (۸) (الف) - تغییرات شتاب (ب) - فشار هیدرودینامیکی در ارتفاع دیوار مخزن



(ب) مود سوم



(الف) مود دوم

شکل (۹) نمودار تغییرات فرکانس مود دوم و سوم

## ۵- نتیجه گیری

آمده از روابط تحلیلی و آیین‌نامه‌ای نتایج زیر حاصل شد:  
 ۱- در بخش تحلیلی پژوهش حاضر معادله حرکت سازه و رابطه فشار هیدرودینامیکی که در آن اثر انعطاف‌پذیری دیوارها در نظر گرفته شده با یکدیگر ترکیب شده و به صورت

در این مقاله رفتار ارتعاشی و پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن مستطیلی ذخیره آب به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی شد. براساس نتایج آزمایشگاهی و مقادیر به دست

- Society of Civil Engineering, Vol. 98, 1933.
- [2] Housner, G. W.; "The dynamic behavior of water tank", Bulletin of the Seismological Society of American, Vol. 74(3), 1963, 1031-1041.
- [3] 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.
- [4] Chiba, M., Yamaki, N., and Tani, J.; "Free vibration of a clamped-free circular cylindrical shell partially filled with liquid", Thin-Walled structure, Vol. 2, 1984, 265-284.
- [5] Eberle, F., Kadlec, J., Haifinger, G., and Sharnowell, R.; "Experimental modal survey of a vertical cylindrical shell partly filled with water", Rep. KFK 4004, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Germany, 1986.
- [6] 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, N. Y., 1984, 255-370.
- [7] Haroun, M. A., Housner, G. W.; "Seismic design of liquid storage tanks", J. Tech. Councils of ASCE, ASCE, 107, 1981, 191-207.
- [8] Kim, J., Koh, H. and Kwah, I.; "Dynamic response of rectangular flexible fluid containers", Journal of Eng. Mechanics, ASCE. Vol. 122, No. 9, 1996, 807-816.
- [9] Park, J. H., Koh, H. M. and Kim, J.; "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. 1992, 89-92.
- [10] Chen, J.Z. and Kianoush, M.R.; "Seismic response of concrete rectangular tanks for liquid containing structures", Canadian Journal Of Civil Engineering, 2005, 739-752.
- [11] Lynch, J. P.; "Advanced Structural Dynamics and Smart Structures", Michigan University, CEE810(CEE619), Fall Semester 2004-2005.

یک رابطه ارائه شده‌اند. سپس به کمک این رابطه یک روش گام‌به‌گام پیشنهاد شده که در آن فشار هیدرودینامیکی به‌عنوان یک بار خارجی که با شتاب دیوارها در هر لحظه زمانی تغییر می‌کند، روی دیوارها در نظر گرفته می‌شود و دیگر نیازی به استفاده از جرم افزوده روی دیوارها نیست. برای مقایسه پاسخ‌های دینامیکی از روش پیشنهادی گام‌به‌گام با نتایج حاصل از روش جرم افزوده که مبنای آیین‌نامه‌ها است، شش مدل مختلف تعریف شد. در چهار مدل اثر مایع مطابق با روش جرم افزوده به‌صورت جرم متمرکز و یا گسترده روی دیوارها قرار گرفت و در دو مدل دیگر از روش پیشنهادی گام‌به‌گام برای تحلیل تاریخچه زمانی مخازن استفاده شد که در یک مدل دیوار مخزن انعطاف‌پذیر بوده و در دیگری به‌صورت صلب در نظر گرفته شده است. از مقایسه برش پایه‌های حاصل از مدل‌های مختلف فوق نتیجه گرفته می‌شود که برش پایه در روش تحلیلی پیشنهادی گام‌به‌گام نسبت به روش جرم افزوده آیین‌نامه‌ای بسیار کمتر است که نشان از محافظه‌کارانه بودن آیین‌نامه‌ها و دقیق نبودن مدل جرم افزوده دارد.

۲- مقایسه نتایج تحلیلی مدل‌های مختلف فوق الذکر نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری دیوارها، فشار هیدرودینامیکی روی دیوارها و مقدار برش پایه افزایش می‌یابد. در عین حال مقدار برش پایه در این حالت از مقادیر برش پایه آیین‌نامه‌ای همچنان کمتر است.

۳- پاسخ‌های آزمایشی و تحلیلی نشان می‌دهند که با افزایش ارتفاع مایع درون مخزن، مقدار فرکانس سازه کاهش می‌یابد. فرکانس‌های به‌دست آمده از آزمایش و تئوری در حالت مخزن خالی با یکدیگر مطابقت داشته ولی با افزایش ارتفاع آب اختلاف میان آن‌ها بیشتر می‌شود.

## ۶- مراجع

- [1] Westergard, H. M.; "Water Pressure on Dams During Earthquakes", Transaction, American

# Seismic Response and Free Vibration of Rectangular Liquid Storage Tanks

A.S. Ghods<sup>1</sup>, M.R. Esfahani<sup>2\*</sup>

1- Ph.D. Student, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Prof., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

esfahani@um.ac.ir

## Abstract:

The experimental study of structural vibration is often performed to determine the modal parameters of a structure or to verify the theoretical models and predictions. The first phase of this research involved the experimental determination of the modal properties of a rectangular steel tank with different levels of water. The natural frequencies obtained from the experiments were compared to those calculated by the analytical models.

In the second phase, a procedure for computing hydrodynamic pressures in rectangular tanks is proposed. This procedure considers the effect of tank wall flexibility in determining the hydrodynamic pressures produced by the impulsive response. Based on a two-dimensional model of the tank wall, a dynamic time-history analysis was carried out. The results were compared with other models based on the current design practice codes and standards, which use a lumped mass approach. The comparison shows that, in most cases, the lumped mass approach overestimates the base shear. The effect of wall flexibility on wall displacements and base shears are also discussed.

**Keywords:** Dynamic analysis, Hydrodynamic pressure, Model test, Rectangular tanks, Wall flexibility