

تحلیل و بررسی رفتار مخازن بتنی هوایی آب تحت تأثیر نیروی زلزله

مازیار حسینی
کارشناس ارشد

حمزه شکیب
استادیار

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

چکیده

مخازن هوایی آب از جمله اجزاء اصلی تأمین فشار در شبکه‌های آبرسانی شهرها به شمار می‌روند که با توجه به توسعه افزایش دهنده شهرها بر حجم و ارتفاع این سازه نیز روز به روز افزوده می‌گردد. با توجه به اینکه در این سازه‌ها، قسمت اعظم جرم در فاصله قابل ملاحظه از فونداسیون قرار می‌گیرد، آنالیز این سازه‌ها تحت تأثیر نیروهای جانبی وارده می‌تواند مهم و قابل توجه، به خصوص به جهت تأمین امنیت و حفظ کارایی این سازه‌ها باشد. از آنجایی که زمان تناوب این سازه‌ها، عموماً بالا می‌باشد، انتخاب روش تحلیلی مناسب، که بتواند برداشت صحیحی از عملکرد سیستم در هنگام وارد آمدن بارهای جانبی را بدهد و همچنین بررسی اثر نیروهای حاصل از فشارهای هیدرودینامیک پدید آمده در مخزن، می‌تواند مهم و حائز اهمیت باشد. از آنجایی که در آیین‌نامه زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰)، موارد فوق به طور کامل و صریح مشخص نگردیده و بنا به اهمیت سلامت و کارایی این سازه‌ها، به ویژه بعد از وقوع زلزله، در این پروژه سعی بر تحلیل و بررسی دقیق از رفتار مخازن هوایی تحت تأثیر نیروی زلزله و پیشنهاد روش تحلیلی مناسب با خصوصیات و ویژگی‌های این سازه‌ها می‌باشد، که نتایج آن هم بتواند در تکمیل آیین‌نامه متمر نامر واقع گردد و هم مورد استفاده مهندسان طراح قرار گیرد.

Analysis of Concrete Water Towers under Seismic Excitations

Hamzeh Shakib
Assistant Professor

Maziar Hosseini
Research Associate

College of Engin., Tarbiat Modarres Univ.

International Institute of Earthquake
Engin. & Seismology

Abstract

Water towers are considered one of the main elements in providing the pressure for water supply. Their height and volume are increased based on the expansion of cities. Because in these structures, the most part of the mass is placed in a considerable distance from the foundation, analysis of these structures under the effect of lateral forces is considerable and important to provide safety and

preserve their efficiency. Period of these structures is generally high, therefore selecting a suitable analytic method which can evaluate the correct behaviour of the system and the hydrodynamic pressures on the tank, while subjected to earthquake excitation, is important.

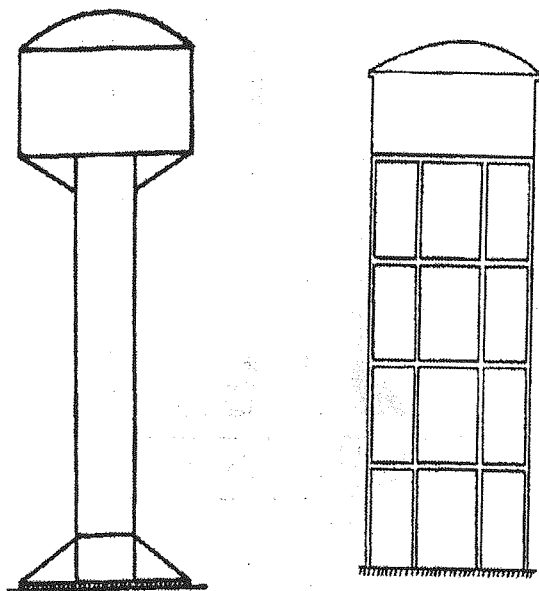
Since, the design seismic provisions are not completely specified in the seismic code of Iran, and considering the importance of the safety of water towers and efficiency of these structures, specially after an earthquake, this study tries to investigate the behaviour of water towers under the effect of earthquake force and propose an analytic method suitable to the tower characteristics. So that, its results can be useful in completing the code and also be used by the designers.

۱- مقدمه

شامل دو مؤلفه جانبی یک مؤلفه قائم و سه مؤلفه پیچشی حول محورهای مختصات سازه می باشد. مؤلفه افقی شتاب زمین باعث اعمال فشارهای هیدرودینامیکی به دیواره مخزن می شود. این فشار شامل فشارهای ضربه ای (Impulsive Pressure) و فشارهای نوسانی (Convective Pressure) 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 به صورت امواج سطحی در سیال ظاهر می گردند. فشار هیدرودینامیکی ایجاد شده در اثر تحریکات زلزله، سبب ایجاد نیروهای برشی و لنگر خمشی و در نتیجه تنش های حلقوی (Hoop stress) فشاری و کششی و تنش های برشی قابل توجهی در پوسته مخزن می شود که در صورت نداشتن برآورد مناسبی از آنها در طراحی مخازن می تواند حوادث جبران ناپذیری به دنبال داشته باشد. پروفسور هازنر (G.W. Housner) در حدود ۳۰ سال پیش به بررسی رفتار دینامیکی مخازن پرداخت [1]. او با فرض رفتار صلب مخزن توانست مقادیر تقریبی فرکانس تلاطم سیال و فشار هیدرودینامیکی نوسانی را برای مخازن مستطیلی و استوانه ای ارائه دهد. آبرامسون (Abramson) نیز با استفاده از حل دقیق تابع پتانسیل سیال تراکم ناپذیر روشی را برای محاسبه فشار نوسانی در مخزن پیشنهاد نمود [2] کالنینز (Kalmns) با استفاده از روش پیشنهادی Abramson برای محاسبه جرم ضربه ای سیال و اضافه نمودن آن به صورت جرمی با توزیع یکنواخت در ارتفاع به جرم پوسته مخزن به محاسبه فرکانس های طبیعی پوسته مخزن با مشخصات جرمی جدید پرداخت. [3]

مخازن سازه هایی هستند که برای ذخیره کردن و نگهداری مایعات به کار می روند و به اشکال مختلف از جمله کروی، استوانه ای، مکعب مستطیل ساخته می شوند. به طور کلی از لحاظ نحوه اتکاء، مخازن به دو نوع پایه دار هوایی (Elevated Tanks) و زمینی (Ground Supported Tanks) تقسیم می شوند. مخازن هوایی خود به دو شکل پایه دار با قاب های مهاربندی شده و یا با شافت واحد مرکزی مورد استفاده قرار می گیرند. مخازن زمینی نیز به صورت مدفون و یا نیمه مدفون ساخته و مورد استفاده قرار می گیرند. علاوه بر تعدیل نوسان های ساعتی مصرف آب، کار تأمین فشار لازم و مناسب در شبکه توزیع نیز از جمله وظایف مخازن به شمار می رود، در صورتی که زمین مرتفع در منطقه مورد نظر وجود داشته باشد، مخزن به طور 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 1000 m^3 ساخته می شوند. با توجه به قرار گرفتن کشور در ناحیه ای با خطر زلزله خیزی بالا و با عنایت به اینکه در این سازه ها، قسمت اعظم جرم در فاصله قابل ملاحظه ای از تراز فونداسیون قرار می گیرد، نیروهای جانبی وارده به سازه می تواند بسیار مهم و قابل توجه باشد. به خصوص عملکرد مطمئن و صحیح این سازه ها در مقابله با زلزله های قدرتمند محتمل الوقوع در کشور به جهت استفاده هایی که بعد از وقوع زلزله از آنها می شود (اطفاء حریق، تأمین آب شرب مصرفی، بهداشت عمومی، ...) بسیار حائز اهمیت می باشد. به طور کلی هر سازه ای که به زمین اتکاء داشته باشد، حین زمین لرزه تحت اثر شش مؤلفه حرکت زمین قرار می گیرد. که

یکدیگر مرتبط می‌گردند و دیگری استفاده از یک ستون (شافت) واحد مرکزی می‌باشد. سیستم اول از نظر ایستایی می‌تواند وضعیت مناسب‌تری را نسبت به سیستم دوم داشته باشد اما با توجه به اینکه امروزه این مخازن عموماً در داخل فضاهای شهری و در محل رؤیت و دید عموم قرار دارند، از نقطه نظر معماری و زیبایی (Aesthetics)، تمایل بیشتری به استفاده از سیستم دوم بوجود آمده است.



شکل (۱-۲) سیستم‌های پایه‌ای متداول در مخازن هوایی

ارتفاع برج مورد مطالعه $31/5$ متر از تراز فوقانی فونداسیون می‌باشد. سطح مقطع آن استوانه‌ای با شعاع $7/5$ متر بوده و بر روی یک شافت مرکزی بتنی با شعاع $2/5$ متر قرار گرفته است. ارتفاع شافت $24/5$ متر و ارتفاع مخزن 6 متر در نظر گرفته شده است. قسمت پایین شافت تا رقوم $2/5$ متری از تراز فوقانی فونداسیون به جهت اقناع نیروهای برشی و لنگرهای خمشی وارده به شکل شیب‌دار (ماهیچه) طراحی گردیده است. در زیر دال مخزن نیز هشت تیر سخت‌کننده (Stiffner) تعبیه گردیده تا از ضخامت دال مخزن کاسته شود. همانطور که در شکل (۲-۲) ملاحظه می‌گردد ضخامت دیواره شافت و ارتفاع دال کف مخزن 50 سانتیمتر و ضخامت دیواره خارجی و داخلی مخزن و ارتفاع دال سقف مخزن 30 سانتیمتر در نظر گرفته شده است.

چین و مدسکار (Jain & Medhekar) ضمن مهم توصیف نمودن اثر فشارهای نوسانی، توزیع معادل ساده شده‌ای را برای فشارهای هیدرودینامیک پیشنهاد نمودند [4] ایشان همچنین متذکر گشتند که نداشتن برآورد مناسب و صحیحی از سختی جانبی سیستم (به ویژه در مخازن هوایی پایه دار با مهاربندی جانبی) می‌تواند تأثیرات قابل ملاحظه‌ای را بر تخمین پریود مخزن داشته باشد. با توجه به مطالب عنوان شده می‌توان ارکان اساسی در بررسی نحوه عملکرد و رفتار مخازن هوایی در حین وقوع یک زمین لرزه را در سه فاکتور محتوای فرکانسی زمین لرزه، خصوصیات دینامیکی سازه و اثر اندرکنش آب و مخزن خلاصه نمود. با توجه به اینکه هنوز برآورد مناسب و کاملی از تحلیل مخازن با در نظر گرفتن اثرات هر سه رکن ذکر شده به عمل نیامده است و با توجه به اینکه در اندک مطالعات انجام شده در این مقوله نظرات واحدی عنوان نشده، لذا در این تحقیق جهت رسیدن به یک راه حل مناسب و برداشت صحیح از نحوه عملکرد این سازه‌ها موارد زیر مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است:

- ۱- بررسی و مقایسه نتایج حاصل از اعمال روش‌های مختلف تحلیلی در ارتباط با رفتار مخازن هوایی بتنی تحت تأثیر نیروی زلزله؛
- ۲- بررسی نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر دیواره مخزن و اثر اندرکنش آب و مخزن؛
- ۳- اثر محتوای فرکانسی شتابنگاشت اعمالی بر رفتار مخازن هوایی؛
- ۴- پیشنهاد روش تحلیلی متناسب با شرایط و مسائل کشور.

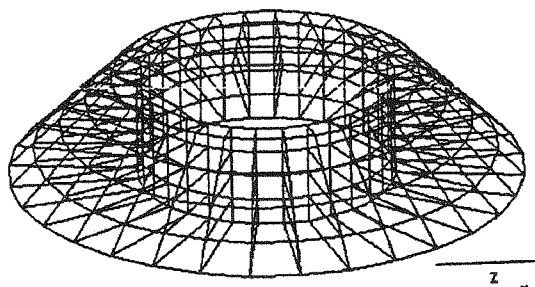
۲- مدلسازی و مطالعات عددی

۲-۱- مدل فیزیکی

برج آب مورد مطالعه در پروژه یک مخزن بتنی هزار متر مکعبی می‌باشد که بر روی یک شافت استوانه‌ای مرکزی قرار گرفته است. این حجم ماکزیم مقدار است که برای مخازن هوایی در نظر گرفته می‌شود و در صورت نیاز به ظرفیتی بیش از مقدار فوق، از چند مخزن کوچکتر استفاده می‌گردد. در رابطه با سیستم پایه‌ای (Staging) نیز عمدتاً دو سیستم متداول می‌باشد (شکل ۲-۱)، که یکی استفاده از چند ستون بتنی است که به وسیله مهارهای افقی و مورب در فواصل مورد نظر به

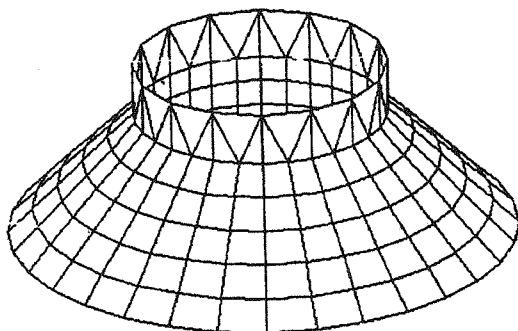
المان های Solid هشت گرهی استفاده شده، و در نهایت درجات آزادی سیستم به ۶۷۰۰ درجه رسیده است.

۲-۱- شبکه اجزاء محدود سیستم (Mesh Generation)
المان های Solid با ۱۰۲۴ گره و تشکیل ۱۲۸ بلوک حجیم (Brick Element) شبکه مربوط به ماهیچه ابتدای شافت را ایجاد می نمایند. در این قسمت از شبکه فاصله بین گره ها ۵۰ سانتیمتر و فاصله بین لایه ها نیز همین مقدار در نظر گرفته شده است (شکل ۲-۳). این المان ها تا ارتفاع ۲ متری از سطح تراز فوقانی فونداسیون ادامه می یابند و از آن پس با کم شدن ضخامت شافت، باقیمانده شبکه اجزاء محدود سیستم را المان های مثلثی و مربعی Shell با عملکرد غشایی و خمشی ایجاد می نمایند.

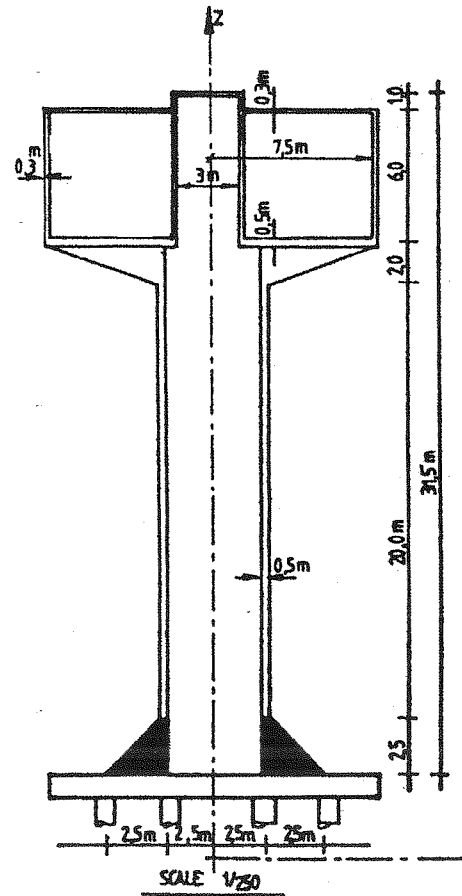


شکل (۲-۳) المان های Solid و شبکه اجزاء محدود مربوطه

به جهت کاهش تعداد گره ها و المان ها و در نتیجه کاهش تعداد درجات آزادی سیستم، فاصله گره ها در ادامه شبکه افزایش داده شده، لیکن برای حفظ سازگاری (Compatibility) یک لایه انتقالی (Transitional) متکی به المان های سه گرهی مثلثی ایجاد گردید تا هیچ گرهی در لایه پایینی بدون اتصال به گرهی در لایه بالایی خود باقی نماند. شکل (۲-۴)



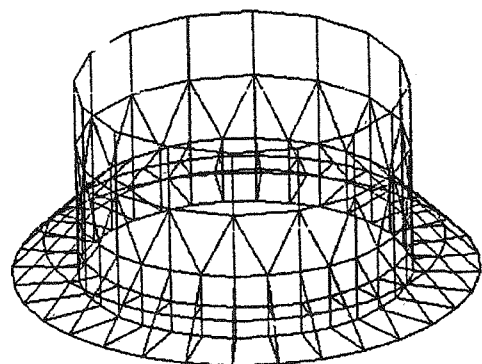
شکل (۲-۴) لایه انتقالی (Transitional Layer)



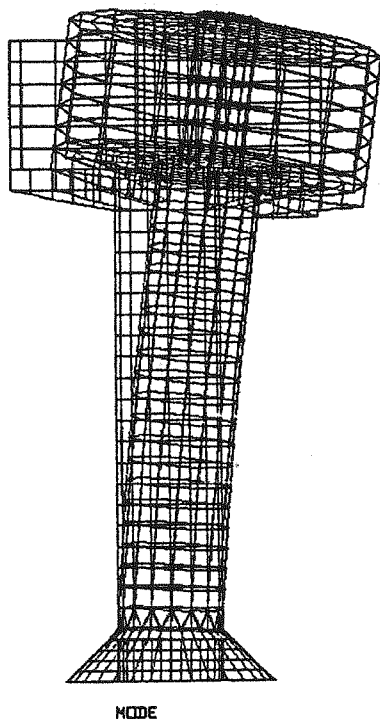
شکل (۲-۴) مدل فیزیکی مخزن

۲-۲- مدل ریاضی

پس از تکمیل شکل هندسی مخزن، مدل ریاضی آن با استفاده از روش اجزاء محدود (Finite Element) و تحت قالب برنامه آنالیز سازه ها (SAP90-5.2) تهیه گردید. در این مدل از المان های Shell با عملکرد غشایی و خمشی و



شکل مودهای ارتعاشی مورد مطالعه و زمان تناوب و فرکانس طبیعی و پیچشی مربوط به هر مود می باشد. در شکل (۲-۶) اشکال مدهای ارتعاشی سیستم برای سه مود اول مشاهده می گردد. مود اول و دوم مودهای جانبی و مد سوم، مود پیچشی سیستم را نمایش می دهد.



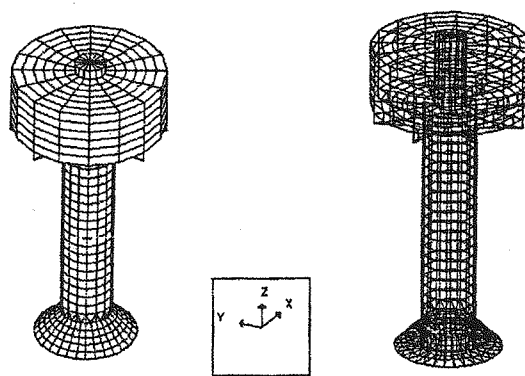
شکل (۲-۶) مود اول ارتعاشی سیستم

در جدول (۲-۱) نتایج مربوط به زمان تناوب سیستم در مودهای ارتعاش مورد مطالعه در هر یک از وضعیت های مخزن ملاحظه می گردد.

۲-۴- مدل سازی نیروهای هیدرو دینامیک

مبحث هیدرو دینامیک یکی از قسمت های جالب و مهم مهندسی زلزله می باشد که شامل فشارهای دینامیکی وارده به سدها، مخازن و ارتعاش در سازه های مستغرق (Submerged structures) می گردد. با وجود اشتراکی که این سازه ها در کلیات مسائل هیدرو دینامیکی خود با یکدیگر دارند لیکن هر یک شرایط و محدودیت های خاص خود را داشته و می بایست به طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرند. لذا در اینجا ما در پی آن خواهیم بود تا فشارهای هیدرو دینامیکی وارده به مخازن را مورد بررسی و شناخت قرار داده و با ارائه یک مدل مکانیکی بتوانیم تأثیرات این نیروها را در آنالیز سیستم لحاظ نماییم.

شبکه شافت مخزن با المان های مربعی و با ضخامت ۵۰ سانتیمتر تا ارتفاع ۲۴/۵ متری که کف مخزن قرار می گیرد ادامه می یابد. مخزن را دو دیواره خارجی و داخلی محصور می نماید. دیواره خارجی هم شعاع مخزن و دیواره داخلی استوانه ای است با شعاع ۱/۵ متر و ارتفاع ۷ متر، ضخامت دیواره های خارجی و داخلی مخزن و همچنین دال سقف مخزن، همگی ۳۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. در شکل (۲-۵) نمای ایزومتریک شبکه بندی کل سیستم ملاحظه می گردد.



شکل (۲-۵) شبکه بندی کل سیستم با نمای ایزومتریک

۲-۳- خصوصیات دینامیکی برج آب مورد مطالعه

جهت بررسی وضعیت رفتار برج های آب در مناطق زلزله خیز به لحاظ شرایط خاص فرم هندسی این گونه سازه ها محاسبه خصوصیات دینامیکی از قبیل فرکانس ها، شکل مودها و میرائی، لازم و ضروری می باشد. بدین منظور با استفاده از روش مقدار ویژه (Eigen Value Method) در هر یک از وضعیت های مخزن (خالی، ۱/۳ پر، ۱/۲ پر، ۲/۳ پر و پر) خصوصیات دینامیکی محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این امر شامل حل رابطه تعمیم یافته، مقادیر ویژه زیر می باشد:

$$[K][\phi] - [M][\phi][\Omega^2] = 0$$

که در آن $[K]$ ماتریس سختی، $[M]$ ماتریس قطری جرم، $[\Omega^2]$ ماتریس قطری مقدار ویژه و $[\phi]$ ماتریس بردارهای نظیر می باشند. حل این رابطه توسط یک الگوریتم تکرار زیر فضای تسریع یافته صورت می پذیرد و تا زمان همگرایی بردارهای ویژه (Eigen Vectors) در زیر فضای مربوطه ادامه می یابد. نتیجه این محاسبات

Mode Number	PERIOD (Sec)				
	Empty Tank	1/3 Full Tank	1/2 Full Tank	2/3 Full Tank	Full Tank
1	0.665230	0.770678	0.818426	0.863577	0.947516
2	0.665230	0.770678	0.818426	0.863577	0.947516
3	0.229691	0.272870	0.292095	0.31036	0.343399
4	0.124437	0.141643	0.149193	0.156264	0.169316
5	0.124437	0.141643	0.149193	0.156264	0.169316
6	0.105563	0.122836	0.130770	0.138301	0.152343

نسبت ضخامت دیواره به شعاع مخزن بزرگتر از $0.01 \left(\frac{hw}{R} \geq 0.01 \right)$ و یا نسبت ارتفاع به شعاع مخزن کوچکتر از $1/5$ باشد $\left(\frac{h}{R} \leq 1.5 \right)$ می‌توان دیواره را صلب در نظر گرفت و یا به عبارت دیگر فرکانس ارتعاشی دیواره مخزن را ناچیز در نظر گرفت [2], [5] روابط حاصل به شرح زیر می‌باشد:

جرم سخت معادل:

$$m_0 = \frac{\tanh\left(1.732 \frac{R}{h}\right)}{1.732 \frac{R}{h}} \cdot m \quad (1-4-2)$$

ارتفاع اثر جرم سخت:

$$h_0 = \frac{3}{8} h \quad (2-4-2)$$

ارتفاع اثر جرم سخت با در نظر گرفتن اثر لنگرکف:

$$h_0 = \frac{3}{8} h \left[1 + \frac{4}{3} \left(\frac{1.732 R}{h} \frac{\tanh\left(1.732 \frac{R}{h}\right)}{1.732 \frac{R}{h}} - 1 \right) \right] \quad (3-4-2)$$

بدین منظور با انجام فرضیاتی و با استفاده از قانون بقای جرم و روابط پیوستگی معادله دیفرانسیل حرکت سیال را به دست آورده و با اعمال شرایط مرزی سیستم معادلات حرکت جسم را به دست می‌آوریم و در نهایت سعی می‌گردد، تا با استفاده از روابط انرژی به تعیین جرم و میراثی معادلی پرداخت که انرژی جنبشی و اصطکاکی متناظر با آنها به ترتیب معادل انرژی ناشی از فشار مایع بر مخزن در تغییر مکان آن و افت انرژی وابسته به آن باشد. فشارهای وارده را می‌توان به دو جزء فشارهای ضربه‌ای (Impulsive Pressure) و فشارهای نوسانی یا سطحی (Convective Pressure) تقسیم کرد. فشارهای ضربه‌ای مربوط به نیروهای اینرسی ناشی از ارتعاش دیوارهای مخزن می‌باشد و نیروهای تولیدی مستقیماً با شتاب دیواره‌های مخزن متناسب است. فشارهای نوسانی در اثر نوسان مایع تولید گشته و منتج از فشارهای ضربه‌ای می‌باشد. فشار ضربه‌ای هم فرکانس با فرکانس مخزن عمل می‌نماید در صورتی که فشار نوسانی با فرکانس به مراتب کوچکتر از فرکانس مخزن عمل می‌نماید. شکل (۲-۷) مدل مکانیکی نیروهای هیدرودینامیک در یک مخزن استوانه‌ای را نمایش می‌دهد در روابط ارائه شده جهت برآورد فشارهای هیدرودینامیک در مخزن مستطیلی با دیواره‌های صلب در مخازن بتنی، هر گاه

$$P_t = \lambda \left[1.814 \rho h^2 R \tanh \left(\sqrt{3} \frac{R}{h} \right) \right] \quad (9-4-2)$$

(ρ وزن مخصوص آب.)

از رابطه فوق مقدار λ را محاسبه نموده و با جاگذاری در رابطه زیر توزیع فشار در ارتفاع و پلان مخزن مطابق رابطه (۲-۴-۱۰) انجام می پذیرد:

$$P_0 = \sqrt{3} \lambda \rho h \left[\frac{y}{h} - 0.5 \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right] \tanh \left(\frac{R}{h} \right) \cos(\phi) \quad (10-4-2)$$

در این رابطه:

h = تراز نهایی آب در مخزن.

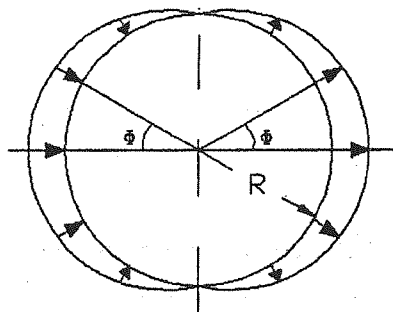
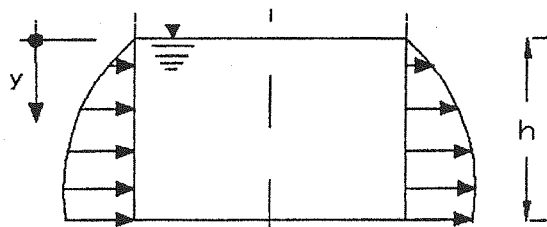
y = تراز مورد مطالعه از سطح مایع (y مقداری بین

0 تا h می تواند داشته باشد).

ϕ = زاویه بین P_0 و راستای مورد نظر.

این توزیع در ارتفاع مخزن به شکل سهموی و در پلان نیز به صورت غیرخطی انجام می پذیرد. شکل

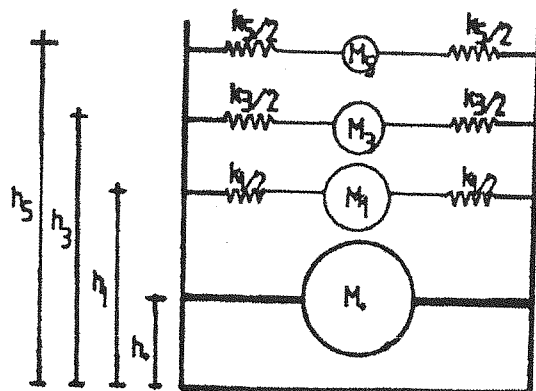
(۲-۸)



PLAN

شکل (۲-۸) نحوه توزیع فشار هیدرودینامیک در ارتفاع و پلان مخزن استوانه‌ای

و بدین ترتیب نیروهای هیدرودینامیک پدید آمده در سیستم را در هر یک از وضعیت‌های مختلف مخزن (1/3 پر، 1/2 پر، 2/3 پر و کاملاً پر) می توان محاسبه و به سیستم اعمال نمود.



شکل (۲-۷) مدل مکانیکی نیروهای هیدرودینامیک

در یک مخزن استوانه‌ای

جرم موج معادل:

$$m_1 = \left[0.455 \frac{R}{h} \tanh \left(1.873 \frac{h}{R} \right) \right] m \quad (4-4-2)$$

ارتفاع اثر جرم موج:

$$h_1 = h \left[1 - \frac{\cosh \left(1.873 \frac{h}{R} \right) - 1}{\left(1.873 \frac{h}{R} \right) \sinh \left(1.873 \frac{h}{R} \right)} \right] \quad (5-4-2)$$

ارتفاع اثر جرم موج با در نظر گرفتن اثر لنگرکف:

$$h'_1 = h \left[1 - \frac{\cosh \left(1.873 \frac{h}{R} \right) - 2}{\left(1.873 \frac{h}{R} \right) \sinh \left(1.873 \frac{h}{R} \right)} \right] \quad (6-4-2)$$

سختی معادل جرم موج:

$$K_1 = 0.836 \frac{m}{g} \tanh^2 \left(1.873 \frac{h}{R} \right) \quad (7-4-2)$$

پس از تعیین جرم موج و جرم سخت، نیروهای حاصله از هر یک را محاسبه و مطابق روابط زیر در ارتفاع و پلان مخزن توزیع می نماییم:

P_i = فشار حاصل از اثر جرم سخت (Impulsive Pressure)

P_c = فشار حاصل از اثر جرم موج (convective Pressure)

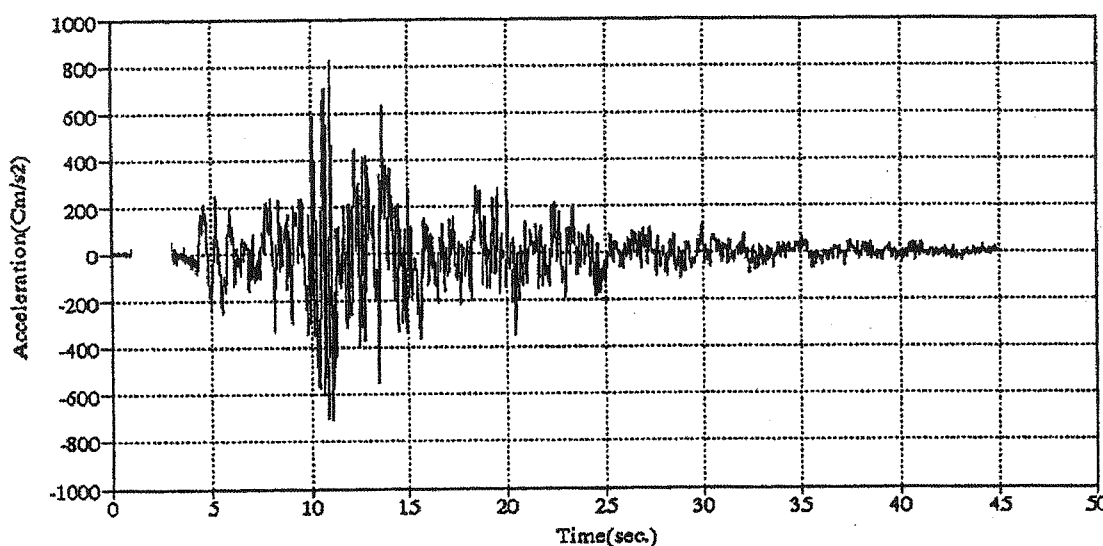
$$P_t = P_i + P_c \quad (8-4-2)$$

۲-۵- آنالیز سیستم

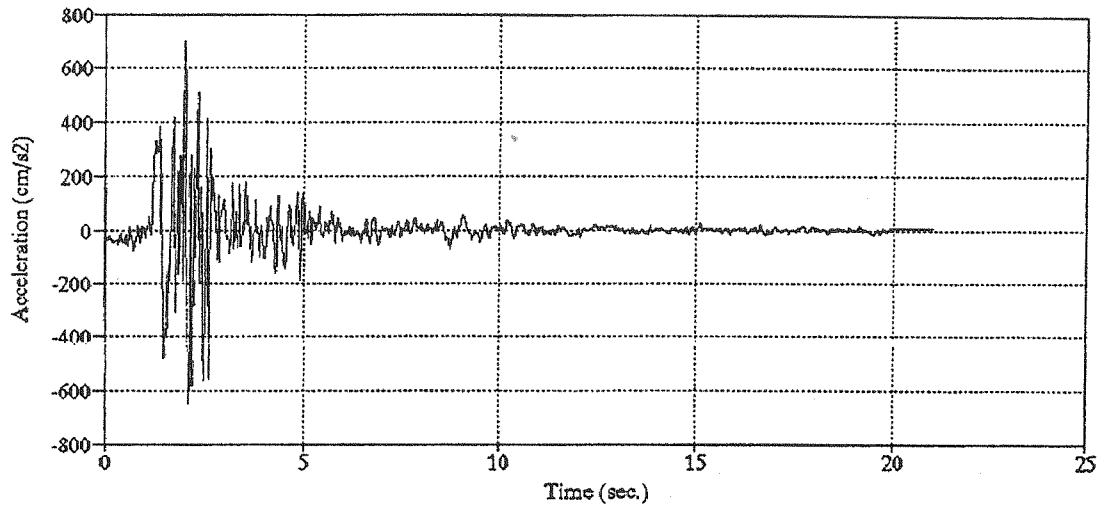
مصالح، میراثی، نوع سیستم سازه و ظرفیت شکل پذیری سازه می باشد، مقدار ۲/۵ انتخاب گردیده است. برای به دست آوردن بیشترین ضریب بازتاب نیز ضعیف ترین وضعیت طبقه بندی و جنس لایه های خاک (گروه IV جدول شماره ۲ آیین نامه) که پیروید طبیعی $T_0=0.7 \text{ Sec}$ را دارا می باشد، در نظر گرفته شده است.

در آنالیز دینامیکی سیستم نیز با توجه به اینکه پاسخ یک سازه معین در برابر تحریکات ناشی از اعمال شتابنگاشت های ثبت شده در زلزله های مختلف یکسان نمی باشد، انجام محاسبات می بایست براساس نتایج حاصل از آنالیز دینامیکی سازه تحت تأثیر چند شتابنگاشت انجام پذیرد. بدین منظور در این پروژه از مؤلفه های افقی (Longitudinal) شتابنگاشت های ثبت شده در زلزله های طیس (N74E، طیس ۲۵ شهریور ۱۳۵۷) و ناغان (N50E، ناغان ۱۷ فروردین ۱۳۵۶) و آب بر (N32E، منجیل ۳۱ خرداد ۱۳۷۰) که از قدرتمندترین و مخرب ترین زلزله های ثبت شده در کشور می باشند و از شتاب افقی بیشینه بیش از ۵۰٪ شتاب ثقل برخوردار می باشند، استفاده شده است. شکل های (۲-۹) الی (۲-۱۱) نمودارهای شتاب - زمان مربوط به مؤلفه های طولی این سه زلزله را نمایش می دهد.

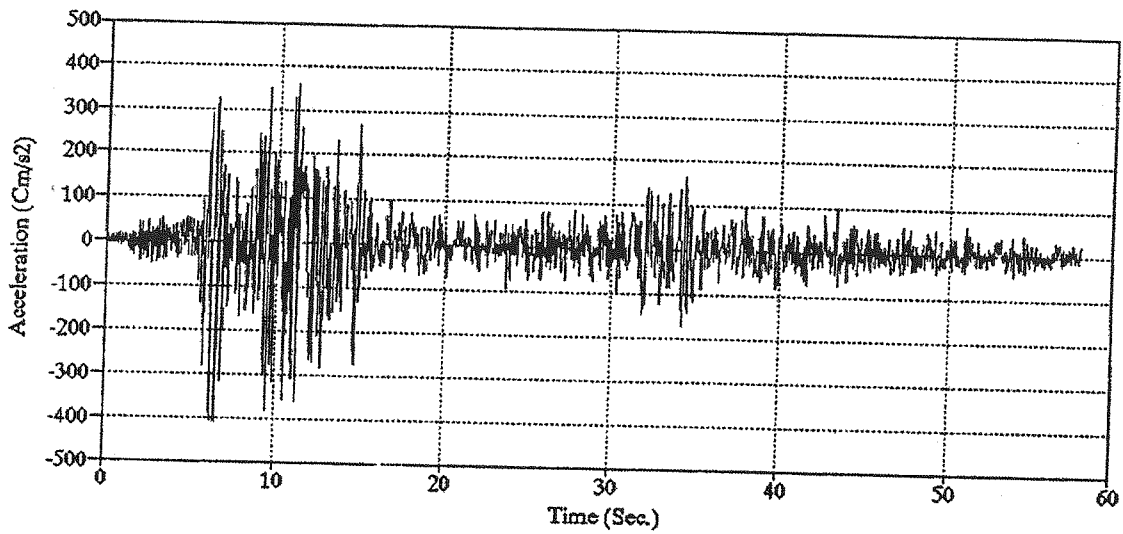
آنالیز سیستم بر مبنای روش های معادن استاتیکی، شبه دینامیکی (طیفی) و دینامیکی در هر یک از وضعیت های مختلف مخزن انجام پذیرفته است. به جهت بررسی کارایی ضوابط مندرج در آیین نامه ۲۸۰۰، ضوابط این آیین نامه مبنای محاسبات روش معادل استاتیکی قرار گرفته است. در این آیین نامه نیروی برش پایه سیستم بر مبنای رابطه $V=C.W$ محاسبه می گردد. در این عبارت W وزن محاسباتی سازه (تمامی وزن مرده سازه + درصدی از بار زنده) و "C" ضریب زلزله (Seismic Coefficient) می باشد، که مقدار آن برابر است با $\left\{ C = \frac{A B I}{R} \right\}$ ، که در آن "A" شتاب مبنای طرح (نسبت به شتاب ثقل (g))، "B" ضریب بازتاب سازه که با استفاده از طیف بازتاب طرح به دست می آید. "I" ضریب اهمیت سازه و "R" ضریب رفتار سازه می باشد. برای به دست آوردن بیشترین پاسخ مقادیر فوق برای بحرانی ترین حالات انتخاب گردیده اند. بدین ترتیب که مقدار "A" برابر ۰/۳۵ برای مناطق با خطر نسبی بالا و برابر ۱/۲ برای سازه های با اهمیت زیاد که وقفه "I" در بهره برداری از آنها به طور مستقیم یا غیرمستقیم موجب افزایش تلفات و خسارات در نواحی زلزله زده می شود و "R" که قابلیت جذب انرژی در سازه را مشخص می نماید و منعکس کننده عوامل متعددی چون



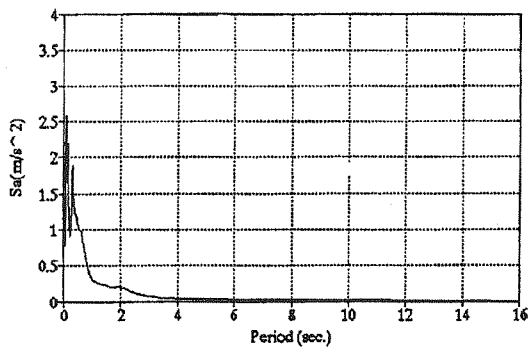
شکل (۲ - ۹) مؤلفه طولی زلزله طیس



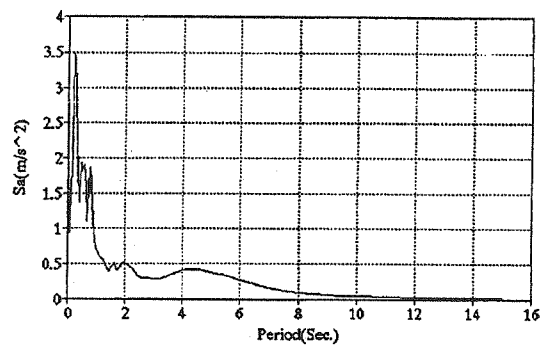
شکل (۲-۱۰) مؤلفه طولی زلزله ناغان



شکل (۲-۱۱) مؤلفه طولی زلزله آب بر



شکل (۲-۱۳) طیف طرح ناغان (D=%5)



شکل (۲-۱۲) طیف طرح طبس (D=%5)

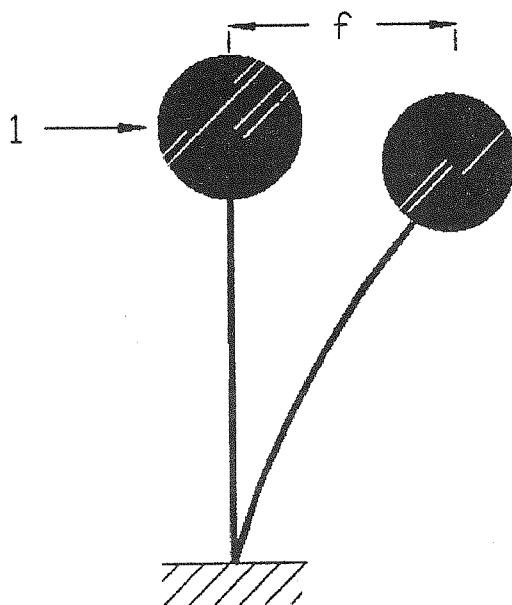
شود از رابطه زیر به دست می آید:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P}{gk}} \quad (1-2)$$

که در آن: $P =$ وزن جسم نوسان کننده

$$K = \frac{1}{f}$$

$f =$ تغییر مکان انتهای طره ناشی از اعمال بار واحد در انتهای آن



شکل (۳-۱) مدل یک درجه آزاد (S.D.f.)

ب- زمان تناوب اصلی نوسان جرم متمرکز در انتهای طره لاغر با مقطع یکنواخت در صورتی که از جرم طره صرف نظر شود از رابطه زیر به دست می آید:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P' \cdot L^3}{g \cdot 3EI}} \quad (2-2)$$

$$P' = P + 0.235 qL \quad (3-2)$$

که در آن

$P =$ وزن جرم متمرکز

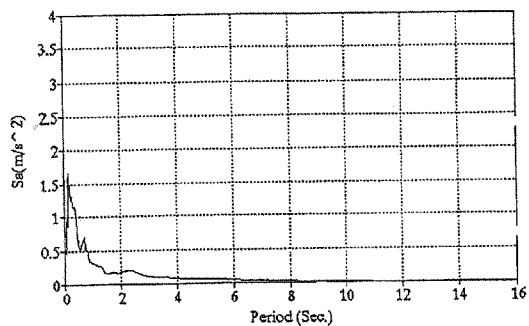
$q =$ وزن واحد طول طره

$L =$ طول طره

$g =$ شتاب ثقل

$E =$ مدول ارتجاعی

$I =$ ممان اینرسی مقطع



شکل (۲-۱۴) طیف طرح آب بر (D=5%)

در آنالیز سیستم به روش شبه دینامیکی (طیفی) نیز از طیف های حاصل از زلزله های طبس، ناغان، آب برو همچنین طیف بازتاب آیین نامه ۲۸۰۰ استفاده گردید. شکل های (۲-۱۲) الی (۲-۱۴) نمودار مربوط به این طیف ها را نمایش می دهد.

بنابر این آنالیز سیستم در هر یک از وضعیت های مختلف مخزن با استفاده از روش های معادل استاتیکی، طیفی (با چهار طیف طرح) و دینامیکی (با سه شتابنگاشت) انجام پذیرفته و نتایج حاصل از هشت آنالیز برای هر یک از وضعیت های مخزن، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۳- نتیجه گیری و پیشنهادات

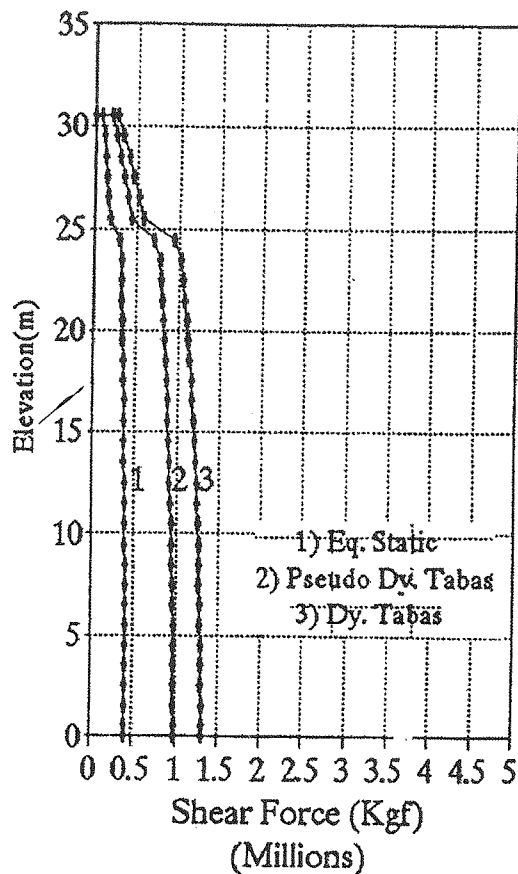
۳-۱- مقدمه

از مقایساتی که بین نتایج حاصل از روش های مختلف تحلیلی در وضعیت های مختلف مخزن صورت پذیرفته، نتایج زیر حاصل گردیده که به طور خلاصه در چند بخش به شرح زیر ارائه می گردد.

۳-۲- مقایسه پریودهای حاصل از روابط تجربی و دینامیکی

نیرویی که براساس آن یک برج آب (Water Tower) طراحی می گردد. بستگی فراوانی به زمان تناوب آن دارد و از همین رو محاسبه دقیق پریود این سازه ها برای طراحی آنها از اهمیت خاص برخوردار است. در آیین نامه زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰) زمان تناوب اصلی نوسان سازه هایی با عملکرد مشابه پاندولهای وارونه در دو حالت بدین شکل مطرح شده است:

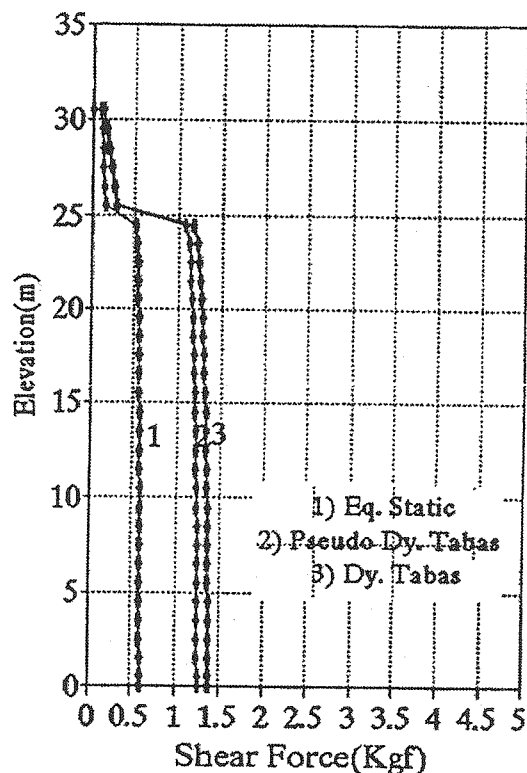
الف- زمان تناوب اصلی نوسان جرم متمرکز واقع در انتهای طره لاغر در صورتی که از جرم طره صرف نظر



شکل (۳-۳) توزیع نیروی برش پایه در حالت «مخزن خالی»

همانطور که در گرافها ملاحظه می‌گردد نتایج حاصل از روش معادل استاتیکی بسیار نازل تر از نتایج حاصل از آنالیزهای شبه دینامیکی و دینامیکی بوده است. این بدان علت است که ضوابط و محدودیت‌هایی که در آیین‌نامه برای مخازن بتنی هوایی در نظر گرفته شده همانند یک سازه بتنی معمولی با قاب‌های فضایی خمشی است. و این در حالی است که مخازن بتنی هوایی آب دارای ظرفیت جذب انرژی کمتر و شکل‌پذیری (Ductility) ضعیف‌تری هستند. از این رو در اکثر آئین‌نامه‌های معتبر دنیا از فاکتور کارایی (Performance Factor)، که مقداری در حدود $2/8$ تا $4/5$ مرتبه بزرگتر و بیشتر از فاکتور کارایی سازه‌های با قاب‌های خمشی بتنی دارد، برای مخازن بتنی آب در نظر گرفته‌اند. در جدول (۱-۳) مقایسه‌ای میان مقادیر ضریب کارایی برای مخازن بتنی آب و سازه‌های با قاب‌های مقاوم خمشی در چند آیین‌نامه معتبر صورت گرفته است.

از طرفی دیدیم که فشارهای هیدرو دینامیک پدید آمده در یک مخزن را می‌توان به دو قسمت فشارهای ضربه‌ای و نوسانی تقسیم کرد. جرم معادل فشارهای ضربه‌ای پریودی برابر با پریود ارتعاشی مخزن داشته، اما جرم معادل فشارهای نوسانی پریودی به مراتب بزرگتر از پریود مخزن را دارا می‌باشند. این ماهیت دوگانه موجود در فشارهای هیدرو دینامیک باعث می‌گردد تا روابط تجربی تخمین پریود که براساس مدل‌های یک درجه آزاد (Single Degree of Freedom) برقرار گردیده‌اند (مانند روابط (۱-۲) و (۲-۳)) تقریب مناسبی را برای پریود سیستم به ویژه در زمان‌هایی که مخزن کاملاً پر و یا کاملاً خالی نمی‌باشد، ارائه نمایند. ۳-۲- مقایسه نیروهای برش پایه ایجاد می‌گردد در شکل‌های (۲-۲) و (۳-۲) توزیع نیروی برش پایه اعمالی بر سیستم و اساس نتایج حاصل از آنالیزهای دینامیکی و شبه دینامیکی طیس و آنالیز معادل استاتیکی در حالت‌های مخزن پر و مخزن خالی ملاحظه می‌گردد. توزیع نیرو نموداری سهموی داشته و از بالا به پایین میزان نیروی اعمالی بر سیستم افزایش می‌یابد تا به مقدار ماکزیمم خود در پای مخزن برسد.

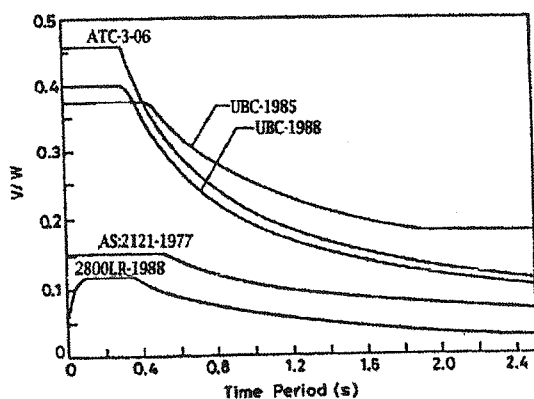


شکل (۲-۳) توزیع نیروی برش پایه در حالت «مخزن پر»

جدول (۳-۱) مقایسه ضریب کارایی استفاده شده در چند آیین نامه معتبر

$\frac{K_{rank}}{K_{str}}$	ضریب کارایی یا مقدار مشابه	شرح سازه	آیین نامه
3.73	0.67	سازه‌های با قاب‌های مقاوم خمشی	UBC 1985
	2.5	مخازن بتنی هوایی	SEAOC
4.0	1/12	قاب‌های مقاوم خمشی بتنی	UBC 1988
	1/3	مخازن، دودکش‌ها و سازه‌های مشابه	
2.80	1/7	قاب‌های مقاوم خمشی بتنی	ATC - 3 - 06
	1/2.5	سازه‌های مشابه پاندول وارونه	
3.73	0.67	قاب‌های مقاوم خمشی بتنی	A. S. 2121-1979 (استرالیا)
	2.5	مخازن هوایی	
4.29	0.7	قاب‌های مقاوم خمشی بتنی	N. B. C - 1980 (کانادا)
	3.00	مخازن بتنی هوایی	
1	1.00	قاب‌های مقاوم خمشی بتنی	IS . 1984 1800 IRAN - 1988
	-	مخازن بتنی هوایی	

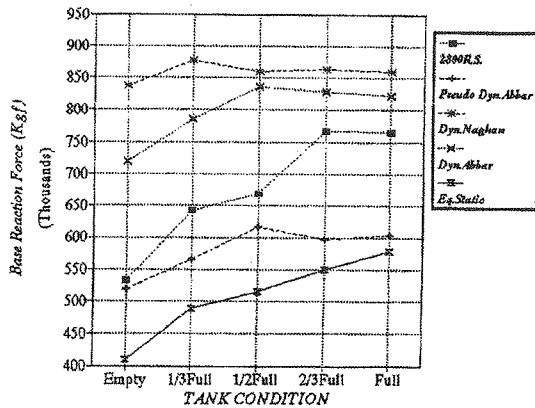
ضریب کارایی برای مخازن بتنی هوایی افزایش یابد. طبق نتایجی که در این تحقیق به دست آمد و با توجه به اهمیت سلامت این سازه‌ها و حفظ کارایی آنها پس از وقوع زلزله، مقدار این ضریب برای مخازن بتنی هوایی "K=3" پیشنهاد می‌گردد.



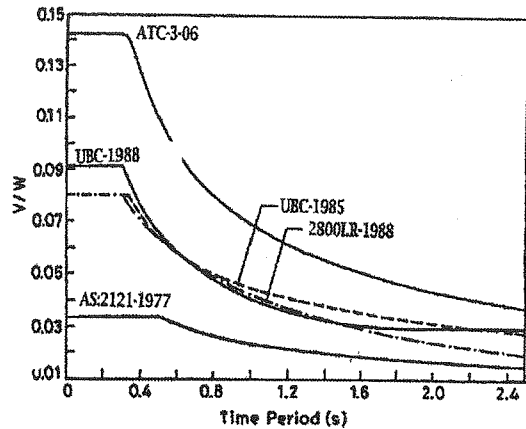
شکل (۳-۴) ضریب نیروی جانبی برای مخازن بتنی هوایی

در شکل (۳-۴) دیاگرامی از نسبت نیروی جانبی به وزن مخزن و محتویاتش برحسب پریود با فرض منطقه با خطر نسبی بالا و خاک سخت (Hard Soil) برای چند آیین نامه ترسیم شده است. در شکل (۳-۵) نیز دیاگرام مشابهی برای ساختمان‌های معمولی با سیستم قاب فضایی خمشی ترسیم شده است. همانطور که از این دیاگرام‌ها بر می‌آید مقدار ضریب نیروی جانبی برای مخازن بتنی هوایی در آیین نامه ایران بسیار پایین‌تر از این سطح در سایر آیین نامه‌ها می‌باشد. اما از طرف دیگر میزان نیروی جانبی که برای سازه‌های با قاب‌های خمشی بتنی در نظر گرفته شده، تفاوت چندانی با آیین نامه‌های دیگر ندارد، و این بدان معناست که پایین‌تر بودن سطح ضریب زلزله برای مخازن در آیین نامه ایران به خاطر پایین بودن احتمال وقوع زلزله (Seismic Risk) نیست بلکه دلیل آن عدم توجه به ضعف کارایی مخازن آب در مقایسه با سایر ساختمان‌ها است.

از این رو ضروری است که در آیین نامه ما نیز مقدار



شکل (۳-۶) پاسخ سیستم در وضعیت های مختلف مخزن



شکل (۳-۵) ضریب نیروی جانبی برای سازه های با قاب های خمشی بتنی

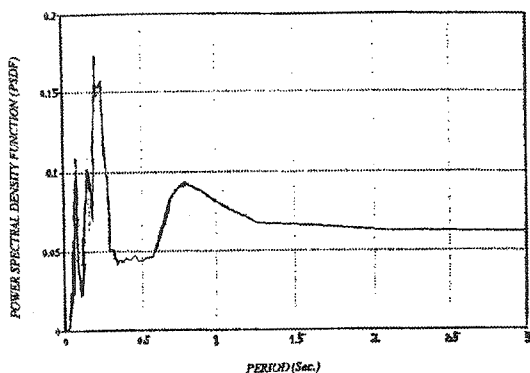
۳-۶. اثر محتوای فرکانسی شتابنگاشت های اعمالی به پاسخ سیستم

موضوع دیگری که در این بررسی ها جلب توجه نمود، این بود که عکس العمل ها و تغییر مکان های سیستم در آنالیزهای طیفی و دینامیکی با استفاده از طیف و شتابنگاشت های زلزله طبس مقادیر بزرگتری را نسبت به نتایج حاصله از طیف ها و شتابنگاشت های آب بر و ناغان بوجود می آورد در صورتی که هر سه زلزله از شدت و بزرگای تقریباً نزدیکی برخوردار می باشند. در نتیجه برای بررسی بیشتر این مسئله با استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT) و به دست آوردن تابع چگالی طیفی توان (Power Spectral Density Function) (PSDF) اشکال (۲-۷) تا (۳-۹)، محتوای فرکانسی این شتابنگاشت ها را با توجه به فرکانس مودهای اصلی سیستم مورد بررسی قرار دادیم:

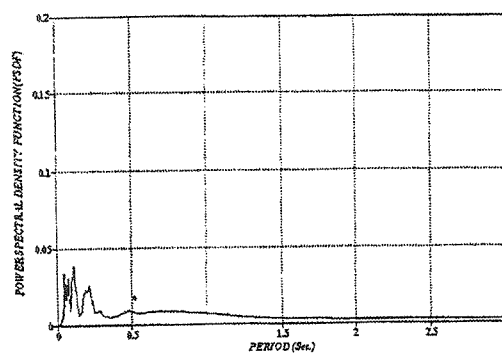
نتیجه این بررسی نشان داد که سازه مورد مطالعه با توجه به محتوای فرکانسی زلزله طبس در محدوده بزرگتر و وسیع تری از جذب انرژی نسبت به دو زلزله دیگر قرار داشته و در نتیجه عکس العمل ها و تغییر مکان های بزرگتری را نیز تحت تأثیر زلزله طبس از خود نشان می دهد. لذا پیشنهاد می گردد که با توجه به اهمیت و حساسیت این سازه ها، با بهره گیری از تابع چگالی طیفی توان فرکانس هایی را که در آن بیشترین انرژی زلزله وجود دارد را به دست آورده و حتی المقدور سعی گردد تا مشخصات سازه طوری تعیین شود تا فرکانس طبیعی آن خارج از این محدوده قرار گیرد.

۳-۵. بررسی پاسخ بیشینه سیستم در وضعیت های مختلف مخزن

پاسخ بیشینه در سازه هایی همانند مخازن هوایی که بسته به وضعیت آب درون مخزن پرودی نااثبات دارند، الزاماً مربوط به حالت مخزن پر که بالاترین پرودی را در سازه ایجاد می نماید، نمی باشد. بلکه بسته به ماهیت و محتوای فرکانسی (Frequency Content) زمین لرزه، وضعیتی از سیستم می تواند پاسخ بیشینه را ایجاد نماید که فرکانس مودهای حاکم آن در محدوده فرکانسی زمین لرزه اعمال شده قرار گرفته و حالت تشدید (Amplification) را در سیستم ایجاد نماید. از سوی دیگر عامل اندرکنش آب و سازه و فشارهای هیدرو دینامیک و تلاطم (Solshing) پدید آمده در مخزن نیز عامل دیگری است که می تواند باعث گردد تا پاسخ بیشینه سیستم در وضعیتی غیر از وضعیت مخزن کاملاً پر رخ دهد. این مطلب به خوبی در شکل (۳-۶) که پاسخ های به دست آمده در تعدادی از آنالیزهای طیفی و دینامیکی انجام گرفته در وضعیت های مختلف مخزن را نمایش می دهد، مشاهده می گردد. لذا منطقی است که با توجه به اهمیت سلامت این سازه ها آنالیز سیستم در چند وضعیت مختلف تراز آب مخزن انجام شده و طراحی براساس وضعیتی که پاسخ بیشینه را در سازه ایجاد می نماید، انجام پذیرد.



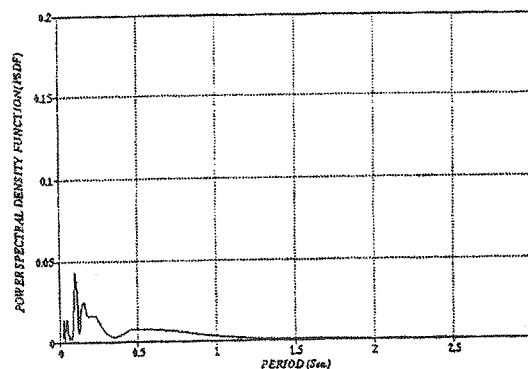
شکل (۳ - ۹) تابع چگالی طیفی توان طیس



شکل (۳ - ۷) تابع چگالی طیفی توان آب بر

تشکر و قدردانی

مؤلفین تشکر و قدردانی خود را نسبت به مسئولین و کارکنان محترم مؤسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله که با همکاری های همه جانبه خویش زمینه انجام این تحقیق را فراهم آوردند ابراز می نمایند.



شکل (۳ - ۸) تابع چگالی طیفی توان ناغان

مراجع

- [1] G.W. Housner, "Dynamic Pressure on Accelerated fluid containers" B.S.S.A. Vol.53, PP 15-35 (1963).
- [2] H.N. Abramson, "The Dynamic behavior of liquids in moving containers" Nasa Report Sp. 106, 1966.
- [3] S.A. Kalnin, "Free vibration of rotationally Symmetric shells" B.S.S. A. PP 1355-1365, 1964.
- [4] S.K. Jain & M.S. Medhekar, "Proposed Provisions for a seismic design of liquid storage tanks", Part (I) Provision & part (II) commentary Journal of Structural Engineering Vol 20, No, 3, PP119-128, Oct. 1993.
- [5] S. K. Jain & S. U. Sammer, "A Review of Requirments in indian codes for a seismic design of elevated tanks "Bridge & structural Engineer Vol XXIII, No. 1, March 1993.