

مدلی برای مخازن هوایی آب با در نظر گرفتن اندرکنش دینامیکی سازه و آب در هنگام زلزله

محمدتقی احمدی^{۱*}، افشین کلانتری^۲

۱- استاد گروه سازه‌های هیدرولیکی، بخش مهندسی عمران؛ دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد دفتر امور فنی و تدوین معیارها، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور

*ایران؛ تهران؛ صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

mahmadi@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: دی ۱۳۸۰، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۲)

چکیده مدلی تحلیلی برای مخزن استوانه‌ای حاوی مایعات ارائه شده است. در این مدل سیستمی مرکب از گروه جرم و فنر جانشین سیستم مایع شده، به گونه‌ای که تحت شتاب افقی زمین، معادل مدل واقعی ایجاد برش پایه و لنگر واژگونی کند. در این مدل اثر هر تعداد از موده‌های ارتعاشی آب را می‌توان در نظر گرفت. مایع داخل مخزن تراکم ناپذیر، غیر لزج و با تغییر مکانهای کوچک فرض شده است. با منظور کردن اندرکنش آب و دیواره مخزن و سازه پایه، مدل دینامیکی مخازن هوایی نیز معرفی شده است. در این پژوهش اثر موده‌های اول و دوم تلاطم سطحی آب مخزن، سختی سازه پایه مخزن هوایی، ارتفاع آب در مخزن تحت اثر گروه شتاب‌گاشت‌هایی با دوره تناوبهای غالب مختلف زلزله محاسبه و بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که روابط آیین نامه زلزله ۲۸۰۰ در محدوده‌ای نسبتاً وسیع به نیروهای کمتر از مقدار واقعی منجر می‌شود. همچنین اگر دوره تناوب مود اول سازه افزایش یابد، اثر مود دوم تلاطم سطحی آب مخزن قابل توجه می‌شود. روشی برای بهبود روش تحلیل مخازن هوایی آب در آیین نامه ایران پیشنهاد شده است.

کلید واژگان: مخزن آب، اندرکنش آب و سازه، تحلیل دینامیکی، زلزله، آیین‌نامه، مخزن هوایی، تلاطم سطحی

۱- مقدمه

با توجه به اهمیت این سازه‌ها در شبکه‌های خدمات شهری و صنعتی، عملکرد ایمن آنها در زلزله برای پاسخ‌گویی به نیاز آبی شهروندان، اجتناب از آتش سوزی و خسارتهای زیست محیطی احتمالی از حساسیت خاصی برخوردار است. اطمینان یافتن از عملکرد درست این سازه‌ها در زمان زلزله، به لحاظ پیچیدگی رفتاری آنها به مطالعات بیشتری

مخازن هوایی مایعات فقط شامل برجهای هوایی ذخیره آب نمی‌شود بلکه مخازن با اشکال گوناگون دیگری مانند کروی و استوانه‌ای را نیز - که عموماً در واحدهای صنعتی مهمی مانند پالایشگاهها و طرحهای شیمیایی برای ذخیره مواد شیمیایی سمی و/یا قابل اشتعال مورد استفاده هستند - نیز در برمی‌گیرد.

مانند تلاطم‌های بزرگ، جدایی از پی و/ یا هندسه‌های متفاوت شکل مخزن پرداخته‌اند [۵].

مدلهای ساده شده مخزن‌های آب در آیین نامه‌های طراحی ساختمان در برابر زلزله کاربرد فراوانی دارد. آیین‌نامه‌های AWWA، API، UBC در سالهای اخیر از مدل‌های تک جرمی، مدل دو جرمی هائوسنر و/یا مدل‌های برگرفته از آن بهره گرفته‌اند. آیین‌نامه AWWA، برای محاسبه برش پایه در مخازن هوایی، مدلی ساده و تک جرمی و برای محاسبه لنگر پای مخزن، مدل دو جرمی برگرفته از روش هائوسنر را توصیه کرده است. آیین نامه API نیز با اندکی تغییر، الگویی مانند روش کاری آیین نامه AWWA را مقرر کرده است. در آیین نامه UBC نیز محاسبه برش پایه برای مخازن، در بخش سازه‌های غیر ساختمانی و با اعمال ضریبی به جرم کل مخزن و آب داخل آن صورت گرفته است. نسخه اول آیین نامه ۲۸۰۰ ایران نیز مدل تک جرمی بسیار ساده‌ای را برای مخزن هوایی و بر مبنای صرفنظر از اثر تلاطم سطحی پیشنهاد کرده است [۶]. نسخه دوم این آیین‌نامه با برداشتن یک گام به جلو، از مدل دو جرمی هائوسنر و مطابق نشریه ۱۲۳ سازمان برنامه و بودجه استفاده کرده است [۷].

بعد از آسیب‌های عمده به چند مخزن آب در زمین لرزه خرداد ۶۹ منجیل رودبار در باز بینی‌های آینده آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، نیاز به تدقیق مقررات طراحی مخازن هوایی آب بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، مدل ساده شده‌ای از رفتار این سازه‌ها - که اثر موده‌های اول و دوم تلاطم آب درون آن و نیز مود اول ارتعاش سازه پایه مخزن را منظور کرده - پیشنهاد می‌شود. مقایسه رفتار این مدل با مدل هائوسنر و مدل آیین‌نامه ایران، بیانگر اهمیت تلاطم سطحی و حتی اهمیت مود دوم آن، تحت شرایط لرزه‌ای خاص است.

نیاز دارد. این پیچیدگی از یک سو و از سوی دیگر لزوم درک اندرکنش مخزن و آب در هنگام بارگذاری و طراحی سازه، تحت تحریک دینامیکی در سازه نیاز به ارائه روشهای ساده را در آیین نامه‌ها دو چندان می‌کند.

در زمینه به دست آوردن مدل‌های دینامیکی ساده برای مخازن هوایی آب، اولین بار در سال ۱۹۵۹ هائوسنر [۱] به حل تحلیلی معادله فشار هیدرو دینامیکی آب روی دیواره اقدام کرد. وی سپس مدلی از جرم‌های متمرکز و فنر را جایگزین فشار حاصل از تلاطم آب نمود [۲]. این مدلها براساس طبیعت دیواره‌ها مخزن به دست آمده بود.

پس از آن، مدل دو جرمی، توسط شفرد برای مخازن هوایی آب توسعه یافت. فیشر در سال ۱۹۷۹ با فرض انعطاف پذیری مخزن استوانه‌ای اما بدون در نظر گرفتن تلاطم سطحی، معادله فشار هیدرو دینامیک را حل کرد [۳]. با وجود این در سال ۱۹۸۱ هارون با انجام آزمایشهایی نشان داد که انعطاف پذیری دیواره مخزن، اثر عمده‌ای بر پاسخ تلاطمی سطح آب ندارد. این به علت درگیری ناچیز موده‌های ارتعاشی تلاطمی با موده‌های سازه بود. در سال ۱۹۸۵ هارون مدل کاملتری از جرم و فنر تلاطمی و جرم سخت ارائه کرد که در آن انعطاف پذیری و جرم سازه بدنه مخزن با یک جرم و فنر اضافی جایگزین شد [۴].

وی در مدل دیگری، قابلیت پاسخگویی به تحریک چرخشی زمین را نیز علاوه بر تحریک افقی در نظر گرفت. در تمامی این کارها فقط مود اول تلاطم در مدل در نظر گرفته شده بود. باید توجه داشت که در کلیه این مدلها، مود اول تلاطمی نامتقارن مایع مبنای شبیه سازی بوده و در تحریک افقی مخزن، مود متقارن فاقد اهمیت است. مود متقارن در تحریک قائم مخزن فعال می‌شود، لیکن توان تولید برش پایه و گشتاور واژگونی را ندارد.

در کارهای بعدی که در اواخر دهه ۱۹۸۰ و در دهه ۱۹۹۰ منتشر شده، محققان، بیشتر به پدیده‌های غیرخطی

۲- مبانی هیدرو دینامیکی مدل مخزن

فرضه‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق عبارتند از: سیال تراکم ناپذیر و غیر لزج است و تغییر مکانهای سطحی آب کوچک است. مخزن هوایی استوانه‌ای با شعاع R مدنظر بوده که دارای دیواره صلب و پایه‌ای انعطاف پذیر است. تحریک پایه فقط در امتداد افقی صورت می‌گیرد.

رفتار مصالح، خطی فرض و از اندرکنش خاک پایه مخزن صرف نظر شده است. پایه مخزن گیردار است. از آثار P-Δ و درجه آزادی دورانی حول محور تقارن کف مخزن - که عمدتاً برای پاندول‌های وارونه مهم است - صرف نظر می‌شود. در صورتی که ϕ را تابع پتانسیل سرعت نسبی بدانیم، با توجه به فرضیات بالا، معادله حاکم بر محیط سیال در زمان تحریک، معادله لاپلاس است [۸]:

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

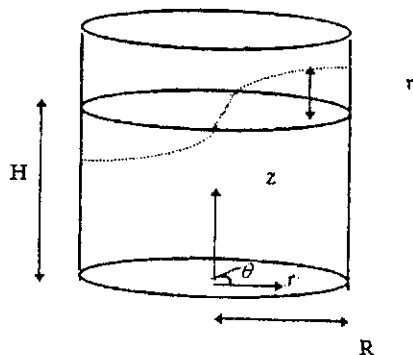
در این حال شرایط مرزی عبارت است از:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (2) \text{ در کف مخزن:}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \quad (3) \text{ در سطح دیواره:}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} + r \cos \theta a(t) = 0 \quad (4) \text{ در سطح آزاد دیواره:}$$

در این روابط (r,z,0) مولفه‌های مختصات استوانه‌ای، a(t) شتاب افقی تکیه‌گاه (در امتداد θ=0) سیال و t زمان است. (شکل ۱).



شکل ۱ مخزن استوانه‌ای آب و محورهای مختصات در آن

در صورتی که λ_n ریشه nام مشتق تابع بسط باشد، با در نظر گرفتن تابع متغیر با زمان $F_n(t)$ پاسخ معادله بالا با استفاده از جداسازی پارامترها، با شرایط مرزی فوق به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\phi(r, \theta, z, t) = \cos \theta \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) \frac{j_1 \left(\lambda_n \frac{r}{R} \right) \cosh \left(\frac{\lambda_n z}{R} \right)}{j_1(\lambda_n) \cosh \left(\frac{\lambda_n H}{R} \right)} \quad (5)$$

از حل این معادله به کمک معادله ۴، فرکانس تلاطم مود m را به شکل زیر می‌توان به دست آورد:

$$\beta_n = \sqrt{\frac{g \lambda_n}{R} \tanh \left(\lambda_n \frac{H}{R} \right)} \quad (6)$$

و با استفاده از رابطه زیر - که برای فشار کل سیال به دست آمده - است داریم:

$$P_d(r, \theta, z, t) = -\rho \left[\frac{\partial \phi}{\partial t} + r \cos \theta a(t) \right] \quad (7)$$

و بدین ترتیب پاسخ دینامیکی فشار کل را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$P_d(r, \theta, z, t) = -\rho \left[\cos \theta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R}{1 - \lambda_n^2} \left(a(t) - \beta_n \int_0^t a(t) \sin(\beta_n(t - \tau)) \right) \frac{j_1 \left(\lambda_n \frac{r}{R} \right) \cosh \left(\lambda_n \frac{z}{R} \right)}{j_1(\lambda_n) \cosh \left(\lambda_n \frac{H}{R} \right)} + r \cos \theta a(t) \right] \quad (8)$$

۳- مدل دینامیکی ساده شده سیال

از آنجا که مدل ریاضی بالا باید به مدل دینامیکی ساده‌ای تبدیل شود، محاسبه جرم‌ها و سختی‌ها در هر مود انجام می‌گیرد. با توجه به لزوم یکسان بودن برش پایه و ننگر واژگونی در حل تحلیلی به دست آمده و در مدل پیشنهادی، پارامترهای جرم و فنر مدل ساده شده و موقعیت آنها

$$m_n = \frac{k_n}{\beta_n^2} \bar{M} \left[\frac{2}{C_n(1-\lambda_n^2)} \tanh(C_n) \right] \quad (14)$$

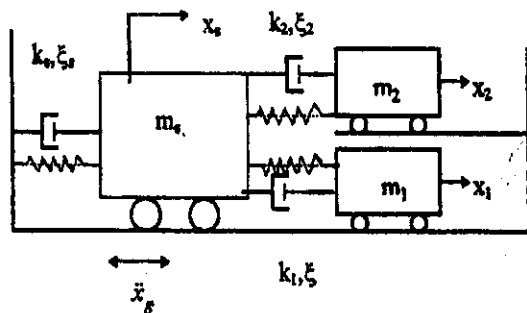
$$h_n = H \left[1 - \frac{1}{C_n \tanh(C_n)} + \frac{2}{C_n \sinh(C_n)} \right] \quad (15)$$

از تساوی برش پایه حاصل از حل تحلیلی مساله از یک سو و برش به دست آمده از نوشتن رابطه دو حامل، مقدار سختی فنر مود m_n به دست می آید. این مقدار عبارت است از:

$$k_n = -\bar{M} \frac{2\beta_n^2}{C_n(1-\lambda_n^2)} \tanh(C_n) \quad (16)$$

برای مخازن هوایی آب، پایه انعطاف پذیر را نیز می توان با یک فنر مدل کرد. همچنین در محاسبه لنگر واژگونی و برش پایه، باید جرم صلب آب در این مخازن، جرم دیواره و دال کف مخزن نیز منظور شود.

برای مدل سازی پایه انعطاف پذیر مخزن هوایی، از یک فنر با سختی k_s ، جرم سازه ای m_{ss} (متمركز) و میرایی ξ_s کمک می گیریم. در واقع برای سازه پایه، فقط مود اول حرکت برشی منظور شده است. بدین ترتیب برای سیستم آب و سازه - که به صورت نوسانگر سه درجه آزادی برشی عمل می کند - مدل دینامیکی معادل شکل (۲) پیشنهاد می شود.



شکل ۲ مدل دینامیکی ساده شده مخزن هوایی آب

در این جا $\ddot{x}_g(t)$ شتاب افقی زمین (در جهت $\theta = 0$)، m_1 ، k_1 ، ξ_1 جرم، سختی و درصد استهلاک موده های تلاطمی آب به ازای $i=1,2$ بوده، $m_s = m_{ss} + m_{sw}$ جرم سخت کل معادل

به دست می آید. برش پایه به دست آمده برای هر یک از موده های ارتعاشی مخزن این مدل، از انتگرال دو حامل قابل محاسبه است.

با این توضیح برش پایه Q و لنگر واژگونی M مخزن به صورت زیر محاسبه شده است [۴]:

$$Q(t) = \int_0^H \int_0^{2\pi} P_d(r, \theta, z, t) R \cos \theta d\theta dz \quad (9)$$

$$M(t) = \int_0^H \int_0^{2\pi} P_d(r, \theta, z, t) R z \cos \theta d\theta dz + \int_0^R \int_0^{2\pi} P_d(r, \theta, 0, t) r^2 \cos \theta d\theta dr \quad (10)$$

در رابطه ۱۰ انتگرال اول لنگر حاصل از فشار روی دیواره و انتگرال دوم، لنگر حاصل از فشار به کف مخزن است. جرم کل آب برابر $\bar{M} = \rho \pi R^2 H$ بوده و با فرض اینکه $C_n = \lambda_n H/R$ ، پردازش جزء مستقل از β_n در رابطه نیروی برشی، به محاسبه m_{sw} ، جرم سخت آب - که ناشی از ارتعاش ضربه ای حجم سیال است - منتهی می شود:

$$m_{sw} = \bar{M} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{C_n(1-\lambda_n^2)} \tanh(C_n) \right) \quad (11)$$

همچنین پردازش جزء مستقل از β_n در رابطه لنگر واژگونی نیز به محاسبه h_{sw} ارتفاع نظیر آن منتهی می شود:

$$h_{sw} = H \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{C_n(1-\lambda_n^2)} \left[\tanh(C_n) - \frac{1}{C_n} + \frac{2}{C_n \cosh(C_n)} \right] + \frac{1}{4 \left(\frac{H}{R} \right)^2} \right) \quad (12)$$

در نهایت پردازش جزء های وابسته به β_n (فرکانس موده های تلاطمی) از $Q(t)$ و $M(t)$ به تعیین جرم تلاطمی مود m_n و h_n ارتفاع نظیر آن منتهی می شود:

$$\beta_n^2 = \frac{\lambda_n g}{R} \tanh \left(\lambda_n \frac{H}{R} \right) \quad (13)$$

با این دستاورد نتایج مدل در ۳ وضعیت مختلف زیر تحت شتابنگاشت‌های متفاوت معرفی شده در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته که البته برخی از آنها در این مقاله آورده شده است.

الف- سازه و آب فقط با مود اول تلاطم (2DOF):

ب- سازه و آب با مودهای اول و دوم تلاطم (3DOF) برحسب پارامترهای این مطالعه:

ج- سازه و آب فقط با مود اول تلاطم براساس پارامترهای مدل هاوسنر (HS).

این شتابنگاشت‌ها از پایگاه داده‌های لرزه‌ای پژوهشگاه بین المللی زلزله برداشت شده است. بعلاوه برای هماهنگ سازی بارهای اعمال شده از نظر دامنه، تمام این شتابنگاشت‌ها برحسب دامنه بیشینه ۰/۳۵g همپایه (نرمالایز) شده‌اند.

آب و سازه و k_s ، k_s سختی برشی و درصد استهلاک پایه است. برای تعیین درصد استهلاک ξ_s و ξ_a از مقادیر تجربی و پیشنهادی مراجع استفاده می‌شود.

بدیهی است که پس از محاسبه x_1 و x_2 و x_s باید در خصوص کوچک بودن آنها و عدم وجود نقص در فرضهای رفتار خطی آب و سازه بررسیهایی صورت گیرد.

۴- تحلیل عددی

برای بررسی عملکرد مدل پیشنهادی برنامه‌ای نوشته شده تا به روش آنالیز مودال، به آنالیز مدل و ارائه تاریخچه زمانی برش پایه مخزن انجام شود. سپس به عنوان نمونه‌ای عملی، مخزنی هوایی با ارتفاع پایه ۲۵m و شعاع ۳/۵ متر و ارتفاع مخزن ۷m در نظر گرفته شد پایه مخزن شامل ۴ ستون بتن مسلح با مقطع مربع به اضلاع ۱/۱m متر است. برای محاسبه سختی فنر معادل پایه (k_s)، مقدار بار مورد نیاز برای تغییر مکان واحد انتهای ستون‌ها بدون چرخش در ستون‌ها محاسبه می‌شود.

جدول ۱ شتابنگاشت‌های به کار رفته در تحلیل مخزن هوایی

نام زلزله	سال وقوع	W پریرود غالب زلزله
ABBAR	1990	0.3 ~ 0.7
NAGHAN	1977	0.5
ELCENTRO	1940	0.2 ~ 0.5
IMPERIAL VALLEY CA BONDS CORNER	1971	0.5 ~ 0.85
MEXICOCITY SEC.COM TRANSPORTER	1985	1.8 ~ 2.2
MEXICOCITY C.DE.ABASTOS	1985	3.2 ~ 3.8

جدول ۲ مقادیر دوره‌های تناوب طبیعی تلاطمی موده‌های اول و دوم و مود اول سازه به ازای نسبت‌های مختلف عمق آب مخزن و سختی‌های مختلف سازه پایه مخزن هوایی آب

H / R	0.5				0.75				
	سختی	T1	T2	T3	T3/T2	T1	T2	T3	T3/T2
10%		3.32	2.026	1.584	0.782	3.14	2.032	1.579	0.777
30%		3.202	1.603	1.204	0.75	2.933	1.596	1.243	0.779
50%		3.184	1.599	0.94	0.591	2.907	1.592	0.974	0.612
100%		3.172	1.597	0.668	0.415	2.891	1.59	0.693	0.436
130%		3.169	1.597	0.586	0.346	2.89	1.59	0.609	0.383

H / R	1				1.25				
	سختی	T1	T2	T3	T3/T2	T1	T2	T3	T3/T2
10%			2.069	1.58	0.782	3.11	2.12	1.581	0.777
30%			1.597	1.295	0.811	2.798	1.598	1.349	0.844
50%			1.592	1.016	0.591	2.765	1.592	1.061	0.612
100%			1.59	0.724	0.415	2.744	1.59	0.757	0.436
130%		2.78	1.59	0.636	0.346	2.739	1.59	0.665	0.418

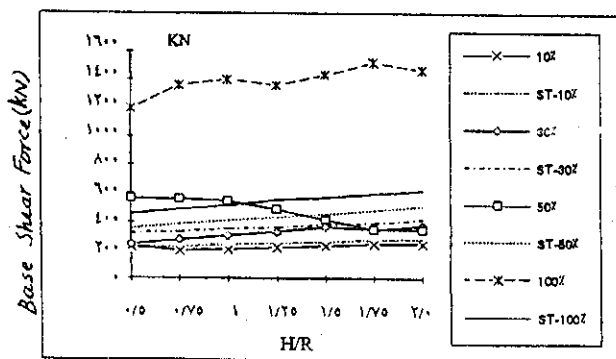
H / R	1.5				1.75				2				
	سختی	T1	T2	T3	T3/T2	T1	T2	T3	T3/T2	T1	T2	T3	T3/T2
10%		3.143	2.127	1.582	0.728	3.183	2.225	1.583	0.711	3.228	2.273	1.584	0.697
30%		2.786	1.601	1.401	0.875	2.782	1.605	1.453	0.905	2.783	1.612	1.498	0.93
50%		2.75	1.592	1.104	0.693	2.745	1.592	1.148	0.721	2.743	1.593	1.19	0.748
100%		2.729	1.59	0.787	0.495	2.722	1.59	0.819	0.515	2.72	1.59	0.85	0.535
130%		2.724	1.59	0.692	0.435	2.718	1.59	0.72	0.45	2.715	1.59	0.747	0.47

آب مخزن و T_3 دوره تناوب مود اول ارتعاش سازه تنها است. با توجه به مطالعات مرجع [۵] اثر امواج غیرخطی در برش پایه برای نسبت‌های $H/R > 0.5$ تحت زمین‌لرزه‌های طرح آیین‌نامه‌ای، قابل صرف‌نظر است. با محاسبه حداکثر برش پایه حاصل در هر یک از حالت‌های بالا، نمودارهایی به صورت شکل‌های (۳) تا (۵) برای مقایسه با یکدیگر و نیز با برش پایه پیشنهادی آیین

هدف از انتخاب این مقدار دامنه، هماهنگی آن با روابط آیین‌نامه بوده است. با کمک برنامه یاد شده و به روش تاریخچه زمانی، پاسخ برش پایه مخزن در هفت تراز مختلف آب مخزن (نسبت H/R از ۰/۵ تا ۲) و نیز برای پنج مقدار سختی پایه (۱۳۰٪، ۱۰۰٪، ۵۰٪، ۳۰٪، ۱۰٪ سختی اصلی پایه) به دست آمده است (جدول ۲). در این جدول T_1 و T_2 دوره تناوب مود تلاطمی اول و دوم

مطابق شکل ۴ ملاحظه می‌شود که صرف نظر از تراز آب برای زلزله آب‌بر، اثر مود دوم تلاطمی - فقط هنگامی که سختی پایه بسیار کاهش می‌یابد - قابل ملاحظه می‌شود. و عملاً در سختی‌های متداول سازه‌ای، مدل پیشنهادی با مدل 2DOF تفاوتی ندارد.

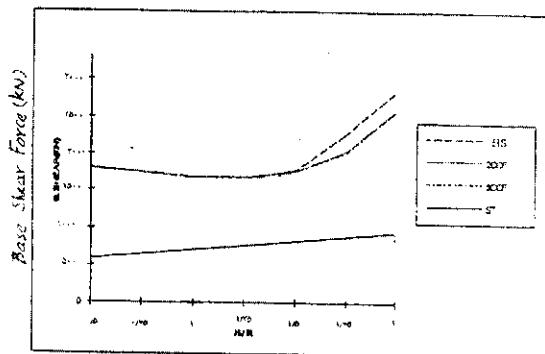
شکل ۵ نشان می‌دهد که هر چند مدل پیشنهادی در حالت سختی ۱۰۰٪ پایه، مقدار نیروی برشی حداکثر پایه را در حدود مقدار آیین نامه‌ای (با احتساب ضریب رفتار ۲/۵ که باید بر آن تقسیم شود) نتیجه می‌دهد، لیکن با نرم‌تر شدن پایه، برش آیین‌نامه‌ای به مراتب بیش از مدل پیشنهادی به دست می‌آید (در حدود ۲/۵ برابر). این نتیجه تقریباً برای تمامی ترازهای آب یکسان است.



شکل ۵ مقایسه برش پایه متجه (3DOF) پیشنهادی و نتایج آیین‌نامه براساس شتابنگاشت آب‌بر

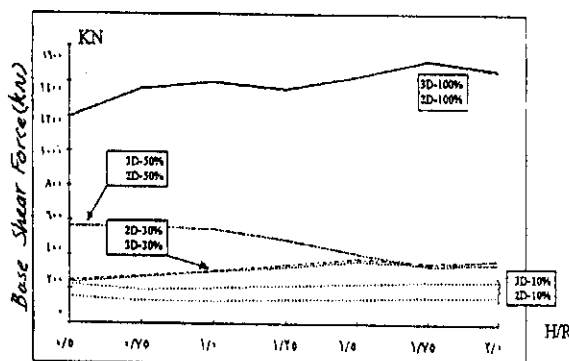
در زلزله مکزیکوسیتی - که دوره‌های تناوب غالب بسیار طولانی دارد - شکل ۶ نشان می‌دهد که در حالت سختی متعارف پایه (۱۰۰٪) فقط در مخازن لاغر (H/R های بزرگ) برش پایه آیین‌نامه‌ای و روش پیشنهادی توافق دارند. زیرا نسبت این دو در حدود ۳ است که با اثر ضریب رفتار ۲/۵ جبران می‌شود. در حالی که در مخازن چاق (برای مثال ۰/۷۵ H/R) نتیجه محاسبات آیین‌نامه بسیار دست پایین خواهد بود. جالب اینکه در این حالت، برش پایه در مخزن نیمه پر،

نامه ۲۸۰۰ (ST) - که فقط تابع جرم کل آب و مخزن است - به دست آمده است. البته ذکر این نکته ضروری است که در مقادیر آیین‌نامه‌ای اثر ضریب رفتار برابر ۲/۵ منظور شده است.



شکل ۳ مقایسه نتایج مدل پیشنهادی (3DOF) با مدل (2DOF) و مدل هاوستر (HS) (همگی بدون اعمال ضریب رفتار R) و مدل آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ST) برحسب بیشینه برش پایه ارتجاعی برای سازه متعارف با سختی ۱۰۰٪ تحت شتابنگاشت ال‌سترو

همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، برای زمین لرزه ال‌سترو توافق خوبی بین مدل هاوستر (HS) و مدل‌های پیشنهادی به دست آمده که در مخازن لاغر ($H/R > 1.5$) این توافق نقض شده است. در مجموع اثر مود دوم تلاطم در مورد زلزله ال‌سترو برای تمامی H/R ها ناچیز بوده است. آیین‌نامه ۲۸۰۰ نیز در این توافق به نحو قابل قبولی مشارکت دارد.



شکل ۴ مقایسه برش پایه متجه در دو مدل (3DOF) و (2DOF) در زلزله آب‌بر

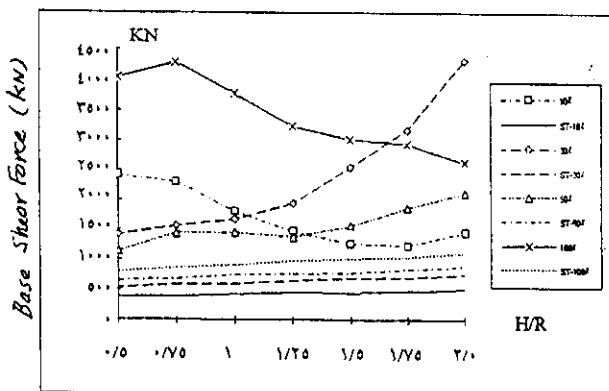
۳- در مدل‌های بررسی شده تحت ۶ شتابنگاشت مختلف، تفاوت قابل توجهی بین فشار محاسبه شده برای مدل با ۲ و ۳ درجه آزادی در حالت طرح سازه‌ای متعارف اولیه دیده نشد. این بدان معناست که در نظر گرفتن مود دوم تلاطم در حالت سختی متعارف پایه، تأثیر چندانی بر مقدار برش پایه ایجاد شده نداشته است. لیکن با کاهش مقدار سختی پایه، اثر اندرکنشی مود دوم تلاطم آب چشمگیرتر می‌شود.

۴- از مقایسه جدول دوره‌های تناوب (جدول ۲) و نتایج نشان داده شده در نمودارها چنین بر می‌آید که در حالی که سختی پایه را به حدود ۱۰ درصد مقدار اولیه کاهش داده‌ایم، تأثیر مود دوم تلاطم، موجب تفاوت تا حدود ۲۵ درصد در برش پایه می‌شود. در زمانی که نسبت دوره تناوب سازه‌ای به دوره تناوب مود دوم تلاطمی (T_3/T_2) در مدل با ۳ درجه آزادی، به بالاتر از ۷۰٪ برسد، تأثیر مود دوم تلاطم بر پاسخ دینامیکی سیستم قابل توجه می‌شود.

۵- هر چند برای برخی از زلزله‌ها مانند آب‌بر و الاسترو، طراحی برجهای آب متعارف به روش آیین نامه مشکل عمده‌ای ندارد، لیکن حتی برای همین سازه‌ها، روش آیین نامه تحت بارگذاری زلزله‌های با دوره تناوب بالاتر - مانند IMPERIAL VALLEY و MEXICO CITY - ABASTOS که متناسب با خاکهای بسیار نرم می‌باشند - به نظر می‌رسد که روش آیین نامه اطمینان بخش و ایمن نیست.

۶- می‌توان مطالعات بیشتری را برای لزوم اصلاح آیین نامه توصیه کرد، لیکن به نظر می‌رسد که روابط مندرج در آیین نامه زلزله برای محاسبه مخازن آب، می‌تواند پایین‌تر از حد اطمینان باشد که این ضرورت توجه به مود اول تلاطمی و در مواردی که پایه مخزن دارای نرمی بیش از حد متعارف باشد، توجه به مودهای بالاتر

بیش از حالت مخزن پر است. این مسأله برای پایه‌های نرم، تفاوت‌های متنوعی را ایجاد می‌کند که بیانگر اثر شدید محتوای فرکانسی زلزله است.



شکل ۶ مقایسه برش پایه متوجه در مدل پیشنهادی (3DOF) و نتایج آیین‌نامه براساس شتابنگاشت - MEXICOCITY C.DE.ABASTOS

در تمامی موارد بالا در محاسبه نیروی برش پایه براساس روابط آیین‌نامه‌ای با هدف مقایسه پاسخ مدل تحت هر شتابنگاشت، از نوع خاک متناسب با دوره تناوب غالب آن شتابنگاشت استفاده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

براساس این مشاهدات، عملکرد مناسب مدل پیشنهادی تأیید شده است. در عین حال، همین مطالعه پارامتری بیانگر نکات مهم زیر است:

- ۱- برخلاف روال آیین‌نامه‌ای به علت اثر چشمگیر دینامیکی مودهای تلاطمی مخازن نیمه‌پر، نمی‌توان انتظار داشت که مخزن پر همواره دارای حداکثر پاسخ زلزله باشد.
- ۲- روابط آیین‌نامه در بسیاری از موارد نتایج پایین‌تری را نسبت به مدل‌هایی که مودهای تلاطمی آب را در نظر گرفته‌اند، به دست داده است. این موضوع در مورد زلزله‌های با دوره‌های بلند تناوب چشمگیر است.

مدلی برای مخازن هوایی آب با در نظر گرفتن اندرکنش دینامیکی سازه و آب در هنگام زلزله

—	سختی جانبی پایه مخزن هوایی	k_g	تلاطمی را می‌طلبید.
۱۱	کل جرم آب مخزن	\bar{M}	۷- در شرایطی که ارتفاعی روش آیین نامه ۲۸۰۰ مورد نظر
۱۴	جرم تلاطمی نظیر مود m_n تلاطم آب	m_n	باشد با توجه به مطالعه پارامتری مفصل انجام شده [۸]
—	جرم سخت معادل مجموع جرم سخت آب و سازه	m_s	پیشنهاد زیر به عنوان نامزد اصلاح مدل دینامیکی ساده
—	جرم متمرکز سازه	m_{ss}	شده مخازن هوایی آب در آیین نامه زلزله ایران ارائه
۱۱	جرم سخت آب	m_{sw}	می‌شود:
۱۰	لنگر واژگونی متغیر با زمان	$M(t)$	الف- نسبت دوره‌های تناوب مود اول برشی سازه پایه
۷	فشار دینامیکی ایجاد شده در سیال در زمان تحریک	P_d	مخزن هوایی T_3 به مود دوم تلاطم سطحی آب مخزن T_2
۹	برش پایه ایجاد شده در مخزن در زمان تحریک	$Q(t)$	محاسبه شود.
۵	شعاع مخزن استوانه‌ای	R	ب- چنانچه این نسبت کمتر از 0.7 باشد بسته به مقدار
۲	مولفه‌های مختصات استوانه‌ای	r, z, θ	H/R (اگر کمتر از $1/5$ باشد) یکی از دو روش هاسترو
۴	زمان	t	روش با 2 درجه آزادی پیشنهاد مناسب است. در صورت
—	دوره تناوب مود اول و دوم تلاطمی آب	T_1, T_2	بزرگتر بودن H/R از $1/5$ ، روش 2 درجه آزادی پیشنهادی
—	دوره تناوب مود اول برشی سازه پایه مخزن	T_3	باید استفاده شود.
—	شتاب افقی زمین در امتداد $\theta=0$	$\ddot{x}_g(t)$	ج- در صورتی که نسبت T_3/T_2 بیش از 0.7 باشد لازم
—	درجات آزادی مدل پیشنهادی	x_i, x_s	است مدل با 3 درجه آزادی (شامل اثر مود دوم تلاطم) به
۶	فرکانس تلاطم مود m سیال	β_n	کار رود.
۱	تابع بتانسیل سرعت نسبی سیال	ϕ	
—	ارتفاع موج نسبت به سطح آب ساکن	η	
۷	چگالی سیال	ρ	
۵	ریشه m مشتق تابع بسل	λ_n	
—	درصد استهلاك مود نوسانی m مدل پیشنهادی	ζ_i	
—	درصد استهلاك پایه مخزن	ζ_s	

۶- قدردانی

از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به‌خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات زلزله‌سپاسگزاری می‌شود.

۷- فهرست علائم

علامت	شرح	شماره معادله
$a(t)$	شتاب افقی تکیه‌گاه	۴
$F_n(t)$	تابع مفروض متغیر با زمان	۵
g	شتاب جاذبه زمین	۶
H	ارتفاع آب در مخزن	۵
h_n	ارتفاع نظیر جرم تلاطمی m_n نسبت به کف مخزن	۱۵
h_{sw}	ارتفاع نظیر جرم سخت آب نسبت به کف مخزن	۱۲
k_n	سختی نظیر فنر فرضی متصل به جرم m_n در مدل	۱۶

۸- منابع

- [5] Haroun, M.A. et al.; "Large Amplitude Liquid Sloshing in Seismically Excited Tanks;" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; Vol. 25, pp 653-669; 1996.
- [۶] آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد شماره ۲۸۰۰); مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن; بهمن ۱۳۶۶.
- [۷] ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخازن آب زمینی; نشریه شماره ۱۲۳ دفتر امور فنی و تدوین معیارها; سازمان برنامه و بودجه; ۱۳۷۱.
- [۸] کلانتری، افشین؛ مدلسازی دینامیکی مخازن هوایی آب با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و آب در هنگام زلزله؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس؛ بهمن ۱۳۷۷.
- [1] Housner, G.W.; "Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers;" *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp 15-35, 1959.
- [2] Housner, G.W.; "The Dynamic Behavior of Water Tanks;" *Bulletin of the Seismological Society of America*; Vol. 53, No. 2, pp 381-387, 1963.
- [3] Fischer, D.; "Dynamic Fluid Effects in Liquid Flexible Cylindrical Tanks;" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; Vol. 7, pp 587-601; 1987.
- [4] Haroun M.A.; "Seismically Induced Fluid Forces on Elevated Tanks;" *Journal of Technical Topics in Civil Engineering*; Vol. 111, No. 1, pp 1-15; 1985.