

Reviewing Various Methods of Seismic Analysis of Aerial Tanks, Considering Interactive Effect of Fluid, Structure and Soil

Saeid Sadeghi Nia¹

Sayyed Mahdi Zahraei²

Abstract

In the seismic design of tanks, though the added mass model is used to determine basic cutting and collapse moment, the added mass model with the sloshing mass are utilized for more accurate and appropriate modeling, taking advantage of limited component methods. Moreover, in many seismic analysis processes, these kinds of structures, regardless of interaction of soil and structure and including the fixed basis hypothesis, whereas in regard to the height and mass of the structure and, considering this interaction, will have considerable effect on the achieved results, especially when the basis soil is of soft and flexible one. Hence, this essay is primarily intended to review various methods of seismic analysis of aerial tanks.

Key Words: *Aerial Tanks, Liquid-Structure Interaction, Soil- Structure Interaction*

1- M.S. in Structure and Civil Engineering, Islamic Azad University, Bandar Abbas Branch

2- Associate Professor of Civil Engineering, Tehran University

بررسی روش‌های مختلف تحلیل لرزه‌ای مخازن هوایی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سیال - سازه - خاک

سعید صادقی‌نیا^۱، سیدمهدی زهرایی^۲

تاریخ دریافت: ۸۹/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۳/۳۰

چکیده

در طرح لرزه‌ای مخازن، علیرغم آنکه به دلیل سهولت، مدل جرم افزوده شده جهت تعیین برش پایه و لنگر واژگونی مورد استفاده قرار می‌گیرد، لیکن مدل جرم افزوده شده همراه با جرم موج (Sloshing mass)، بهره‌گیری از روش اجزاء محدود جهت مدل نمودن، مناسب‌تر و دقیق‌تر می‌باشد. همچنین در بسیاری از پروسه‌های تحلیل لرزه‌ای این نوع سازه‌ها، با صرف‌نظر از اندرکنش خاک و سازه، فرض اساس ثابت لحاظ می‌شود. در حالی که با توجه به ارتفاع و جرم سازه، در نظر گرفتن این اندرکنش تاثیر قابل توجهی، به‌ویژه در شرایطی که خاک زیراساس از نوع نرم و انعطاف‌پذیر باشد، بر روی نتایج حاصله خواهد داشت. لذا هدف کلی تدوین این مقاله مروری بر روش‌های مختلف تحلیل لرزه‌ای مخازن هوایی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: مخازن هوایی، اندرکنش مایع-سازه، اندرکنش خاک - سازه

۱- دانش آموخته دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس، کارشناسی ارشد عمران - سازه Email: sadeghinia1354@yahoo.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مقدمه

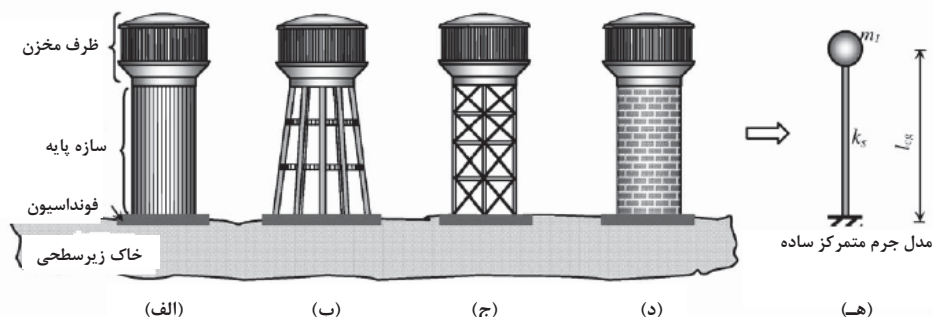
آنگاه حرکت قائم ناشی از تلاطم آب امکان پذیر نمی باشد. در نتیجه، مخزن هوایی شبیه یک سیستم یک درجه آزاد، عمل می نماید. اما هنگامی که سیال درون ظرف نوسان کند، این مدل برای توجیه رفتار حقیقی مردود می باشد. (۲) خصوصیات سازه‌ای پایه‌ها، شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی می باشد که در مدل نمودن مخازن هوایی، فرض پایه با یک صلبیت یکنواخت در طول ارتفاع می باشد.

مخازن هوایی دارای انواع مختلف سازه پایه می باشند که از آن جمله می توان به قاب فولادی، یک پوسته بتن مسلح، قاب بتن مسلح یا پایه با مصالح بنایی اشاره نمود. نمی توان تمام انواع سازه پایه‌ها را نظیر تیر طره‌ای با صلبیت یکنواخت در ارتفاع مدل نمود، بلکه این نوع مدل نمودن برای سازه پایه از نوع پوسته بتن مسلح (شکل ۱- الف)) مناسب تر باشد.

آیین نامه لرزه‌ای هند ۱۸۹۳ IS، آنالیز مخازن هوایی را با یک سیستم یک درجه آزادی که تمام جرم مایع در مود ضربه‌ای ارتعاش سهیم شده و با دیواره ظرف حرکت نماید، پیشنهاد می کند.

ACI 371 R-98: هنگامی که بار آب (وزن آب WW) ۸۰٪ یا بیشتر از بار وزنی کل (WG): شامل: بار مرده بالای پایه، بار آب و حداقل مقدار ۲۵٪ بار زنده کف مخزن) باشد، استفاده از مدل جرم متمرکز را پیشنهاد می نماید. برای این مدل، سختی خمشی جانبی سازه پایه (KS) با فرض عملکرد خیز سازه پایه بتنی نظیر تیر طره با استفاده از رابطه (۱) تعیین می شود:

$$k_s = \frac{3EI_c}{l_{cg}^3}, \quad (1)$$



شکل ۱- مدل جرم متمرکز ساده مخازن هوایی: (الف) مخزن با سازه پایه شفتی بتن مسلح، (ب) مخزن با سازه پایه قاب بتن مسلح، (ج) مخزن با سازه پایه قاب بتن مسلح یا قاب فولادی با مهاربندی مورب، (د) مخزن با سازه پایه از مصالح بنایی، (ه) مدل جرم متمرکز ساده

مخازن آب از جمله اجزاء اصلی شبکه‌های آبرسانی جهت ذخیره، نگهداری و نیز تامین فشار مورد نیاز می باشد. اهمیت این سازه‌ها و عملکرد مناسب آنها به هنگام زلزله و بخصوص بعد از وقوع آن جهت پاسخگویی به نیاز آبی شهروندان، اجتناب از آتش‌سوزی و بروز خسارت‌های احتمالی زیست محیطی محرز می باشد. موارد متعددی از خسارت وارد شده به این نوع سازه‌ها در کشورهای مختلف گزارش شده‌اند، که از آن جمله می توان به زلزله شیلی (Steinbrugge & Rodrigo 1963)، زلزله کالیفرنیا (Niwa & Clough 1982) و زلزله سانچوان (Manos 1991) اشاره نمود. خسارت وارده از متوسط تا شدید بوده و در پاره‌ای موارد این قبیل سازه‌ها کاملاً منهدم و یا واژگون شده‌اند. [۱]

لذا هدف عمده از تدوین این مقاله، بررسی مدل‌های ارزیابی شده توسط محققین مختلف، که آیین‌نامه‌های مقاوم‌سازی براساس آنها پایه‌گذاری شده است، می باشد.

در این قسمت به بررسی انواع مدل‌های موجود پیشنهادی توسط محققین و روابط حاکم بر آنها خواهیم پرداخت:

۱- مدل جرم متمرکز

روش تحلیل مخازن هوایی آب نظیر یک جرم متمرکز ساده در سال ۱۹۵۰ توسط (chandrasekaran and Krishna) پیشنهاد شده است. مدل انتخاب شده جهت نمایش این روش در شکل (۱) ارائه شده است. دو نکته اساسی که می بایست در خصوص این مدل مورد توجه قرار گیرد، آن است که: (۱) در خصوص رفتار سیال، در صورتی که ظرف کاملاً پر از آب باشد،

(m_i) که بصورت صلب به دیواره ظرف اتصال یافته و جرم‌های نوسانی (m_{en}) که به وسیله فنرهایی با سختی (k_{en}) به دیواره‌ها اتصال یافته، مدل می‌شود.

گرچه بر اساس این روش، علیرغم امکان لحاظ نمودن اولین جرم ضربه‌ای (Housner, 1963) [۳] امکان لحاظ کردن موده‌های بالاتر جرم‌های نوسانی برای مخازن استوانه‌ای مهار شده در زمین نیز فراهم می‌باشد.

عموما استفاده از یک مدل جرم ساده جهت طراحی مخازن هوایی، مفید و مناسب می‌باشد. (Haroun & Housner, 1981) [۸] و موده‌های بالاتر تلاطم (Sloshing) حتی در حالتی که فرکانس اصلی سازه به یکی از فرکانس‌های طبیعی تلاطم نزدیک باشد، تاثیر جزئی بر نیروی اعمال شده به ظرف دارند (Haroun & Ellaihy, 1985) [۶].

از مدل سه جرمی پیشرفته برای مخزن مهار شده زمینی با دیواره‌های انعطاف‌پذیر - که انعطاف‌پذیری دیواره نیز در محاسبه مدنظر قرار گرفته - استفاده می‌شود. اما در مورد مخازن هوایی که ظرف مخزن از نوع بتن مسلح می‌باشد، از انعطاف‌پذیری دیواره‌ها صرف‌نظر شده و از مدل سه جرمی مذکور استفاده نمی‌شود.

یک روش آنالیز ساده توسط (Housner 1963) [۳] برای مخازن هوایی با فرض اساس ثابت در شکل (۳) ارائه شده است. در این روش دو جرم (m_1 & m_2) غیر کوپل فرض شده و نیروهای روی پایه با دوسیستم یک درجه آزادی به صورت مجزا برآورد شده‌اند. [۲]

که l_{cg} : فاصله فونداسیون تا گرانیگاه (مرکز هندسی) حجم آب ذخیره شده و E : مدول یانگ مصالح و IC : ممان اینرسی مقطع ناخالص اطراف محور مرکزی با صرف‌نظر از آرماتورها می‌شد. دوره تناوب اصلی ارتعاش (T) در مخازن هوایی براساس رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W_L}{gk_s}} \quad (2)$$

که طبق توصیه ACI 371 R-98، g : شتاب زمین، W_L : وزن جرم متمرکز شامل: (۱) وزن خود ظرف، (۲) دوسوم (۰.۶۶) وزن خود دیواره پایه بتنی و (۳) وزن آب می‌باشد.

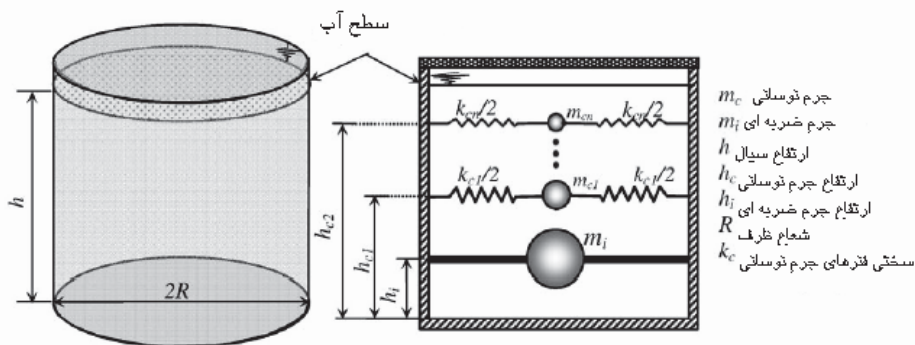
بعد از محاسبه دوره تناوب، انتخاب میزان میرایی، برش پایه و لنگر واژگونی از طریق آنالیزهای طیفی پاسخ استاندارد قابل برآورد می‌باشند.

۲- روش‌های پیشنهادی جهت مدل نمودن سیستم مایع-سازه

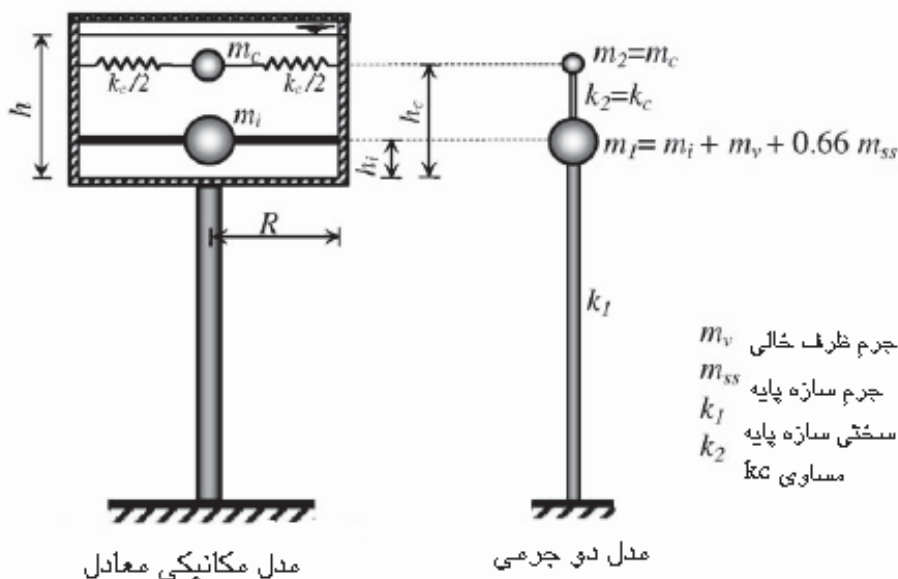
تمام مدل‌های مکانیکی ارائه شده در ذیل براساس روش‌های تحلیلی و تا حدی تقریب‌های المان محدود با لحاظ اثر سیال می‌باشند.

۲-۱- مدل ساده شده

مدلهای جرم - فنر معادل که توسط تعدادی از محققین، جهت بررسی رفتار دینامیکی سیال داخل ظرف پیشنهاد شده در شکل (۲) نمایش داده شده‌اند. سیال توسط یک جرم ضربه‌ای



شکل ۲- فنر - جرم جایگزین برای مخازن استوانه‌ای مهار شده در زمین



شکل ۳- مدل دوجرمی پیشنهادی توسط هاوسنر برای مخازن هوایی

پیشنهاد می‌دهد).
 مدل دو جرمی مذکور ارائه شده توسط هاوسنر، معمولاً جهت طراحی
 لرزه‌ای مخازن هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که مشخصات
 دینامیکی این مدل در جدول (۱) ارائه شده است.

جرم m_2 تنها جهت تلاطم (Sloshing) جرم نوسانی پیشنهاد
 شده و m_1 جرم ضربانی سیال شامل: جرم ظرف و بخشی از جرم
 سازه پایه می‌باشد. (در ACI 371 R [۱۱] دو سوم جرم پایه و
 Pristley et al. 1986 تمام جرم سازه پایه را به‌عنوان این بخش

جدول ۱- پارامترهای پیشنهادی «هاوسنر» و «باور» جهت تشابه‌سازی

شرح	مدل باور (Chen And Barber , 1976)	مدل هاوسنر (Epstein , 1976)
فرکانس سازه ای	$\omega_n^2 = \frac{g}{R} \lambda_n \tanh(\lambda_n \frac{h}{R})$	$\omega^2 = \frac{g}{R} 1.84 \tanh(1.84 \frac{h}{R})$
سختی فنرهای جرم نوسانی	$k_{cn} = m_{cn} \frac{g}{R} \lambda_n \tanh(\lambda_n \frac{h}{R})$	$k_c = m_c \frac{g}{R} 1.84 \tanh \frac{1.84h}{R}$
جرمهای نوسانی	$m_{cn} = m_w \frac{2 \tanh(\lambda_n(h/R))}{\lambda_n(h/R)(\lambda_n^2 - 1)}$	$m_c = m_w \cdot 0.318 \frac{h}{R} \tanh(1.84(h/R))$
جرمهای ضربه ای	$m_i = m_w \left(1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{m_m}{m_w} \right)$	$m_i = m_w \frac{\tanh(1.74R/h)}{(1.74R/h)}$
ارتفاع جرمهای نوسانی	$h_{cn} = h \left[\frac{1}{2} - \frac{4}{\lambda_n(h/R)} \tanh(\lambda_n \frac{h}{2R}) \right]$	$h_c = \left[1 - \frac{\cosh(1.84h/R) - 1}{1.84h/R \sinh(1.84h/R)} \right] h$
ارتفاع جرمهای ضربه ای	$h_i = h \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{(m_i/m_w)} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{m_m}{m_w} \right) \left(\frac{h m_m}{h} \right) \right]$	$h_i = 3/8h$

در این جدول m_w : جرم کل سیال و λ_n : ریشه‌های روش اول تابع بسل از نوع اول می‌باشند.

($\lambda_1 = 1/8112$, $\lambda_2 = 5/3314$, $\lambda_3 = 8/5363$) در صورتی که به مدهای بالاتر جرم نوسانی (m_{cn}) نیاز باشد، فرمول «باور» (جدول ۱) را می‌توان با فرض مرجع بودن مرکز جرم، مورد استفاده قرار داد.

جرمها و ارتفاع‌های معادل نیز در این مدل براساس روش ولتسوس و همکارانش پایه‌گذاری شده است.

(Malhotra et. al , 2000). Eurocode 8 [۱۰] مفاهیم خاصی جهت ساده‌سازی ارائه نموده است. در جدول (۲) متغیرهای ویژه طراحی مخازن استوانه‌ای مهارشده در زمین پیشنهاد شده است.

در این جدول، C_i : ضریب بدون بعد و C_c : ضریب با بعد ($S/m^{0.5}$) بوده و h'_i و h'_c : به ترتیب ارتفاع‌های جرم‌های ضربانی و نوسانی جهت محاسبه لنگر واژگونی می‌باشند. بعد از تعیین جرم‌های m_1 , m_2 به همراه موقعیت آنها، سختی K_2 و K_1 می‌بایست دوره تناوب، برش پایه و لنگر واژگونی جهت طراحی دینامیکی سازه برآورد شود.

۲-۲- فرض جرم افزوده شده

بهره‌گیری از روش‌های مختلف مسائل اندرکنش سیال - سازه با فرض جرم افزوده شده تحقق می‌یابد. (Westergaard , 1931; Barton And Parker, 1987) از جمله این روش‌ها می‌توان به پیشنهاد اولرین (Eulerian) (Zienkiewicz And Bettles, 1987) و توصیه لاگرانژین (Lagrangian) [۱] (Wilson And Khalvati, 1983; Olson) (And Bathe, 1983) که با استفاده از روش اجزا محدود میسر

می‌باشد، اشاره نمود.

هنگامی که بهره‌گیری از سایر روش‌های آنالیز، نیازمند برنامه‌های ویژه شامل المان‌های سیال با فرمول‌بندی پیچیده باشد، ساده‌ترین روش، بهره‌گیری از فرض جرم افزوده شده می‌باشد. در این فرضیه، یک جرم حاصل از روش‌های مختلف محاسباتی به جرم سازه در اندرکنش سیال - سازه اضافه می‌شود و برای یک سیستم تحت اثر تحریک زلزله، به صورت معادله عمومی زیر نوشته می‌شود:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{u}_g, \quad (3)$$

که M : ماتریس جرم، C : ماتریس میرایی، K : ماتریس سختی، \ddot{u}_g : شتاب زمین و u : تغییر مکان نسبی و دارای مشتق تا مرتبه دو نسبت به زمان می‌باشند. حال اگر فرض جرم اضافه شده در این معادله استفاده شود، معادله فوق به صورت زیر در می‌آید:

$$M^*\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M^*\ddot{u}_g, \quad (4)$$

که M^* : ماتریس جرم کل شامل ماتریس جرم سازه (M) و ماتریس جرم افزوده شده (Ma) می‌باشد. در این فرض چنین تصور شده است که جرم افزوده شده Ma هماهنگ با سازه ارتعاش نماید؛ لذا تنها، ماتریس جرم با لحاظ نمودن تاثیر سیال افزایش می‌یابد، در حالی که ماتریس‌های سختی و میرایی تغییری نمی‌کنند. [۲]

جدول ۲- متغیرهای طراحی پیشنهادی برای اولین مدهای ارتعاشی ضربه‌ای و نوسانی به صورت تابعی از نسبت ارتفاع به شعاع (h/R)

(Eurocode - 8, 2003)

h/R	C_i	C_c	m_i/m_w	m_c/m_w	h_i/h	h_c/h	h'_i/h	h'_c/h
0.3	9.28	2.09	0.176	0.824	0.400	0.521	2.640	3.414
0.5	7.74	1.74	0.300	0.700	0.400	0.543	1.460	1.517
0.7	6.97	1.60	0.414	0.586	0.401	0.571	1.009	1.011
1.0	6.36	1.52	0.548	0.452	0.419	0.616	0.721	0.785
1.5	6.06	1.48	0.686	0.314	0.439	0.690	0.555	0.734
2.0	6.21	1.48	0.763	0.237	0.448	0.751	0.500	0.764
2.5	6.56	1.48	0.810	0.190	0.452	0.794	0.480	0.796
3.0	7.03	1.48	0.842	0.158	0.453	0.825	0.472	0.825

دورانی لحاظ شده و از ارتعاشات پیچشی و عمودی صرفنظر شده است.

اندرکنش‌های سیال - سازه توسط روش پیشنهادی سیستم معادل جرم - فنر هاوسنر (Housner, 1963) [۳] و اندرکنش خاک - سازه توسط روش پیشنهادی (2000) FEMA 368/369 [۱۲] مدل شده است.

در شکل (۴) K_y و K_θ سختی‌های پیشنهادی انتقالی و دورانی معادل فونداسیون که با فنر مدل شده و به نقطه مرکزی از فونداسیون دایره‌ای صلب اتصال دارند، می‌باشند. سختی‌های K_y و K_θ برای فونداسیون‌های دایره‌ای صلب مهارشده در سطح نیم فضای همگن توسط FEMA [۱۲] به صورت زیر پیشنهاد شده‌اند:

$$k_y = \left[\frac{8\alpha_y}{2-v} \right] Gr, \quad k_\theta = \left[\frac{8\alpha_\theta}{3(1-v)} \right] Gr^3, \quad (5)$$

که x : شعاع فونداسیون، G : مدول برشی نیم فضا، D : نسبت پواسون برای خاک و α_y و α_θ ضرایب بدون بعد و وابسته به دوره تناوب تحریک (لرزه)، ابعاد فونداسیون و مشخصات پایه می‌باشد.

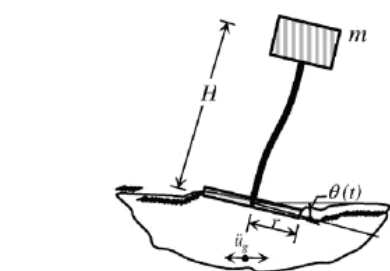
۳- مدل‌های پیشنهادی سیستم خاک - سازه

به‌طور کلی مشخص شده که اندرکنش بین خاک و سازه، به‌خصوص برای سازه‌های استقرار یافته روی خاک‌های نسبتاً انعطاف‌پذیر، متأثر از پاسخ سازه می‌باشد. در آنالیز لرزه‌ای، سازه‌های قرار گرفته در نواحی لرزه خیز فعال، در نظر گرفتن اندرکنش سازه - خاک فوق‌العاده مهم می‌باشد.

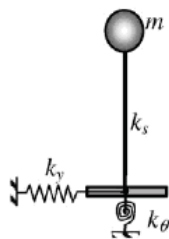
علیرغم آنکه در مخازن هوایی به دلیل قرار گرفتن بخش قابل توجه و عظیمی از جرم متمرکز در تراز بالایی زمین و توسط ناحیه نسبتاً محدودی از فونداسیون مهار می‌شود، مطالعات چندانی در خصوص اندرکنش خاک - سازه صورت نگرفته و اکثر تحقیقات، به برآورد رفتار سیال و سازه پایه به فرض اساس ثابت پرداخته‌اند.

۳-۱- مدل‌های ساده

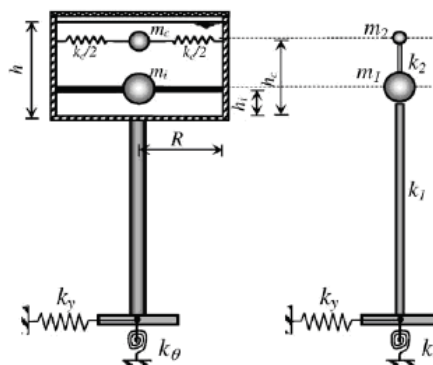
در مدل‌هایی که در این قسمت مورد بحث قرار می‌گیرند (شکل ۴) اثر اندرکنش خاک - سازه روی مخازن واقع بر فونداسیون صلب و خاک همگن پایه‌گذاری شده است. به دلیل آنکه ارتعاشات عمودی و پیچشی نسبت به ارتعاشات جانبی و دورانی از اهمیت کمتری برخوردار می‌باشند، لذا ارتعاشات جانبی و



الف) سازه پایه ساده واقع بر خاک شکل پذیر



ب) مدل ساده فرض شده برای اندرکنش خاک - سازه



ج) مدل جرم - فنر برای بررسی اثر مدل اندرکنش سیال - سازه خاک روی اندرکنش خاک - سازه

شکل ۴- مدل مکانیکی برای اندرکنش سیال - سازه - خاک در مخازن هوایی

که K: سختی معادل و H: ارتفاع مخزن هوایی می‌باشد. نظیر آنچه در شکل (۵) نمایش داده شده، سه پارامتر مهم و مؤثر بر متغیر ξ_0 وجود دارد. اولین آنها: نسبت دوره تناوب (\tilde{T}/T) ، دومین پارامتر، عمق گیرداری فونداسیون به شعاع فونداسیون (\bar{h}/r) و سومین پارامتر، شتاب پاسخ طیفی: (SD) می‌باشند. بعد از تعیین سختی‌ها، پارامترهای مورد نیاز طراحی را می‌توان با بهره گرفتن از روش‌های مدون دینامیک سازه‌ای مشخص نمود.

۳-۲- فرض فونداسیون بدون جرم

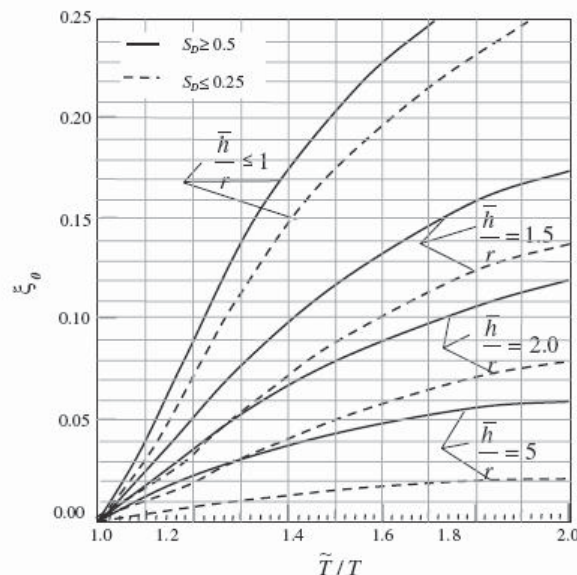
این مدل، مجوز کاربرد نیروهای لرزه‌ای صحیح در سازه‌ها را فراهم می‌نماید؛ با این وجود از نیروهای اینرسی مصالح داخلی فونداسیون صرف‌نظر می‌نماید. مدل مورد بررسی جهت فرض فونداسیون بدون جرم در شکل (۶) نمایش داده شده است. در این مدل، مدل خاک / فونداسیون - سازه به سه جزء از نقاط گره‌ای تقسیم می‌شود. گره‌های متداول در سطح مشترک سازه و فونداسیون با "c" مشخص شده و دیگر گره‌های داخل سازه با "s" معرفی شده‌اند و سایر گره‌های داخلی فونداسیون، "f" هستند. در این شکل جابجایی مطلق (U) از جمع جابجایی‌های میدان آزاد (u) و جابجایی اضافه شده (u) حاصل شده‌اند.

این سختی‌ها با کمک فرمول‌های ارائه شده توسط FEMA [۱۲] برای فونداسیون‌های واقع بر خاک زهکش نشده و مجاور خاک رسوبی سخت‌تر، که سرعت موج برشی دو برابر لایه‌های سطحی می‌باشد، برآورد شده است. ولتسوس (Veletsos et al. 1988) یک فرمول کلی برای نسبت میرایی مؤثر ξ_0 برای سیستم فونداسیون مخزن پیشنهاد نموده که FEMA [۱۲] نیز یک رابطه مشابه به صورت زیر ارائه می‌نماید:

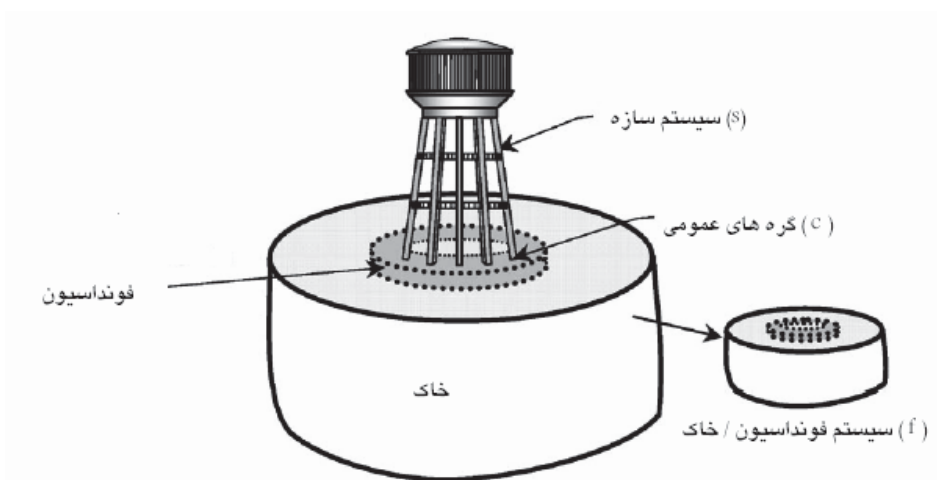
$$\xi_0 = \xi_0 + \frac{\xi}{(\tilde{T}/T)^3}, \quad (6)$$

که ξ_0 : درصد میرایی بحرانی مخزن هوایی با فرض اساس ثابت، ξ_0 : سهم میرایی فونداسیون شامل میرایی ساطع شده (هندسی) و میرایی مصالح خاک، T: دوره تناوب طبیعی مخزن با فرض اساس ثابت و \tilde{T} : دوره تناوب اصلاح شده سازه که در مرز انعطاف‌پذیر سیستم مهار شده می‌باشد و از رابطه تقریبی زیر حاصل می‌شود: [۱]

$$\tilde{T} = T \sqrt{1 + \frac{k}{k_y} \left(1 + \frac{k_y H^2}{k_\theta}\right)}, \quad (7)$$



شکل ۵- ضریب میرایی فونداسیون (FEMA 368, 200)



شکل ۶- مدل اندرکنش سازه - فونداسیون / خاک برای مدل مورد بررسی

از فرض سختی مستقیم در آنالیزهای سازه‌ای، تعادل نیروهای دینامیکی سیستم در ترم‌های جابجایی مطلق، U ، توسط معادله ماتریسی زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_s \\ \ddot{U}_c \\ \ddot{U}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sf} & 0 \\ K_{cf} & K_{cc} & K_{cf} \\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_s \\ U_c \\ U_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

که جرم‌ها و سختی‌ها در گره‌های تماس حاصل جمع مشارکت حاصل از سازه (s) و فونداسیون (f) بوده، که توسط رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$M_{cc} = M_{cc}^{(s)} + M_{cc}^{(f)} \quad \text{and} \quad K_{cc} = K_{cc}^{(s)} + K_{cc}^{(f)}. \quad (9)$$

راه حل میدان آزاد سه بعدی توسط جابجایی مطلق U و شتاب مطلق \ddot{U} معرفی شده‌اند، که با تغییر ساده در متغیرها، امکان بیان جابجایی مطلق U و شتاب \ddot{U} توسط عبارتهای جابجایی u مربوط به جابجایی آزاد v نظیر رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{Bmatrix} U_s \\ U_c \\ U_f \end{Bmatrix} \equiv \begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \\ u_f \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} v_s \\ v_c \\ v_f \end{Bmatrix} \quad \text{and} \quad \begin{Bmatrix} \ddot{U}_s \\ \ddot{U}_c \\ \ddot{U}_f \end{Bmatrix} \equiv \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_c \\ \ddot{u}_f \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \ddot{v}_s \\ \ddot{v}_c \\ \ddot{v}_f \end{Bmatrix} \quad (10)$$

با جمع‌بندی معادلات (۸) و (۹) و (۱۰) می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_c \\ \ddot{u}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} & 0 \\ K_{cs} & K_{cc} & K_{cf} \\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \\ u_f \end{Bmatrix} \\ = - \begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_s \\ \ddot{v}_c \\ \ddot{v}_f \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} & 0 \\ K_{cs} & K_{cc} & K_{cf} \\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_s \\ v_c \\ v_f \end{Bmatrix} = \{R\}, \quad (11)$$

که R: بردار بار است. بنابراین طرف راست معادله (۱۱) جرم فونداسیون را شامل نمی‌شود. لذا معادله تعادل دینامیکی سه بعدی با میرایی اضافه شده برای سیستم خاک - سازه کامل متعلق به رابطه زیر از سیستم جرم متمرکز می‌باشد:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -m_x\ddot{v}_x - m_y\ddot{v}_y - m_z\ddot{v}_z. \quad (12)$$

از نکات درخور توجه دیگر آنکه اغلب اوقات در طراحی اینگونه سازه‌ها از کنترل تغییر مکان جانبی صرف‌نظر می‌شود. در حالی که امکان دارد این پارامتر حساس دارای مقادیر ۳ برابر و حتی بیشتر از مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ای باشد؛ که این خود، عاملی جهت ناپایداری این سازه می‌باشد.

اما در مورد مدل‌های اجزاء محدود که در آن اندرکنش سیال-سازه - خاک لحاظ شده با تغییر شرایط تکیه‌گاهی (خواص مکانیکی خاک بستر) مقادیر محاسبه شده نیروی برشی، لنگر واژگونی، نیروی محوری، و تغییر مکان جانبی متفاوت می‌باشد.

مراجع

۱. مسعودی، مصطفی؛ رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی در اثر سه مولفه همبسته زلزله؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی زلزله پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، (۱۳۸۳).
۲. ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخازن آب زمینی؛ نشریه ۱۲۳ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، (۱۳۷۴).
3. Housner G. W, "Dynamic Pressure On Accelerated Fluid Containers" Bulletin Of The Seismological Society Of America Vol 53. No. 10 Pp 15-35, (1963).
4. Abramson H.N, "The Dynamic Behavior Of Liquids In Moving Containers" Nasa Report Sp.106, (1966).

همچنین، جابجایی نسبی، u، برای سیستم خاک - سازه وجود دارد که می‌باید در اطراف و پایین فونداسیون، صفر منظور گردد. عبارات \ddot{u}_x و \ddot{u}_y و \ddot{u}_z مولفه‌های میدان آزاد شتاب بوده، به شرط آنکه سازه پیشنهاد نشده باشد. ماتریس‌های m_x و m_y و m_z هم‌راستای جرم‌ها تنها برای سازه اضافه شده می‌باشند.

۴- نتیجه‌گیری

طراحی لرزه‌ای مخازن هوایی با استفاده از روش جرم متمرکز ساده، منتهی به برش پایه و لنگر واژگونی کمتر خواهد شد که این خود می‌تواند منجر به طرح غیرایمن مخازن هوایی به‌ویژه با سیستم پایه از نوع بتن آرمه شود. مقادیر پریرود ارتعاش در این حالت تا ۲ ثانیه محاسبه شده، درحالی که در سایر مدل‌های مورد اشاره فوق، پریرودهای مود ضربه‌ای تقریباً حدود ۱/۱ ثانیه برآورد شده است. که این خود بیانگر این واقعیت است که مودهای ضربه‌ای به شدت رفتار لرزه‌ای مخازن را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

برای حالت‌های مختلف مدل‌های مذکور، مودهای نوسانی دارای پریرودهای مشابه و نزدیک می‌باشند.

طرح لرزه‌ای مخازن با سیستم پایه بتن آرمه براساس فرض اینکه تکیه‌گاه آن صلب یا سنگی باشد و صرف‌نظر نمودن از بررسی شرایط و ویژگی‌های تکیه‌گاهی می‌تواند فرضیات اشتباهی در برآورد برش پایه و لنگر واژگونی را به دنبال داشته باشد.

5. Kalnin. S. A, "Free Vibration Of Rottationally Symmetric Shells G.Acoust", Soceity Am 36, Pp 1355-1365, Journal Of Acoustic, (1964).
6. Haroun M. A & Tayel M. A., "Axisymmetrical Vibrations Of Tanks Numerical" Journal Of Eng Mech div , ASCE Vol III, Pp 329-345, (1985).
7. Jain. S. K & Sameer S. V, "A Review Of Requirment In Indian Codes For A Seismic Design Of Elevated Water Tanks". Bridge & Structural Engineer- Vol xii , No , March (1993).
8. Haroun. M. A & Housner, "Dynamic Charactoeriestics Of Liquid Storage Tanks", Journal Of Mech. Div; ASCE Vol 108 Pp 183-800, (1982).
9. A. W. W. A Standard, D101-53 (R86), Jonuary (1989).
10. Euro Code8, Design Of Structures For Earthquake Resistance, Part 4, November (2004).
11. ACI Standard, "American Concrete Institute", (2005).
12. FEMA 368/369, 2000. The 2000 NEHRP Recommended Provisions For New Buildings And Other Structures, Part 1: Provision And Part 2: Commentary. Federal Emergency Agency, Washington.