

مدل مکانیکی برای مخازن استوانه‌ای شکل تحت اثر حرکت گهواره‌ای پی

خسرو برگی

دانشیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

اسدا... نورزاد

استادیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

علی طبائی بفرئی

کارشناس ارشد سازه دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۷۷/۱۲/۱۵، تاریخ تصویب: ۷۸/۴/۱۵)

چکیده

در این مقاله، یک مدل تحلیلی مکانیکی برای مخازن استوانه‌ای شکل با در نظر گرفتن اثر حرکت گهواره‌ای و جانبی پی ارائه می‌شود. عبارات تحلیلی برای پارامترهای مدل داده می‌شوند و مقادیر عددی آنها نیز به صورت نمودار نمایش داده می‌شوند. در مقاله حاضر، تنها مخازن با دیواره صلب مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این مدل می‌تواند برای ارزیابی پاسخ دینامیکی یک مخزن استوانه‌ای با دیواره صلب که در معرض بارگذاری زلزله با یا بدون حرکت گهواره‌ای قرار دارد، استفاده شود.

کلید واژه‌ها: مدل مکانیکی، مخازن استوانه‌ای شکل، حرکت گهواره‌ای پی

مقدمه

مخازن ذخیره مایعات یکی از المانهای حیاتی و پر اهمیت در جوامع امروزی می‌باشند. مخازن برای ذخیره سیالات از مایعات غیرسمی و غیرقابل اشتعال تا مواد شیمیایی بسیار سمی و قابل اشتعال، مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکست سازه‌ای آنها پس از وقوع زلزله علاوه بر زیان اقتصادی ممکن است قطع آب، آتش‌سوزیهای کنترل نشده، اتلاف و نشت مواد شیمیایی سمی یا آلوده کننده محیط زیست را به همراه داشته باشد، که گاهی خسارتی بیش از خود زلزله را باعث می‌شوند. اثر فشارهای هیدرودینامیک روی دیواره مخازن نه تنها در مهندسی عمران مورد توجه می‌باشد، بلکه در کاربردهای هوافضا نیز جایی که حرکت سوخت در مخزن مشکلاتی در کنترل هوابیما یا فضاپیما بوجود می‌آورد، اهمیت دارد. به همین دلیل آنالیز دینامیکی مخازن ذخیره مایعات، موضوع مطالعات متعدد و یکی از زمینه‌های فعال تحقیقات علوم مهندسی در دهه‌های اخیر بوده است.

از آنجائیکه معادلات حرکت و آنالیز یک سیستم با جرمهای مجزا، ساده‌تر و ملموس‌تر از فرمولبندی آنالیز یک محیط پیوسته تغییر شکل پذیر می‌باشد و همچنین

کل نیرو و لنگر اعمال شده به مخزن توسط مایع در هنگام زلزله پارامترهای مهمی می‌باشند، مطالعات زیادی برای جایگزینی مدل‌های مکانیکی به جای مایع درون مخزن انجام شده است. گراهام و رودریگز [۴] رفتار مایع درون یک مخزن مستطیلی را با یک سیستم مکانیکی چند درجه آزادی متشکل از جرم و فنر معادلسازی کردند. هاسنر [۷] با استفاده از یک روش تقریبی، مدلی با دو جرم متمرکز برای معادلسازی اثر مایع درون مخازن صلب ارائه کرد. این مدل در بسیاری از آیین‌نامه‌های طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از آن، هاسنر [۸] با استفاده از این مدل، یک آنالیز دینامیکی ساده بر اساس روش طیف پاسخ برای مخازن هوائی ارائه کرد. هارون [۶] و ولتسوس [۹] نیز در سالهای مختلف هر کدام به نحوی روی مسأله شبیه سازی مکانیکی کار کرده‌اند. در مطالعه حاضر، حرکت گهواره‌ای پی نیز علاوه بر حرکت جانبی در نظر گرفته شده است. این حرکت در یک مخزن زمینی در اثر اندرکنش خاک پی با مخزن و در یک مخزن هوائی در اثر اندرکنش برج نگهدارنده با مخزن بوجود می‌آید. در عمل به علت انعطاف پذیری خاک پایه، پی مخزن تحت اثر

فرضیات - فرض می‌شود برای مخزن و مایع داخل آن شرایط زیر برقرار باشند:

- ۱- دیواره مخزن صلب می‌باشد.
- ۲- تغییر مکانها کوچک می‌باشند.
- ۳- مایع همگن، غیر ویسکوز و تراکم ناپذیر می‌باشد.
- ۴- حرکت مایع غیرچرخشی می‌باشد.
- ۵- پی مخزن تحت اثر حرکت افقی $x(t)$ و حرکت دورانی $\alpha(t)$ قرار دارد.

معادلات حاکم بر حرکت مایع - برای آنالیز حرکت مایع باید تابع پتانسیل سرعت، $\phi(r, \theta, z; t)$ ، بدست آورده‌شود، که با توجه به فرضیات فوق معادله لاپلاس را اکتفا می‌کند:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{در } \Omega, \text{ محیط اشغال شده توسط مایع}) \quad (1)$$

علاوه بر آن ϕ باید شرایط مرزی مناسبی را نیز اکتفا کند، به صورت زیر:

- ۱- در کف مخزن، $z = 0$ ، سرعت مایع در جهت قائم باید برابر با سرعت قائم کف صلب باشد:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z}(r, \theta, 0; t) = -r\dot{\alpha}(t) \cos \theta \quad (2)$$

- ۲- سرعت شعاعی مایع مجاور دیواره مخزن، $r = R$ ، باید برابر با سرعت شعاعی دیواره باشد:

$$\frac{\partial \phi}{\partial r}(R, \theta, z; t) = (\dot{x}(t) + z\dot{\alpha}(t)) \cos \theta \quad (3)$$

- ۳- در سطح آزاد مایع، $z = H$ ، شرط مرزی خطی شده زیر برای موج سطحی می‌تواند نوشته‌شود:

$$g \frac{\partial \phi}{\partial z}(r, \theta, H; t) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}(r, \theta, H; t) = 0 \quad (4)$$

که g شتاب ثقل می‌باشد.

حل معادله حاکم بر مایع

برای حل این مسأله، ϕ به صورت مجموع دو جزء $\phi_i(r, \theta, z; t)$ و $\phi_c(r, \theta, z; t)$ بیان می‌شود. جزء ضربانی ϕ_i و جزء نوسانی ϕ_c می‌باشد. جزء ϕ_i شرایط مرزی واقعی در دیواره و کف مخزن و شرط صفر بودن فشار هیدرودینامیک در $z = H$ را اکتفا می‌کند. در

حرکت افقی خالص نیز حرکت گهواره‌ای را تجربه می‌کند. در این مقاله، یک مدل تحلیلی مکانیکی برای مخازن صلب استوانه‌ای شکل با در نظر گرفتن اثر حرکت گهواره‌ای پی ارائه می‌شود.

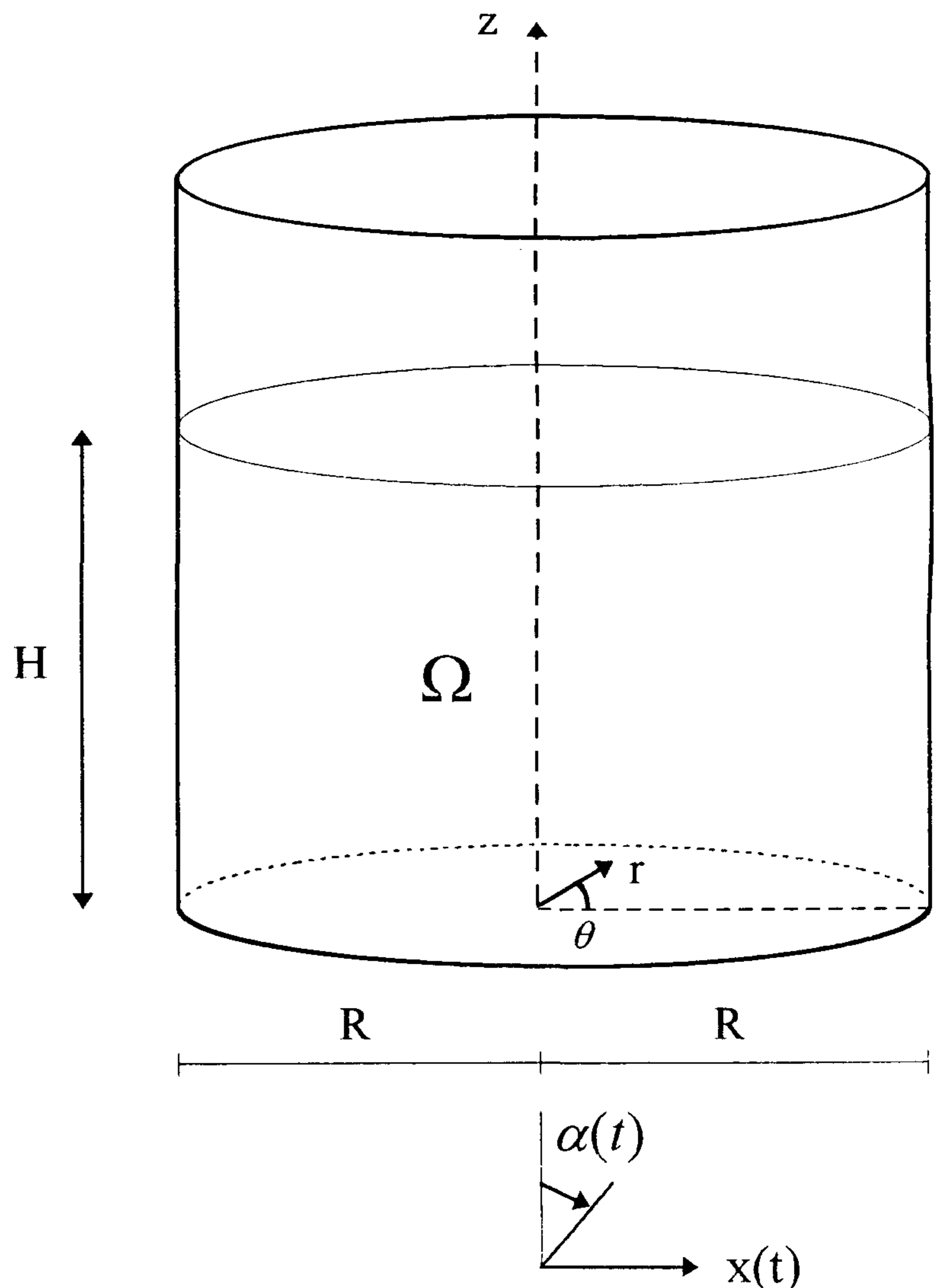
ویژگیهای مدل حاضر

مدل حاضر ویژگیهای زیر را دارد:

- ۱- می‌تواند به طور همزمان اثر جابجائی افقی پی و دوران پی را در نظر بگیرد.
- ۲- لنگرهای محاسبه شده در مدل، شامل لنگرهای ناشی از گسترش فشارهای هیدرودینامیک بر کف مخزن نیز می‌باشد.
- ۳- عبارات تحلیلی برای پارامترهای مدل ارائه شده‌اند که به آسانی می‌تواند روی کامپیوتر برنامه‌ریزی شود.

مبانی آنالیز

هندسه مخزن - مخزن مورد مطالعه یک مخزن استوانه‌ای به شعاع R می‌باشد که تا ارتفاع H از مایع پر شده است (شکل ۱). از یک سیستم مختصات استوانه‌ای که مبدأ آن، مرکز کف مخزن می‌باشد، استفاده می‌شود.



شکل ۱: هندسه مخزن و سیستم مختصات.

$$\nabla^2 \phi_0 = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial z} \Big|_{z=0} = -2r\dot{\alpha}(t) \cos \theta \quad (16)$$

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial r} \Big|_{z=H} = -[\ddot{x}(t) + H\ddot{\alpha}(t)]r \cos \theta \quad (18)$$

با حل معادله (۱۵) به روش جداسازی متغیرها، خواهیم داشت: (جواب معین در $r=0$)

$$\phi_0(r, \theta, z; t) = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n(t) \cosh\left(\frac{\lambda_n z}{R}\right) + B_n(t) \sinh\left(\frac{\lambda_n(z-H)}{R}\right)] J_1\left(\frac{\lambda_n r}{R}\right) \cos \theta \quad (19)$$

که J_1 تابع بسل نوع اول و مرتبه اول می باشد. λ_n ، $A_n(t)$ و $B_n(t)$ به ترتیب با ارضای شرایط مرزی (۱۷)، (۱۸) و (۱۶) بدست می آیند:

$$J_1'(\lambda_n) = 0 \quad (20)$$

$$A_n(t) = -\frac{2R[\dot{x}(t) + H\dot{\alpha}(t)]}{(\lambda_n^2 - 1)J_1(\lambda_n) \cosh\left(\frac{\lambda_n H}{R}\right)} \quad (21)$$

$$B_n(t) = -\frac{4R^2 \dot{\alpha}(t)}{\lambda_n (\lambda_n^2 - 1) J_1(\lambda_n) \cosh\left(\frac{\lambda_n H}{R}\right)} \quad (22)$$

با معلوم شدن ϕ_0 و در نتیجه ϕ_i ، جزء ضربانی فشار هیدرودینامیک یعنی P_i برابر خواهد بود با:

حالیکه ϕ_c ، اختلاف بین شرط مرزی واقعی در $z = H$ و شرطی که در حل ϕ_i در نظر گرفته شد را اصلاح می کند. فرم ریاضی این مسأله در قسمت بعد بیان شده است:

$$\phi(r, \theta, z; t) = \phi_i(r, \theta, z; t) + \phi_c(r, \theta, z; t) \quad (5)$$

$$\nabla^2 \phi_i = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial z} \Big|_{z=0} = -r\dot{\alpha}(t) \cos \theta \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial r} \Big|_{r=R} = (\dot{x}(t) + z\dot{\alpha}(t)) \cos \theta \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial r} \Big|_{z=H} = 0 \quad (9)$$

$$\nabla^2 \phi_c = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \phi_c}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \phi_c}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 \phi_c}{\partial z^2} + g \frac{\partial \phi_c}{\partial z} = -g \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \quad (z = H) \quad (13)$$

جزء ضربانی حل

ϕ_i می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\phi_i(r, \theta, z; t) = [\dot{x}(t) + z\dot{\alpha}(t)]r \cos \theta + \phi_0(r, \theta, z; t) \quad (14)$$

در این صورت ϕ_0 باید شرایط زیر را برآورده کند:

$$F_n(t) = \frac{2\rho g}{\beta_n(\lambda_n^2 - 1)} \int_0^t \left[-\lambda_n \tan g\left(\frac{\lambda_n H}{R}\right) \ddot{x}(t) + \left(R - \frac{2R}{\cosh\left(\frac{\lambda_n H}{R}\right)} - \lambda_n H \cdot \tanh\left(\frac{\lambda_n H}{R}\right) \right) \ddot{\alpha}(t) \right] \sin \beta_n(t - \tau) d\tau \quad (29)$$

که β_n در رابطه (۲۹) برابر است با:

$$\beta_n^2 = \frac{g}{H} D_{0n} \quad (30)$$

و پارامتر بدون بعد D_{0n} از رابطه (۳۱) بدست می‌آید:

$$D_{0n} = \frac{\lambda_n H}{R} \tanh\left(\frac{\lambda_n H}{R}\right) \quad (31)$$

نیروی برشی و لنگر خمشی وارد به پی مخزن

کل نیروی برشی و لنگر خمشی وارد به پی مخزن از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$Q(t) = \int_0^H \int_0^{2\pi} [P_i(R, \theta, z; t) + P_c(R, \theta, z; t)] R \cos \theta d\theta dz \quad (32)$$

$$M(t) = \int_0^H \int_0^{2\pi} [P_i(R, \theta, z; t) + P_c(R, \theta, z; t)] Rz \cos \theta d\theta dz + \int_0^R \int_0^{2\pi} [P_i(r, \theta, 0; t) + P_c(r, \theta, 0; t)] r^2 \cos \theta d\theta dr \quad (33)$$

پس از انجام عملیات انتگرالگیری، روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$Q(t) = m_l [D_1 \ddot{x}(t) + HD_2 \ddot{\alpha}(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n} \frac{g}{H} D_{3n} \int_0^t [\ddot{x}(\tau) + HD_{4n} \ddot{\alpha}(t)] \sin \beta_n(t - \tau) d\tau] \quad (34)$$

$$M(t) = m_l H [E_1 \ddot{x}(t) + HE_2 \ddot{\alpha}(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n} \frac{g}{H} E_{3n} \int_0^t [\ddot{x}(\tau) + HD_{4n} \ddot{\alpha}(t)] \sin \beta_n(t - \tau) d\tau] \quad (35)$$

$$P_i(r, \theta, z; t) = -\rho \frac{\partial \phi_i}{\partial t} = -\rho \cos \theta \{ r[\ddot{x}(t) + z\ddot{\alpha}(t)] - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R \cosh\left(\frac{\lambda_n z}{R}\right)}{(\lambda_n^2 - 1) \cosh\left(\frac{\lambda_n H}{R}\right)} [\ddot{x}(t) + H \left(1 + \frac{2 \sinh\left[\frac{\lambda_n(z-H)}{R}\right]}{\frac{\lambda_n H}{R} \cdot \cosh\left(\frac{\lambda_n z}{R}\right)} \right) \ddot{\alpha}(t)] \cdot \frac{J_1\left(\frac{\lambda_n r}{R}\right)}{J_1(\lambda_n)} \} \quad (23)$$

جزء نوسانی حل

در این قسمت بجای اینکه ابتدا پتانسیل سرعت ϕ_c بدست آورده شود و سپس جزء فشار نوسانی از رابطه $p_c = -\rho \frac{\partial \phi_c}{\partial t}$ برآورد شود، معادلات حاکم از ابتدا بر حسب فشار نوشته می‌شوند و از حل معادلات، p_c به طور مستقیم بدست آورده می‌شود.

معادلات حاکم بر ϕ_c یعنی معادلات (۱۰) تا (۱۳) را بر حسب فشار، می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\nabla^2 p_c = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial p_c}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial p_c}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0 \quad (26)$$

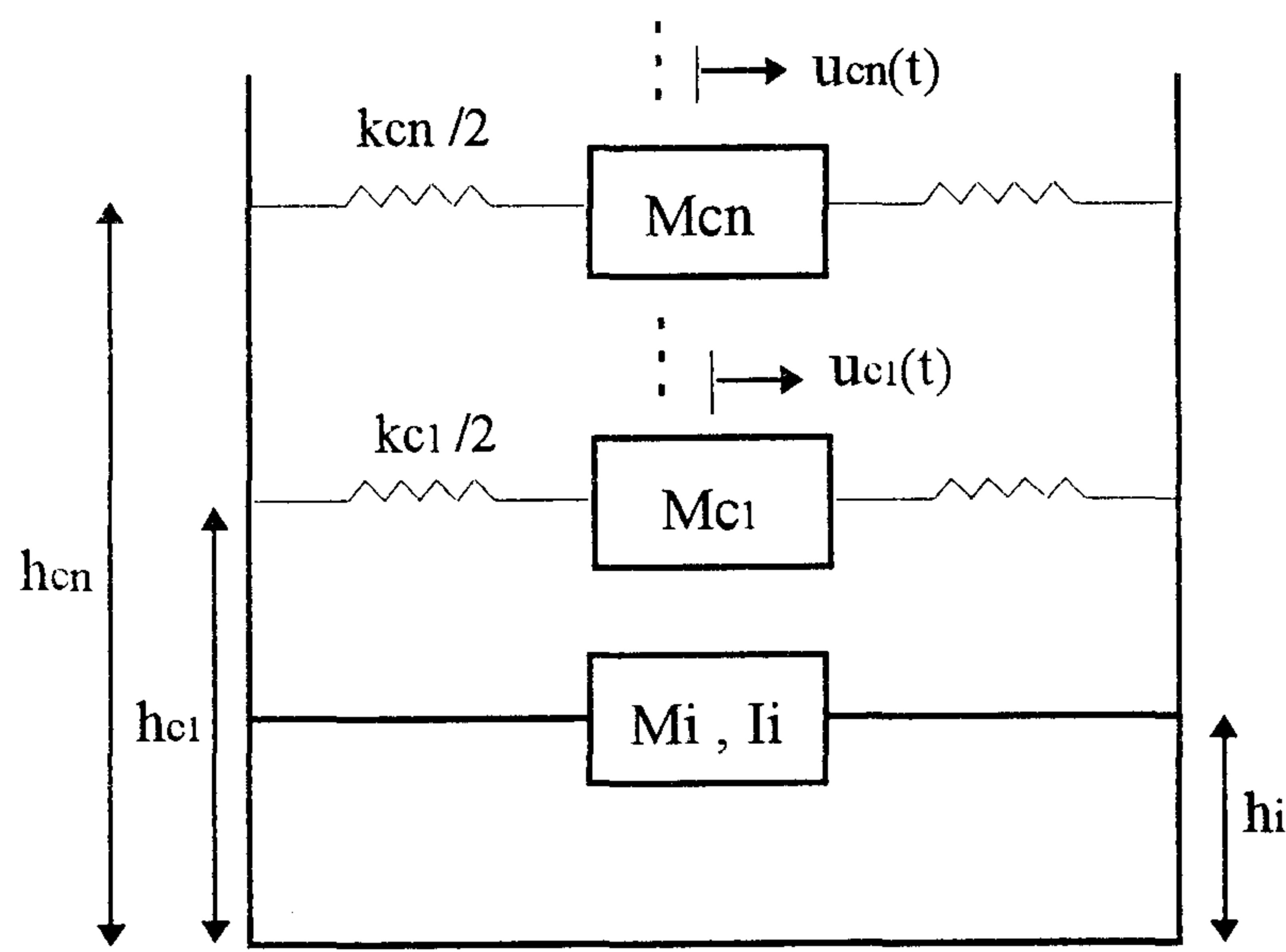
$$\frac{\partial^2 p_c}{\partial z^2} + g \frac{\partial p_c}{\partial z} = -g \frac{\partial p_i}{\partial z} \quad (z=H) \quad (27)$$

با استفاده از روش جداسازی متغیرها، حل معادله (۲۴) که در $r=0$ معین می‌باشد و شرایط مرزی (۲۵) و (۲۶) را برآورده می‌کند، عبارت است از:

$$P_c(r, \theta, z; t) = \cos \theta \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) \frac{J_1\left(\frac{\lambda_n r}{R}\right)}{J_1(\lambda_n)} \frac{\cosh\left(\frac{\lambda_n z}{R}\right)}{\cosh\left(\frac{\lambda_n H}{R}\right)} \quad (28)$$

که λ_n در رابطه $J_1'(\lambda_n) = 0$ صدق می‌کند.

عبارت $F_n(t)$ با جایگزینی روابط (۲۳) و (۲۸) در شرط مرزی (۲۷) و اقناع این شرط مرزی بدست می‌آید:



شکل ۲: مدل مکانیکی معادل.

اگر این مدل تحت اثر حرکت افقی و دورانی پایه، $x(t)$ و $\alpha(t)$ ، قرار گیرد، تغییر مکان جرمهائی که با فنر به دیواره متصل شده اند با استفاده از انتگرال دیوهامل برابر است با:

$$u_{cn}(t) = -\frac{1}{\beta'_n} \int_0^t [\ddot{x}(\tau) + h_{cn}\ddot{\alpha}(\tau)] \sin \beta'_n(t - \tau) d\tau \quad (44)$$

و مقادیر برش و لنگر پایه برای چنین مدلی از روابط زیر بدست می آیند:

$$Q(t) = -M_i[\ddot{x}(t) + h_i\ddot{\alpha}(t)] - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{cn}}{\beta'_n} \int_0^t [\ddot{x}(\tau) + h_{cn}\ddot{\alpha}(\tau)] \sin \beta'_n(t - \tau) d\tau \quad (45)$$

$$M(t) = -M_i h_i [\ddot{x}(t) + h_i\ddot{\alpha}(t)] - I_i \ddot{\alpha}(t) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{cn} h_{cn}}{\beta'_n} \int_0^t [\ddot{x}(\tau) + h_{cn}\ddot{\alpha}(\tau)] \sin \beta'_n(t - \tau) d\tau \quad (46)$$

در روابط قبل $\beta'_n = \frac{k_{cn}}{M_{cn}}$ می باشد.

با معادل قرار دادن رابطه (۳۴) با (۴۵)، نیروی برشی پایه، و رابطه (۳۵) با (۴۶)، لنگر خمشی پایه، مقادیر پارامترهای مدل به صورت زیر بدست می آیند:

$$M_i = -m_i D_1 \quad (47)$$

در روابط (۳۴) و (۳۵)، $m_i = \rho \pi R^2 H$ جرم سیاه درون مخزن می باشد و با تعریف $\mu_n = \frac{\lambda_n H}{R}$ ، ضرایب D و E برابرند با:

$$D_1 = -\left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \tanh(\mu_n)}{\mu_n (\lambda_n^2 - 1)} \right] \quad (36)$$

$$D_2 = -\left[\frac{1}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n (\lambda_n^2 - 1)} (\tanh(\mu_n) + \frac{2}{\mu_n \cosh(\mu_n)} - \frac{2}{\mu_n}) \right]$$

(۳۷)

$$D_{3n} = -\frac{2 \tanh^2(\mu_n)}{\lambda_n^2 - 1}$$

(۳۸)

$$D_{4n} = 1 - \frac{1}{\mu_n \tanh(\mu_n)} + \frac{2}{\mu_n \sinh(\mu_n)}$$

(۳۹)

$$E_1 = -\left\{ \frac{1}{2} + \frac{R^2}{4H^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n (\lambda_n^2 - 1)} [\tanh(\mu_n) - \frac{1}{\mu_n} + \frac{2}{\mu_n \cosh(\mu_n)}] \right\}$$

(۴۰)

$$E_2 = -\left\{ \frac{1}{3} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n (\lambda_n^2 - 1)} [\tanh(\mu_n) - \frac{1}{\mu_n} + \frac{4}{\mu_n \cosh(\mu_n)} - \frac{4 \tanh(\mu_n)}{\mu_n^2}] \right\}$$

(۴۱)

$$E_{3n} = D_{3n} D_{4n}$$

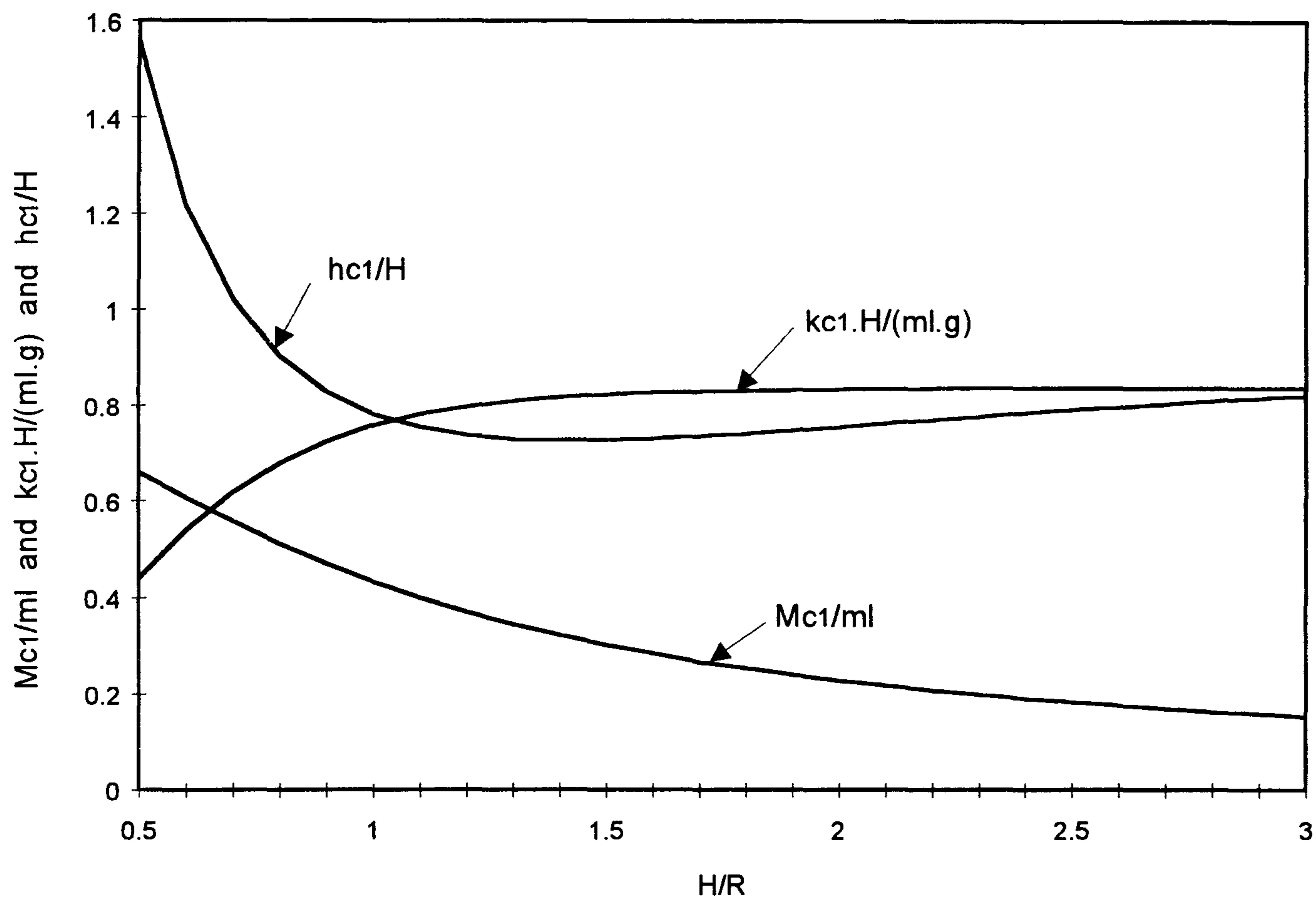
(۴۲)

$$E_{4n} = D_{4n}$$

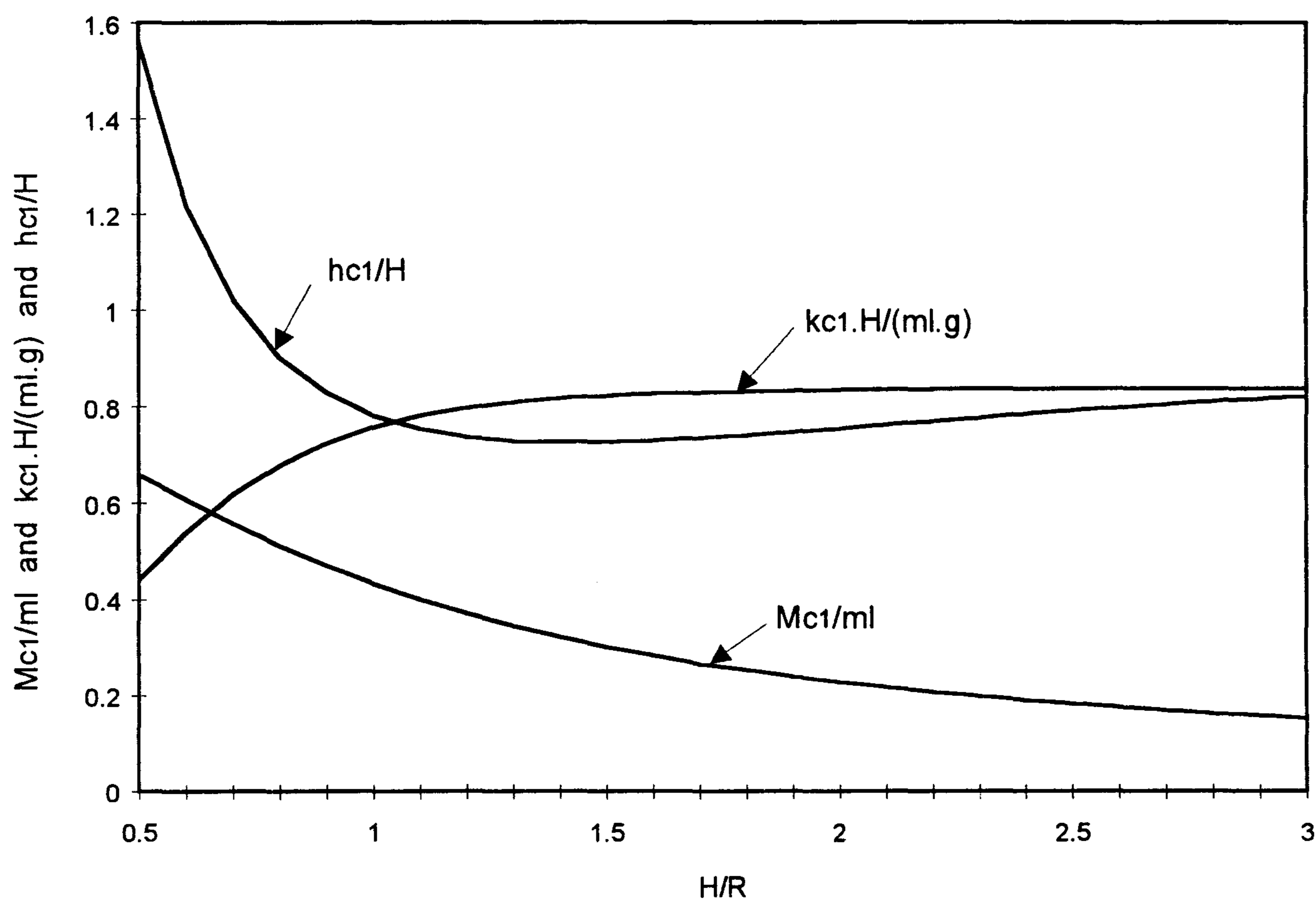
(۴۳)

مدل مکانیکی معادل

با توجه به شکل مقادیر برش و لنگر پایه مخزن، مدل نشان داده شده در شکل (۲) می تواند اثر معادل را داشته باشد.



شکل ۳: پارامترهای مدل مکانیکی معادل، مود ضربان.



شکل ۴: پارامترهای مدل مکانیکی معادل، مود اول نوسان.

جدول ۱: مقایسه پارامترهای مدل حاضر و مدل اپستین [۳]، مود ضربان

	پارامترهای مدل		
	$\frac{M_i}{m_i}$	$\frac{h_i}{H}$	$\frac{I_i}{m_i H^2}$
H/R=0.5			
مدل تحلیلی	0.301	1.463	0.402
مدل اپستین [۱]	0.288	2.261	-
H/R=1			
مدل تحلیلی	0.548	0.721	0.053
مدل اپستین [۱]	0.542	0.786	-
H/R=2			
مدل تحلیلی	0.763	0.501	0.023
مدل اپستین [۱]	0.782	0.506	-
H/R=3			
مدل تحلیلی	0.842	0.472	0.035
مدل اپستین [۱]	0.855	0.474	-

جدول ۲: مقایسه پارامترهای مدل حاضر و مدل هارون [۵]، مود اول نوسان

	پارامترهای مدل		
	$\frac{M_{cl}}{m_i}$	$\frac{h_{cl}}{H}$	$\frac{k_{cl}H}{m_i g}$
H/R=0.5			
مدل تحلیلی	0.660	1.561	0.441
مدل هارون [۴]	0.661	1.561	0.441
H/R=1			
مدل تحلیلی	0.432	0.782	0.757
مدل هارون [۴]	0.433	0.782	0.757
H/R=2			
مدل تحلیلی	0.227	0.755	0.835
مدل هارون [۴]	0.227	0.755	0.835
H/R=3			
مدل تحلیلی	0.151	0.822	0.837
مدل هارون [۴]	0.152	0.822	0.837

$$h_{cn} = HD_{4n} = HE_{4n} = H \frac{E_{3n}}{D_{3n}} \quad (53)$$

شکلهای (۳) و (۴) مقادیر نرمال شده پارامترهای مدل را ارائه می کنند. در مورد فشار نوسانی تنها مود اول رسم شده است (M_{cl} و k_{cl} و h_{cl})، زیرا اثر موده های مرتبه بالاتر در مقابل آن ناچیز است. البته موده های مرتبه بالاتر در زلزله های با محتوای فرکانسی بالا ممکن است اهمیت پیدا کنند، که در صورت لزوم می توان با استفاده از فرمولهای ارائه شده و با استفاده از یک برنامه کامپیوتر به سهولت آنها را محاسبه نمود. در جدول (۱)، مقایسه ای بین مقادیر پارامترهای مود ضربان در مدل حاضر و مدل ارائه شده در مرجع ۲ انجام

$$h_i = H \frac{D_2}{D_1} = H \frac{E_1}{D_1} \quad (48)$$

$$I_i = -m_1 H^2 \left[E_2 - \frac{D_2^2}{D_1} \right] = -m_1 H^2 \left[E_2 - \frac{E_1^2}{D_1} \right] \quad (49)$$

$$\beta_n'^2 = \beta_n^2 = \frac{g}{H} D_{0n} \quad (50)$$

$$k_{cn} = -m_1 \frac{g}{H} D_{3n} \quad (51)$$

$$M_{cr} = \frac{k_{cn}}{\beta_n'^2} = -m_1 \frac{D_{3n}}{D_{0n}} \quad (52)$$

معادل مکانیکی که قادر باشد برش و لنگر واژگونی پایه را در اثر تحریک مشابه دقیقا شبیه سازی کند، بسیار سودمند و کارا می باشد. در این مقاله، یک مدل مکانیکی برای مخازن صلب استوانه‌ای بدست آورده شده است که در آن حرکت گهواره‌ای پی به همراه حرکت جانبی لحاظ شده است. تفاوت این مدل با مدل‌های قبل در این است که جرمی که به صورت صلب به دیواره متصل می باشد، لنگر اینرسی دورانی نیز دارد. مقادیر پارامترهای مدل بدست آورده شده‌اند و مهندسین طراح می توانند آنها را با استفاده از نمودارها یا فرمولهای ارائه شده، محاسبه کنند. مدل حاضر می تواند برای مخازن هوایی یا زمینی مورد استفاده قرار گیرد.

شده است. در جدول (۲)، مقایسه بین پارامترهای مود اول نوسان در مدل حاضر و مدل ارائه شده در مرجع ۴ انجام شده است. در مدل‌های ارائه شده در مراجع ۲ و ۴، مخزن تنها تحت اثر حرکت افقی قرار دارد. مشاهده می شود که حرکت گهواره‌ای بر روی پارامترهای مود نوسان تأثیری ندارد و از همان مدل قبل وبا همان پارامترها، می توان برای معادلسازی اثر این مود استفاده کرد. در مورد مود ضربان نیز تنها یک ممان اینرسی دورانی، I_f ، به مدل‌های قبل اضافه می شود.

نتیجه گیری

جایگزین کردن مایع درون یک مخزن با یک مدل

مراجع

- ۱ - طبائی بفرئی، ع. "مدل تحلیلی مکانیکی برای مخازن حاوی مایعات تراکم پذیر تحت اثر تحریک پایه." پایان نامه کارشناسی ارشد، به سرپرستی دکتر خسرو برگی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تابستان (۱۳۷۷).
- 2 - Arfken, G. (1985). *Mathematical Methods for Physicists*. Third Edition, London, Academic Press.
- 3 - Epstein, H. I. (1976). "Seismic Design of Liquid Storage Tanks." *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 122, PP. 1659-1673
- 4 - Graham, E. W., and Rodriguez, A. M. (1952). "The Characteristics of Fuel Motion which Affect Airplane Dynamics." *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 19, PP. 381-388.
- 5 - Haroun, M. A. (1983). "Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, PP. 179-206.
- 6 - Haroun, M. A., and Ellaithy, H. M. (1985). "Model for Flexible Tanks Undergoing Rocking." *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 111, PP. 143-157.
- 7 - Housner, G. W. (1957). "Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 47, No. 1, PP. 15-35.
- 8 - Housner, G. W. (1963). "The Dynamic Behaviour of Water Tanks." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53, PP. 381-387.
- 9 - Veletsos, A. S., and Tang, Y. (1987). "Rocking Response of Liquid Storage Tanks." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 113, No. 11, PP. 1774-1792.