

رفتار مخازن هوایی بتنی آب با در نظر گرفتن اندرکنش دینامیکی سازه و آب در هنگام زلزله

محمد هوشمندزاده

دانشجوی مهندسی عمران-دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

تلفن : ۰۶۱۱-۳۷۷۴۵۳۸ , پست الکترونیک : hooshmandzadeh2004@yahoo.com

چکیده

مخازن هوایی آب از جمله اجزا اصلی تامین کننده فشار در شبکه های آبرسانی هستند که با توجه به توسعه فزاینده شهرها روز به روز بر حجم و ارتفاع این سازه ها افزوده می شود. با توجه به اینکه در این سازه ها قسمت اعظم جرم در فاصله قابل ملاحظه از فونداسیون قرار می گیرد آنالیز این سازه ها تحت اثر نیروهای جانبی وارده می تواند مهم و قابل توجه به ویژه، به جهت تامین امنیت و حفظ کارایی این سازه ها باشد. از آنجایی که زمان تناوب این سازه ها عموماً بالا است، انتخاب روش تحلیلی مناسب که بتواند برداشت صحیحی از عملکرد سیستم در هنگام وارد آمدن بارهای جانبی را بدهد و نیز بررسی اثر نیروهای حاصل از فشارهای هیدرودینامیک پدید آمده در مخزن می تواند حائز اهمیت باشد.

مدلی تحلیلی برای مخزن استوانه ای حاوی مایعات ارائه شده است. در این مدل سیستمی مرکب از گروه جرم و فنر جانشین سیستم مایع شده، به گونه ای که تحت شتاب افقی زمین، معادل مدل واقعی ایجاد برش پایه و لنگر واژگونی کند. در این مدل اثر هر تعداد از مودهای ارتعاشی آب را می توان در نظر گرفت. مایع داخل مخزن تراکم ناپذیر، غیر لزج و با تغییر مکان های کوچک فرض شده است. بک منظور کردن اندرکنش آب و دیواره مخزن و سازه پایه، مدل دینامیکی مخازن هوایی نیز معرفی شده است.

۱- مقدمه:

مخازن سازه هایی هستند که برای ذخیره کردن و نگهداری مایعات بکار می روند و به اشکال مختلف از جمله کروی، استوانه ای (که در واحدهای صنعتی مهمی مانند پالایشگاه ها و طرحهای شیمیایی برای ذخیره مواد شیمیایی سمی و یا قابل اشتعال مورد استفاده هستند) و مکعب مستطیل شکل ساخته می شوند. مخازن هوایی از جمله اجزا اصلی تامین فشار در شبکه های آبرسانی شهرها به شمار می روند که با توجه به توسعه افزایش دهنده شهرها بر حجم و ارتفاع این سازه ها نیز روز به روز افزوده می شود. بطور کلی از لحاظ نحوه اتکا مخازن به دو نوع پایه دار هوایی و زمینی تقسیم می شود. مخازن هوایی خود به دو شکل پایه دار با قاب های

مهار بندی شده و یا با شافت واحد مرکزی مورد استفاده قرار می گیرند. مخازن زمینی هم بصورت مدفون و یا نیمه مدفون ساخته و مورد بهره برداری قرار می گیرند. مخازن هوایی آب از جمله اجزا اصلی تامین فشار در شبکه های آبرسانی شهرها به شمار می روند که وظیفه تعدیل نوسانهای ساعتی مصرف آب را نیز بر عهده دارند. در صورتی که زمین مرتفع در منطقه مورد نظر وجود داشته باشد مخزن بطور مستقیم بر روی زمین ساخته می شود و در صورت نبودن زمین طبیعی مرتفع و یا رقوم مورد نیاز از مخازن هوایی استفاده می گردد. در شرایط معمول حجم این مخازن محدود بوده و حداکثر تا ظرفیت ۱۰۰۰ متر مکعب ساخته می شوند. امروزه با توجه به توسعه افزایش دهنده شهرها بر حجم و ارتفاع این سازه ها افزوده می شود. با توجه به اینکه در این سازه ها قسمت اعظم جرم در فاصله قابل ملاحظه از فونداسیون قرار می گیرد آنالیز این سازه ها تحت اثر نیروهای جانبی وارده می تواند به جهت اهمیت این سازه ها در شبکه های خدمات شهری و صنعتی و عملکرد ایمن آنها در برابر نیروی زلزله برای پاسخ گویی به نیاز آبی شهروندان، اجتناب از آتش سوزی و خسارتهای زیست محیطی احتمالی و تامین امنیت و حفظ کارایی این سازه ها مهم و قابل توجه باشد.

۲- مولفه های نیروی زلزله وارد بر مخازن بتنی هوایی آب

بطور کلی هر سازه ای که به زمین اتکا داشته باشد حین زلزله تحت اثر شش مولفه حرکت زمین قرار می گیرد، که شامل دو مولفه جانبی، یک مولفه قائم و سه مولفه پیچشی حول محورهای مختصات سازه می باشد. مولفه افقی شتاب زمین باعث اعمال فشارهای هیدرودینامیکی به دیواره مخزن می شود. این فشار شامل فشارهای ضربه ای و فشارهای نوسانی می باشد. فشارهای ضربه ای در اثر ارتعاش دیوار مخزن رخ می دهد و پریودی برابر با پریود ارتعاش مخزن دارد. در صورتی که فشارهای نوسانی از انتقال ارتعاشات ضربه ای به سیال ایجاد گشته و بصورت امواج سطحی در سیال ظاهر می شوند. فشار هیدرودینامیکی ایجاد شده در اثر تحریکات زلزله سبب ایجاد نیروهای برشی و لنگر خمشی و در نتیجه تنشهای حلقوی فشاری و کششی و تنشهای برشی قابل توجهی در پوسته مخزن می شود که در صورت نداشتن برآورد مناسبی از آنها در طراحی مخازن می تواند حوادث غیر قابل جبرانی به دنبال داشته باشد.

اطمینان یافتن از عملکرد درست این سازه ها در زمان زلزله به لحاظ پیچیدگی رفتاری آنها به مطالعات بیشتری نیاز دارد. این پیچیدگی از یک سو واز سوی دیگر لزوم درک اندرکنش مخزن و آب در زمان بارگذاری و طراحی سازه تحت تحریک دینامیکی در سازه نیاز به ارائه روشهای ساده را در آیین نامه ها دو چندان می کند.

۳-پیشینه مطالعات:

در زمینه بدست آوردن مدل‌های دینامیکی ساده برای مخازن هوایی آب، اولین بار در سال ۱۹۵۹ هاسنر به حل تحلیلی معادله فشار هیدرو دینامیکی آب روی دیواره اقدام نمود. وی سپس مدلی از جرم‌های متمرکز و فنر را جایگزین فشار حاصل از تلاطم آب نمود. این مدلها بر اساس طبیعت دیواره مخزن بدست آمده بود. او با فرض رفتار صلب مخزن توانست مقادیر تقریبی فرکانس تلاطم سیال و فشار هیدرو دینامیکی نوسانی را برای مخازن مستطیلی و استوانه ای ارائه داد. آبرامسون نیز با استفاده از حل دقیق تابع پتانسیل سیال تراکم ناپذیر روشی را برای محاسبه فشار نوسانی در مخزن پیشنهاد کرد. کالینز با استفاده از روش پیشنهادی آبرامسون برای محاسبه جرم ضربه ای سیال و اضافه نمودن آن بصورت جرمی با توزیع یکنواخت در ارتفاع به جرم پوسته مخزن به محاسبه فرکانس های طبیعی پوسته مخزن با مشخصات جرمی جدید پرداخت. فیشر در سال ۱۹۷۹ با فرض انعطاف پذیری مخزن استوانه ای ولی بدون در نظر گرفتن تلاطم سطحی معادله فشار هیدرو دینامیک را حل کرد. با وجود این در سال ۱۹۸۱ هارون با انجام آزمایشهایی نشان داد که انعطاف پذیری دیواره مخزن اثر عمده ای بر پاسخ تلاطم سطح آب ندارد. این به علت درگیری ناچیز مودهای ارتعاشی تلاطمی با مودهای 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. او 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 تمامی 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 می شود لیکن توان تولید

برش پایه و گشتاور واژگونی را ندارد. در کارهای بعدی که در اواخر دهه ۱۹۸۰ و در دهه ۱۹۹۰ منتشر شده است محققان بیشتر به پدیده های غیر خطی مانند تلاطم بزرگ، جدایی از پی و یا هندسه های متفاوت شکل مخزن پرداخته اند. جین و مدهکار (jain & medhekar) ضمن مهم توصیف نمودن اثر فشارهای نوسانی، توزیع معادل ساده شده ای را برای فشارهای هیدرو دینامیک پیشنهاد نمودند. ایشان همچنین متذکر گشتند که فقدان برآورد مناسبی از سختی جانبی سیستم (به خصوص در مخازن هوایی پایه دار با مهاربندی جانبی) میتواند تاثیرات قابل ملاحظه ای را بر تخمین پریرود مخزن داشته باشد.

۴- بررسی آیین نامه های مختلف

مدلهای ساده شده مخازن آب در آیین نامه های AWWA, API و UBC با استفاده از مدل های تک جرمی، مدل دوجرمی هاوسنر و یا مدل های برگرفته از مورد بررسی قرار گرفته اند. آیین نامه AWWA برای محاسبه برش پایه در مخازن هوایی مدلی ساده و تک جرمی و برای محاسبه لنگر پای مخزن مدل دوجرمی برگرفته از روش هاوسنر را توصیه کرده است. آیین نامه API نیز با اندکی تغییر الگویی مانند روش کاری آیین نامه AWWA را مقرر نموده است. در آیین نامه UBC نیز محاسبه برش پایه برای مخازن در بخش سازه های غیر ساختمانی و با اعمال ضریبی به جرم کل مخزن و آب داخل آن صورت گرفته است.

نسخه اول آیین نامه ۱۲۸۰۰ ایران مدل تک جرمی بسیار ساده ای را برای مخازن هوایی و بر مبنای صرف نظر از اثر تلاطم سطحی پیشنهاد کرده است. نسخه دوم این آیین نامه با برداشتن یک گام به جلو از مدل دوجرمی هاوسنر و مطابق با نشریه ۱۲۳ سازمان برنامه و بودجه استفاده کرده است.

با توجه به مطالب یاد شده می توان ارکان اساسی در بررسی نحوه رفتار و عملکرد مخازن هوایی در حین وقوع زلزله را در ۳ فاکتور محتوای فرکانسی زمینلرزه، خصوصیات دینامیکی سازه و اثر اندرکنش آب و مخزن خلاصه نمود.

بعد از آسیبهای عمده به چند مخزن آب در زمینلرزه خرداد ۱۳۶۹ شهرهای منجیل و رودبار در بازبینی های آینده آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله نیاز به تدقیق مقررات طراحی مخازن هوایی آب بسیار ضروری به نظر میرسد.

۵- مبانی هیدرودینامیکی مدل مخزن

مبحث هیدرودینامیک یکی از قسمتهای جالب و مهم مهندسی زلزله می باشد که شامل فشارهای دینامیکی وارده به سدها، مخازن و ارتعاش در سازه های مستغرق می گردد. با وجود اشتراکی که این سازه ها در کلیات مسائل هیدرودینامیکی خود با یکدیگر دارند لیکن هر یک شرایط و محدودیتهای خاص خود را داشته و می بایست بطور جداگانه مورد بررسی قرار گیرند. لذا ما در اینجا در پی بررسی فشارهای هیدرودینامیکی وارد به مخازن هستیم. فرضهای 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 استوانه ای به شعاع R بوده که دارای دیواره صلب و پایه ای انعطاف پذیر است. تحریک پایه فقط در امتداد افقی صورت می گیرد.

رفتار مصالح، خطی فرض و از اندر کنش خاک پایه مخزن صرف نظر شده است. پایه مخزن گیردار است. از آثار $P-\Delta$ و درجه آزادی دورانی حول محور تقارن کف مخزن 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:

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

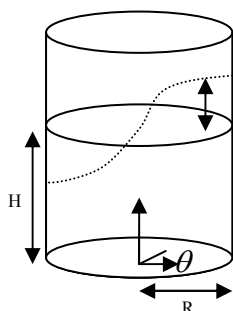
در این حال شرایط مرزی عبارت است از:

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

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

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

در این روابط (r, z, θ) مولفه های مختصات استوانه ای، $a(t)$ شتاب افقی تکیه گاه (در امتداد $\theta=0$) سیال و η و θ زمان است. (شکل ۱)



در صورتی که ریشه n ام مشتق تابع بسط باشد، بادر نظر گرفتن تابع متغیر با زمان پاسخ معادله بالا با استفاده از جداسازی پارامترها با شرایط مرزی فوق بصورت زیر حاصل می شود:

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

از حل این معادله به کمک معادله ۴، فرکانس تلاطم مود nام را به شکل زیر می توان بدست

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

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

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

و بدین ترتیب پاسخ دینامیکی فشار کل را بصورت زیر می توان نوشت: (۸)

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

۶ - مدل دینامیکی ساده شده سیال:

از آنجا که مدل ریاضی بالا باید به مدل دینامیکی ساده ای تبدیل شود، محاسبه جرمها و سختی هادر هر مود انجام می گیرد. با توجه به لزوم یکسان بودن برش پایه و لنگر واژگونی در حل تحلیلی بدست آمده و در مدل پیشنهادی پارامترهای جرم و فنر مدل ساده شده و موقعیت آنها بدست می آید. برش پایه بدست آمده برای هریک از موده های ارتعاشی مخزن این مدل، از انتگرال دیو هامل قابل محاسبه است.

با این توضیح برش پایه Q و لنگر واژگونی M مخزن بصورت زیر محاسبه شده است:

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

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

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 جز 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 جز مستقل از β_n در رابطه لنگر واژگونی نیز به محاسبه h_{sw} ارتفاع نظیر جرم سخت سیال منتهی میشود:

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

در نهایت پردازش جزء های وابسته به β_n (فرکانس مودهای تلاطمی) از $Q(t)$ و $M(t)$ به تعیین

$$\beta_n^2 = \frac{\lambda_n g}{R} \tanh \left(\lambda_n \frac{H}{R} \right) \quad (13) \quad m_n \text{ جرم تلاطمی مود } n \text{ ام و } h_n \text{ ارتفاع نظیر آن منتهی میشود:}$$

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

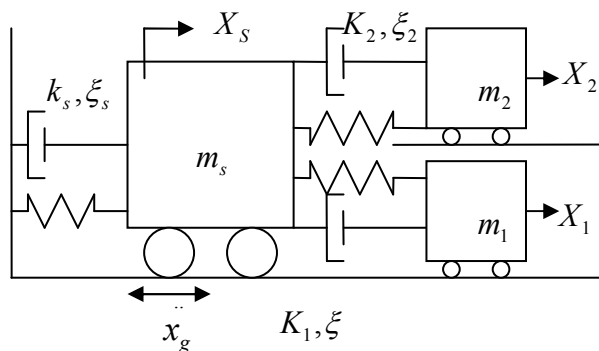
$$h_n = H \left[1 - \frac{1}{C_n \tanh(C_n)} + \frac{2}{C_n \sinh(C_n)} \right] \quad (15)$$

از تساوی برش پایه حاصل از حل تحلیلی مساله از یک سو و برش پایه بدست آمده از نوشتن انتگرال دیوهامل، مقدار سختی فنر مود n ام بدست 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 نمود. همچنین در محاسبه لنگر واژگونی و برش پایه باید جرم صلب آب در این مخازن، جرم دیواره و دال کف مخزن نیز منظور گردد. برای مدل سازی پایه انعطاف پذیر مخزن هوایی از یک فنر با سختی K_S

، جرم سازه ای m_{ss} (متمرکز) و میرایی ξ_s کمک می گیریم. در اصل برای سازه پایه فقط مود اول حرکت برشی منظور شده است. بدین ترتیب برای سیستم آب و سازه که بصورت نوسانگر سه درجه آزادی برشی عمل میکند-معادله



دینامیکی معادل شکل (۲) پیشنهاد میشود. در اینجا \ddot{x}_g شتاب افقی زمین (در جهت $\theta=0$) ، m_i, k_i, ξ_i در صد استهلاک ، سختی و جرم موده‌های تلامبی آب به ازای $i=1,2$ بوده ، $m_s = m_{ss} + m_{sw}$ جرم سخت کل معادل آب و سازه و ξ_s, k_s سختی برشی و در صد استهلاک پایه است. برای تعیین در صد استهلاک ξ_i, ξ_s از مقادیر تجربی و پیشنهادی مراجع استفاده می شود. بدیهی است که پس از محاسبه x_1, x_2, x_s باید در خصوص کوچک بودن آنها و عدم وجود نقص در فرضهای رفتار خطی آب و سازه بررسی هایی صورت گیرد.

۷- نتیجه گیری

- ۱- برخلاف آیین نامه ای به علت اثر چشمگیر دینامیکی موده‌های تلامبی مخازن نیمه پر نمی توان انتظار داشت که مخزن پر همواره دارای حداکثر پاسخ زلزله باشد.
- ۲- روابط آیین نامه ای در بسیاری از موارد نتایج پایین تری را نسبت به مدلهایی که موده‌های تلامبی آب را در نظر گرفتند، بدست داده است. این موضوع در مورد زلزله های با دوره های بلند تناوب چشمگیر است.
- ۳- میتوان مطالعات بیشتری را برای لزوم اصلاح آیین نامه توصیه کرد. لیکن به نظر می رسد که روابط مندرج در آیین نامه زلزله برای محاسبه مخازن آب ، می تواند پایین تر از حد اطمینان باشد که این ضرورت توجه به مود اول تلامبی و در مواردی که پایه مخزن دارای نرمی بیش از حد متعارف باشد ، توجه به موده‌های بالاتر تلامبی را می طلبد.

۸- مراجع

- ۱- آیین نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن
- ۲- ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخازن آب زمینی، نشریه شماره ۱۲۳ دفتر امور فنی و تدوین معیارها سازمان مدیریت و برنامه ریزی

3-Housner, Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of the Seismological Society of America, pp15-35, 1959
 4- Housner, The Dynamic Behavior of Water Tanks, Bulletin of the Seismological Society of America, pp381-387, 1963
 5-Haroun, Seismically Induced Fluid Forces on Elevated Tanks, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, pp 587-601, 1987