

# ارزیابی رفتار لرزه‌ای مخازن فروسیمانی آب هوایی با استفاده از آزمایشهای ارتعاشات محیطی

حمزه شکیب \*

بخش عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مقاله: ۱۳۷۶/۳/۲۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۷۶/۹/۲۳)

چکیده - در این تحقیق یک سری آزمایشهای ارتعاشات محیطی بر روی یک مخزن سه تایی فروسیمانی با حجم ۱۵۰ مترمکعب انجام گرفته است. آرایشهای مختلفی از حس‌کننده‌ها برای بررسی خصوصیات دینامیکی در حالت‌های پر، نیمه پر، یک مخزن پر (خروج از مرکزیت جرمی) انتخاب شده است. تأثیرات چرخش پایه نیز در این آزمایشها مورد توجه قرار گرفته اند. فرکانسهای طبیعی و شکل مودهای حاصل از آزمایش با نتایج مدل اجزای محدود سازه مقایسه شده و به منظور بررسی آثار فرضیات مختلف بر نیروهای طراحی، مدل ریاضی اصلاح شده مورد تحلیل طیفی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که چرخش پایه، موجب تغییر نیروهای طراحی به خصوص در نزدیکی پایه می‌شود.

## Evaluation of Seismic Behaviour of Ferrocement Elevated Water Tanks by Using Ambient Vibrations Tests

H. Shakib

Department of Civil Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran

**ABSTRACT-** In this study a series of ambient vibration tests on the triple ferrocement elevated water tanks with 150 cubic meters volume, is carried out. In order to verify the dynamic characteristics of full, half-full and one full tanks (mass eccentric system), the different arrangements of sensors are used. The effects of base rotation are also considered in the tests. Natural frequencies and mode shapes obtained from tests are compared to the mathematical model of the tanks using finite element method. In order to verify the effect of different assumptions on the design forces, the revised mathematical model is analyzed by spectral method. The results indicate that base rotation causes the change of design forces especially in the vicinity of the base of system.

\* استادیار

اکثر مخازن هوایی از تأسیسات ضروری شهری محسوب می‌شوند بدین معنا که باید کاربری خود را حتی بعد از یک زلزله نسبتاً شدید، به منظور تأمین نیازهای آبرسانی و اطفای حریق حفظ کنند. روشهای متداول طراحی این مخازن بر اساس فرضیات متعددی استوار است که از آن جمله می‌توان به مدل مکانیکی اندرکنش آب و مخزن، فرض عدم چرخش پایه و فرضیات مربوط به ضریب کشسانی مصالح اشاره کرد که ممکن است با سیستم موجود تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. به همین دلیل در تعیین خصوصیات دینامیکی این سازه‌ها اغلب لازم است که علاوه بر مطالعات نظری، آزمایشهای تجربی نیز صورت گیرد.

برای طراحی یک سازه مقاوم در مقابل زلزله، شناخت دو عامل از اهمیت زیادی برخوردار است که عبارت‌اند از: مشخصات نیروی زلزله و خصوصیات دینامیکی سیستم سازه‌ای. خصوصیات نیروی زلزله با محتوای فرکانسی، شتاب بیشینه و مدت زلزله معرفی می‌شود. برای تخمین خصوصیات دینامیکی سازه در مراحل طراحی، معمولاً از تحلیل مدل‌های اجزای محدود استفاده می‌شود. در روشهای مرسوم تحلیل مخازن هوایی، چند مشکل عمده وجود دارد. به عنوان نمونه، مدل اندرکنش دینامیکی مخزن و سیال داخل آن بر پایه فرضیات ساده‌کننده متعددی استوار است که ممکن است در عمل با رفتار سازه واقعی متفاوت باشد. تخمین صحیح ضریب کشسانی مصالح نیز عاملی است که مستقیماً بر نتایج حاصله تأثیر می‌گذارد. در ضمن رفتار اعضا، اتصالات و در نهایت کل سیستم به عنوان یک مجموعه همیشه به سادگی شناخته شده نیست. عامل مهم دیگری که اغلب می‌تواند بر پاسخ سیستم تأثیر داشته باشد، اندرکنش خاک و شالوده و چرخش پایه است و این در حالتی است که در بیشتر موارد فرض می‌شود که پایه با اتصال صلب به زمین متصل شده است. روشهای متداول طراحی که آیین نامه‌ها و استانداردها توصیه می‌کنند نیز پیچیدگیهای مربوط به اشکال مختلف هندسی پایه‌ها و مخازن و سایر عوامل مؤثر را به طور کامل در بر نمی‌گیرند. به همین دلیل در تعیین خصوصیات دینامیکی این سازه‌ها، علاوه بر مطالعات نظری لازم است آزمایشهای تجربی نیز صورت گیرد. تعیین پارامترهای دینامیکی از طریق آزمایش، تشخیص سیستم دینامیکی سازه را امکانپذیر می‌سازد. با تعیین

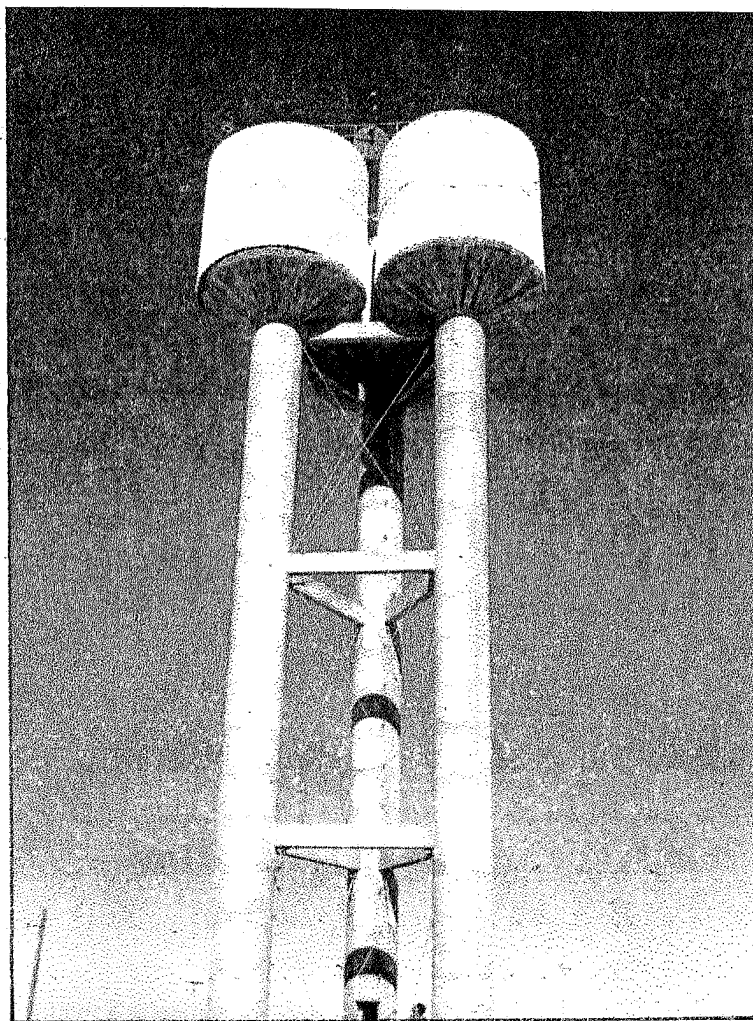
مستقیم این خصوصیات دینامیکی توسط آزمایش بر روی سازه واقعی و مقایسه با نتایج تحلیلی می‌توان به میزان دقت نتایج نظری پی برد و در مورد قابل قبول بودن آنها قضاوت کرد و احیاناً اصلاحات لازم را در مدل‌های تحلیلی برای وصول به نتایج دقیقتر اعمال کرد. در اواسط دهه ۱۹۵۰، هاوسنر تحقیقات گسترده‌ای در مورد پاسخ دینامیکی مخازن انجام داد. او در بررسی اولیه، مخزن را صلب فرض کرد و فقط پاسخ سیال داخل آن را مد نظر قرار داد. بدین ترتیب، مقادیر تقریبی فرکانس نوسان سیال و فشار هیدرو دینامیکی ناشی از آن را برای مخازن استوانه‌ای و مستطیلی به دست آورد [۱] و [۲]. ولتسوس روش ساده‌ای برای تخمین نیروهای هیدرو دینامیک در مخازن با جداره انعطاف پذیر ارائه داد. او توانست با استفاده از یک مختصه تعمیم یافته و مبتنی بر روش رایله، اولین مود ارتعاشی مخزن انعطاف پذیر را در فرمولبندی ملحوظ کند. او فرض کرد که شکل مود به نحوی باشد که پایستترین فرکانس نوسان حاصل شود و فرمولهایی برای محاسبه توزیع فشار هیدرو دینامیکی، برش پایه و لنگر واژگونی ارائه داد. اهمیت انعطاف پذیری مخزن به وضوح در مطالعات وی مشخص شده است [۳]. دوج و کانا نشان دادند که با در نظر گرفتن انعطاف پذیری مخزن نیروی ضربه‌ای وارد از طرف سیال به مراتب بیشتر از حالت صلب است [۴]. چن و باربر نیز با محاسبه فشار هیدرو دینامیک ضربه‌ای وارد بر جدار مخزن نشان دادند که این اختلاف حدود ۱۵٪ است [۵]. هارون حالت کلی رفتار دینامیکی مخازن ذخیره مایع را بررسی کرد. در فاز اول مطالعات، او نوسان مخزن را با استفاده از یک ترکیب مؤثر از روش اجزای محدود و تکنیک اجزای مرزی مطالعه کرد [۶]. مولر نیز با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان و با تعریف تغییر مکان بیشینه انتهای ستون به عنوان معیار خرابی، منحنیهای طراحی برای ظرفیتهای مختلف، هوایی با ستون استوانه‌ای تکی ترسیم کرد و روشی گام به گام برای طراحی این سازه با عمر مفید ۵۰ سال به دست آورد [۷]. هارون و تماراز اثر اندرکنش خاک - سازه را در پاسخ مخازن هوایی تحت نیروی زلزله بررسی کردند. آنها با معرفی سرعت موج برشی برای تعیین خصوصیات خاک در یک مدل دو بعدی، تغییر مکانها و نیروهای انتهای اعضا را در حالت استاتیک و دینامیک به دست آوردند و نتیجه گیری کردند که اندرکنش خاک و سازه نیروهای انتهای اعضا را، به خصوص در نزدیکی پایه، کاهش

## ۲- سیستم سازه‌ای

مخزن آب هوایی ۱۵۰ متر مکعبی مورد آزمایش به ارتفاع کل ۲۵/۴ متر، از سه مخزن استوانه‌ای به ظرفیت تقریبی ۵۰ متر مکعب تشکیل شده است. قطر داخلی هر یک از این مخازن ۴/۱۵ متر و ارتفاع آنها تقریباً ۵/۴ متر است. جداره و سقف این مخازن استوانه‌ای از جنس فروسیمان به ضخامت کل ۱۰ سانتیمتر است که از یک جدار عایق اسفنجی به ضخامت ۳/۵ سانتیمتر و یک جدار فروسیمانی به ضخامت ۶/۵ سانتیمتر تشکیل شده است. جدار عایق که در لایه خارجی با ورق دوزنقه‌ای گالوانیزه محافظت می‌شود، در هنگام اجرا به عنوان قالب عمل می‌کند و یک لایه شبکه از آرماتور نمرة ۸ به فواصل ۱۵ سانتیمتر در هر جهت به همراه یک شبکه تور سیمی بافته شده، فولادهای مورد نیاز آن را تشکیل می‌دهند. این شبکه از داخل مخزن با ملات ماسه سیمان با عیار بالا پر می‌شود و در نتیجه ترکیبی از بتن با درصد فولاد زیاد و مقاومت کششی بالا به دست می‌آید که در تکنولوژی بتن به فروسیمان<sup>۱</sup> معروف است. کف این مخازن به صورت یک مخروط ناقص بتن آرمه اجرا شده که استوانه را به ستونهای مخزن مرتبط می‌کند. هر یک از این سه مخزن بر روی یک پایه استوانه‌ای بتن آرمه توخالی به ارتفاع ۲۰ متر و قطر داخلی ۱ متر و ضخامت جداره ۱۵ سانتیمتر قرار دارند. مرکز این سه استوانه بر روی رئوس مثلث متساوی الاضلاعی به اضلاع ۴/۸ متر منطبق است. این ستونها در سطح زمین بر روی یک شالوده گسترده بتنی به ضخامت ۳۰ سانتیمتر قرار می‌گیرند که در زیر شالوده در امتداد ستونها سه شمع به عمق ۹ متر در زمین مدفون شده‌اند. ابعاد شمعه‌ها و شکل آنها مشابه ستونهاست. این ستونها در فواصل تقریباً ۶/۵ متر در ارتفاع، توسط سه تیر بتنی افقی به ارتفاع ۵۰ و عرض ۲۰ سانتیمتر در هر تراز به هم متصل شده‌اند. این سیستم تیرها روی شالوده نیز به کار گرفته شده است. برای دسترسی به بالای مخزن، بازشویی به ابعاد ۱/۵×۰/۶ متر در یکی از ستونها تعبیه شده است که از طریق نردبانی در داخل این ستون می‌توان به سقف مخزن دسترسی پیدا کرد. در سقف مخزن، پیاده رویی توسط یک شبکه آرماتور ساخته شده که در حالت عادی تنها قسمت قابل دسترسی در ارتفاع است. این سیستم توسط کابل‌هایی به قطر ۱۶ میلیمتر به صورت ضربدری در دهانه‌هایی که توسط تیرهای افقی پدید آمده، مهاربندی شده است. نمای این مخزن در شکل ۱ نشان داده شده است.

می‌دهد [۸]. هارون و هاوسنر مسئله اندرکنش آب و سازه را در مخازن استوانه‌ای زمینی با استفاده از یک مدل اجزای محدود برای مخزن و یک تابع تحلیلی برای سیال مورد بررسی قرار دادند. برای ارزیابی نتایج، فرکانسها و شکل مودهای تحلیلی با نتایج آزمایشهای ارتعاشی یک مخزن واقعی مقایسه شدند تا قابلیت اطمینان تحلیلهای مشخص شود [۹]. هارون و هاوسنر در مطالعه دیگری آزمایشهای بر روی مخازن زمینی استوانه‌ای انجام دادند و نتیجه گرفتند که تغییر شکل خاک، موجب کاهش فرکانس طبیعی مخازن می‌شود و با افزایش سرعت موج برشی، فرکانس طبیعی به مقدار به دست آمده توسط فرض صلبیت فونداسیون نزدیک می‌شود [۱۰]. بنوسکا و دیگر همکاران او از شرکت کینمتریکس آزمایشهای ارتعاش محیطی را بر روی دودکشهایی بتنی به ارتفاع ۲۴۲ متر انجام داده‌اند. فرضیات مقطع متغیر، چرخش فونداسیون در مقایسه با مدل اجزای محدود بررسی شد و نتیجه گرفته شد که استفاده از مقطع متغیر و سختی چرخشی برای فونداسیون بین نتایج آزمایش و تحلیل توافق مناسبی نشان می‌دهد. این تحلیلها با ۲۰ درصد افزایش ضریب کشسانی نسبت به مقدار به دست آمده از رابطه ACI318 انجام شدند تا اثرات سرعت بارگذاری دینامیکی ملحوظ شود. [۱۱]. از این آزمایشها در بررسی خصوصیات دینامیکی سازه‌های بلند [۱۲] انواع پلها [۱۳ و ۱۴] و سدها [۱۵] به کرات استفاده شده است. با نگرشی تحلیلی به کارهای انجام شده، انجام مطالعه‌ای با اهداف زیر می‌تواند تصویر روشنی از رفتار لرزه‌ای سیستم مخزن را به نمایش بگذارد:

تعیین فرکانسها و شکل مودها، حالات مختلف مخزن با استفاده از آزمایشهای ارتعاشهای محیطی و مقایسه با مدل ریاضی؛ اندازه‌گیری درصد میرایی سازه واقعی در مود اول جانبی؛ اندازه‌گیری درصد مشارکت چرخش پایه در اثر تغییر شکلهای خاک و تعیین سرعت موج برشی در محل؛ تعیین میزان سهم عوامل مختلف نظیر ضریب کشسانی، چرخش پایه و مدل اندرکنش آب و سازه در اختلاف موجود بین فرکانسهای طبیعی سازه واقعی و مدل ریاضی و اصلاح و بهبود مدل؛ مقایسه و بررسی اثر تغییر عوامل فوق الذکر بر نیروهای طراحی حاصل از تحلیل طیفی.



مخزن آب هوایی احداث شده

### ۳- آزمایشهای میدانی

روش انجام ارتعاشات محیطی مبتنی بر ثبت ارتعاشات ناشی از عوامل محیطی بر سازه است. بدین منظور باید از لرزه‌سنجها و دستگاههای نگارنده استفاده کرد. دستگاههای نگارنده و پارامترهای مربوط به آن توسط رایانه‌های قابل حمل در محل تنظیم می‌شوند و در نهایت ارتعاشات ثبت شده به صورت تاریخچه زمانی در فایل ذخیره شده و توسط نرم‌افزار قابل مشاهده و پردازش‌اند. این مجموعه، سیستم گردآوری اطلاعات<sup>۲</sup> نام می‌گیرد. به طور کلی، کمیت‌های شتاب و سرعت بنابر نوع لرزه‌سنج و اهداف آزمایش قابل ثبت‌اند. در این آزمایشها، از سیستم گردآوری اطلاعات OASIS-100 به همراه حس‌کننده FBA-II برای ثبت تاریخچه زمانی شتاب و از سیستم لرزه‌نگاری SSR-1 به همراه

حس‌کننده‌های SS-1 برای ثبت تاریخچه زمانی سرعت استفاده شده است. برای مطالعه خصوصیات دینامیکی مخزن مورد نظر، آزمایشهای ارتعاش محیطی برای دستیابی به چهار هدف عمده به شرح زیر، برنامه ریزی شد:

الف) اندازه‌گیری و ثبت همزمان دو مؤلفه افقی و یک مؤلفه قائم ارتعاشات در تراز سقف هر سه مخزن توسط هشت حس‌کننده شتاب برای دستیابی به فرکانسهای طبیعی و درصد میرایی مودهای جانبی و پیچشی سازه و مطالعه چگونگی رفتار هر یک از این سه مخزن نسبت به هم برای آشنایی با نحوه پاسخ این مجموعه به عنوان یک سیستم سازه‌ای در سه حالت مخزن خالی، پر و نیمه پر (شکل ۲- الف).

ب) اندازه‌گیری و ثبت همزمان مؤلفه های افقی ارتعاشات در

صحیح تمام حس کننده‌ها و کابل‌های رابط، کار آماده سازی محل نصب آنها، مطابق توضیحات قبلی، آغاز شد.

#### ۴- مدل اجزای محدود

روشهای تحلیلی که امروزه برای تخمین خصوصیات دینامیکی از آنها استفاده می‌شود بر پایه فرضیات ساده کننده استوار است. شناخت فرضیات مورد استفاده و آگاهی از میزان دقت آنها در طراحی صحیح سازه اهمیت زیادی دارد. به همین دلیل در این قسمت سعی شده است که با کمک نتایج حاصل از آزمایش، میزان خطای ناشی از فرضیات متفاوت ارزیابی شود و در نهایت از آنها برای دستیابی به یک مدل نزدیکتر به واقعیت استفاده شود.

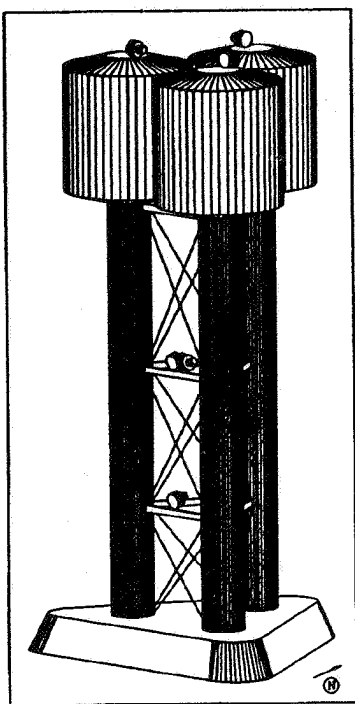
مدل تحلیلی این مخزن توسط برنامه SAP90 و با استفاده از اجزای پوسته چهارگره‌ای و سه گرهِای و اجزای قاب ایجاد شده و تحلیل مقادیر ویژه برای تعیین فرکانسهای طبیعی و شکل مودها و تحلیل دینامیکی طیفی برای یافتن تغییر مکانها و نیروها به کار گرفته شده است. فرضیات مدلسازی به قرار زیرند:

ستونها و جداره مخزن با اجزای پوسته غشایی خمشی مدل شده‌اند؛ مقطع دایره‌ای ستونها با توجه به محدودیت تعداد گرهِها و اجزا و با یک شش ضلعی منتظم تقریب زده شده است و ابعاد اجزا تقریباً  $0.5 \times 0.5$  متر مربع است؛ در محل اتصال ستونها به قسمت مخروطی مخازن از شبکه ریزتری استفاده شده و از اجزای سه گرهِای برای سازگاری در محل تقاطع استفاده شده است؛ تیرهای افقی با اتصال صلب به ستونها مربوط شده‌اند؛ اتصال ستونها به فونداسیون صلب فرض می‌شود (فرض اولیه)؛ مدول کشسانی مهاربندها برابر  $1.97 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$  فرض شده و کابلها فقط در کشش کار می‌کنند (کابل‌های فشاری حذف شده‌اند)؛ مدول کشسانی بتن مسلح بر اساس مقاومت استوانه‌ای مورد نیاز معادل  $210 \text{ Kg/cm}^2$  و با استفاده از رابطه  $f'_c = 1.51 \sqrt{E_c}$  مطابق ACI318-89 به دست آمده است (فرض اولیه)؛ مدول کشسانی فروسیمان با توجه به درصد ملات و فولاد به کار رفته در نقشه‌ها و خواص مکانیکی پیشنهاد شده در مرجع [۱۶]،  $E_c = 1.58 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$  است؛ ضریب پواسون بتن مسلح برابر  $\nu = 0.2$  و برای فروسیمان  $\nu = 0.185$  فرض شده است [۱۶]؛ جرم اعضا بر اساس جرم حجمی بتن مسلح برابر  $2400 \text{ kg/cm}^3$  و جرم

تراز سقف و در تراز تیرهای واسط افقی توسط هشت حس کننده شتاب برای دستیابی به فرکانسها و شکل مودهای جانبی و پیچشی سیستم در سه حالت مخزن خالی، پر و یک مخزن پر (شکل ۲-ب). مخازن و مؤلفه های قائم ارتعاش در تراز شالوده گسترده توسط شش حس کننده سرعت به منظور مطالعه و بررسی اثر دوران پایه بر رفتار دینامیکی سیستم و همچنین کشرل فرکانسهای طبیعی حاصله با نتایج به دست آمده در بندهای (الف) و (ب) درحالت مخازن خالی، پر و یک مخزن پر (شکل ۲-ج).

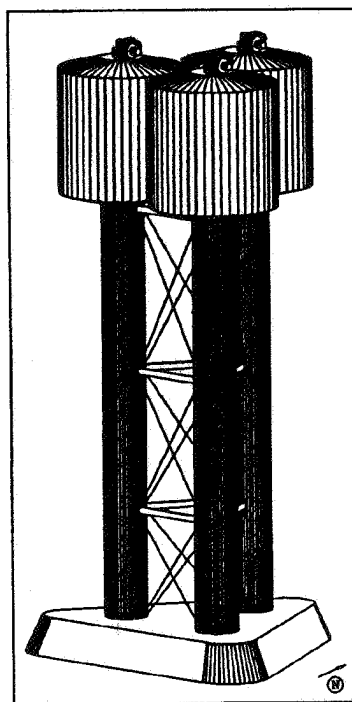
د) اندازه گیری و ثبت همزمان سه مؤلفه شمالی - جنوبی، شرقی - غربی و قائم دو نقطه یکی واقع بر شالوده سازه و دیگری بر روی زمین طبیعی اطراف به منظور مطالعه نحوه انتقال ارتعاشات خفیف زمین به سازه و تعیین سرعت موج برشی توسط شش حس کننده سرعت (شکل ۲-د).

مطابق توضیحات بالا و برای دستیابی به چهار هدف تعیین شده، آزمایشهای میدانی انجام شد. ابتدا وضعیت مخزن از لحاظ دسترسی به نقاط مورد نظر بررسی شد و مطابق امکانات موجود در منطقه، هماهنگیهای لازم برای تدارک ماشین آلات مورد نیاز صورت پذیرفت. سپس آرایش حس کننده‌ها و برنامه آزمایشها به نحوی تنظیم شد که جابه جایی حس کننده‌ها، با توجه به مشکلات موجود، به حداقل برسد. درکنار انجام این مقدمات، امتداد شمال جغرافیایی منطقه و برای باد غالب تعیین شد تا با قرارگیری حس کننده‌ها در راستای مذکور، بتوان حداکثر ارتعاشات ایجاد شده را دریافت کرد. جهت باد غالب زاویه‌ای تقریباً  $14^\circ$  درجه با محور شمال به سمت شرق داشت. به همین دلیل محور تقارن شمالی - جنوبی به عنوان جهت ارتعاشات غالب مورد توجه قرار گرفت. پس از آن اقدامات مربوط به نصب و راه اندازی دستگاههای اندازه گیری و اتصال حس کننده‌ها توسط کابل‌های رابط به آنها به اجرا در آمد، بدین ترتیب که هشت حس کننده شتاب FBA-11 به دستگاه هشت کاناله و از آن طریق به رایانه قابل حمل مربوط به سیستم ثبت ارتعاشات OASIS-100 متصل شد و سه حس کننده سرعت SS-1 به هر یک از دو دستگاه ثبت کننده SSR-1 مرتبط شد. برای مدرج سازی، حس کننده‌ها در یک ردیف کنار هم قرار گرفته و یک اندازه گیری آزمایشی از آنها تهیه شد و پس از اطمینان از عملکرد



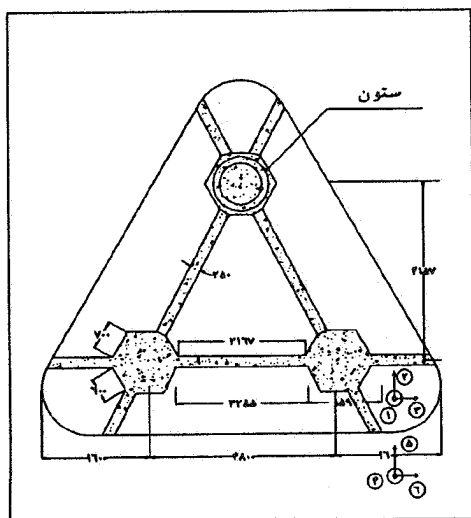
شکل ۲-ب

آرایش لرزه‌سنج‌های FBA-11 در آزمایش دوم



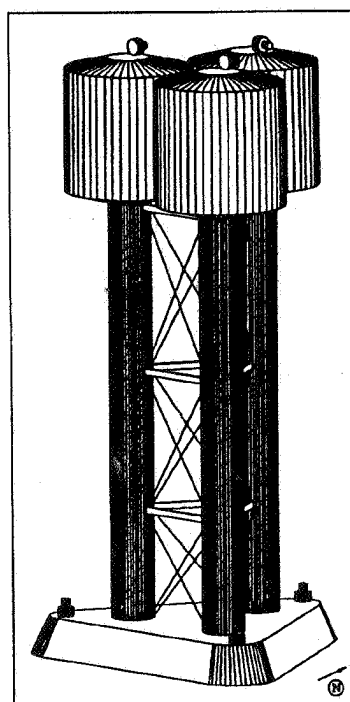
شکل ۲-الف

آرایش لرزه‌سنج‌های FBA-11 در آزمایش اول



شکل ۲-د

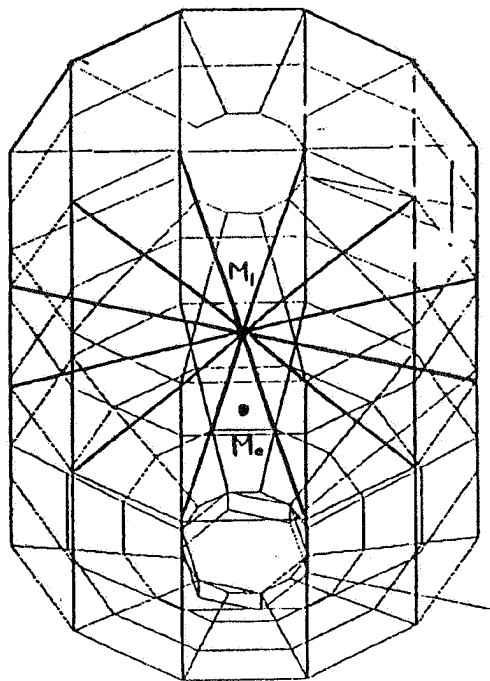
پلان آرایش لرزه‌سنج‌های SS-11 در آزمایش چهارم



شکل ۲-ج

آرایش لرزه‌سنج‌های SS-11 در آزمایش سوم

شکل ۲-آرایش متفاوت لرزه‌سنج‌ها



شکل ۳- مدل مکانیکی هاوسنر اصلاح شده

مقادیر پارامترهای به دست آمده از دو مدل فرض شده برای سیال، بر روی مدل سازه قرار می‌گیرند. بدین ترتیب که جرمهای سیال ( $m_0, m_1$ ) به صورت جرم نقطه‌ای در ترازهای به دست آمده ( $H_0, H_1$ ) معرفی شده‌اند و نسبت به پایینترین نقطه کف مخزن محاسبه شده‌اند. جرم سخت که همراه جداره مخزن حرکت می‌کند، به گره‌های هم‌تراز خود در جداره مخزن مقید شده و جرم مواج توسط ۱۲ فنر متشابه که برابند آنها در تمام جهات ضریب فنریت  $K$  را تأمین می‌کند، به ۱۲ گره متناظر در تراز  $H_1$  بسته شده‌اند (شکل ۳). چون هدف تنها بررسی مودهای جانبی است، حرکت جرمها در جهت قائم مقید شده است. در مدل هارون علاوه بر جرم انتقالی، ممان اینرسی جرمی نیز خواهیم داشت که مقادیر آن حول محورهای افقی  $x$  و  $y$  در جرم متمرکز  $m_0$  منظور شده است.

در ضمن لازم به ذکر است که روابط مربوط به مدل سیال درون مخزن برای مخازن استوانه‌ای با کف تخت به دست آمده‌اند که با توجه به مخروطی بودن کف این مخازن، باید مقداری تقریب در مدل‌های فوق‌الذکر را پذیرفت. ضمناً جرم سیال مخزنی که آدم رو از داخل آن عبور می‌کند، از دو مخزن دیگر کمتر است که مورد توجه قرار گرفته است. مقادیر محاسبه شده پارامترهای دو مدل مورد

حجمی فروسیمان برابر  $2100 \text{ kg/cm}^3$  در برنامه معرفی شد و وزن قالبها و عایق‌بندی با افزایش این عدد در نظر گرفته شده است؛ ابعاد و اندازه‌های مدل بر اساس نقشه‌های اجرایی است که تا حد امکان با سازه اجرا شده کنترل و در صورت لزوم اصلاح شده است؛ بازشوی پای ستون مطابق ابعاد اندازه‌گیری شده در محل منظور شده است. مدل اندرکنش آب و سازه با استفاده از نتایج تحقیقات هاوسنر و هارون برای مخازن استوانه‌ای و با فرض جداره کشسانی [۱۰] در نظر گرفته شده است. بنابر کارهای انجام شده در مرجع [۷] در صورتی که نسبت ضخامت جداره به شعاع  $0/04$  کمتر باشد، باید جداره را انعطاف پذیر فرض کرد. پارامترهای مدل مکانیکی سیال و سازه بر اساس توضیحات مرجع [۱۷] به صورتهای مختلفی قابل تعیین‌اند. یکی از این روشها، تعیین پارامترها در یک مخزن با جداره صلب و قرار دادن آنها بر روی جداره انعطاف پذیر مخزن است. کالینیز [۱۸] جزئیات این روش را بیان کرده و مدل هارون بر این اساس انتخاب شده است. روش دیگر، استفاده از روابط اصلاح شده هاوسنر است که در آن اثر مودهای الاستیک جداره نیز در نظر گرفته می‌شود. در قسمتهای بعدی، مخزن با هر دو روش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

جدول ۱- مقایسه پارامترهای مدل‌های مکانیکی مفروض برای یک مخزن پر

| مدل هارون                               | مدل هاوسنر                              |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| $m = 51/0 \text{ ton}$                  | $m_0 = 51/0 \text{ ton}$                |
| $m_0 = 33/77 \text{ ton}$               | $m_0 = 37/9 \text{ ton}$                |
| $m_1 = 13/08 \text{ ton}$               | $m_1 = 13/1 \text{ ton}$                |
| $H_0 = 1/376 \text{ m}$                 | $H_0 = 1/416 \text{ m}$                 |
| $H_1 = 2/622 \text{ m}$                 | $H_1 = 2/488 \text{ m}$                 |
| $\omega_1 = 8/6695 \text{ N/kg.m}$      | $\omega_1 = 8/6695 \text{ N/kg.m}$      |
| $f_{\text{sloshing}} = 0/47 \text{ Hz}$ | $f_{\text{sloshing}} = 0/47 \text{ Hz}$ |
| $K = 11/56 \text{ N/m}$                 | $K = 11/58 \text{ N/m}$                 |
| $I_0 = 0$                               | $I_0 = 146 \text{ t.m}^2$               |

بررسی برای مقایسه در جدول ۱ آمده است.

نتایج حاصل از آزمایش و مقایسه آنها با تحلیل‌های مختلف در جدول‌های ۲ تا ۶ آمده است.

با استفاده از روش نیم توان، درصد میرایی مربوط به مود اول جانبی در حالات فوق حدود ۵ درصد میرایی بحرانی به دست آمده است. با مشاهده مقادیر فرکانسهای طبیعی حاصل از آزمایش در حالات مختلف و مقایسه آنها با هم، موارد زیر قابل نتیجه گیری است:

- مقادیر فرکانس طبیعی مود اول درحالات مختلف حدود ۳۷ درصد با هم اختلاف دارند که تابع میزان آب موجود در مخازن است.  
- فرکانس طبیعی مود اول پیچشی درحالت پر حدود ۳۹ درصد کمتر از حالت خالی است. این اختلاف با حالت نیمه پر و یک مخزن پر به ترتیب ۲۴ و ۲۷ درصد است.

- اختلاف فرکانسهای طبیعی حالت پر و خالی در مودهای بالاتر کمتر می‌شود.

- فرکانس مود اول جانبی شمالی - جنوبی حدود ۴ درصد از فرکانس مود شرقی - غربی بیشتر است. به عبارت دیگر سختی سازه در جهت شمالی - جنوبی کمی بیشتر است که علت آن می‌تواند ناهمگونی در ساخت اعضای اتصالات و مهاربندیها باشد.  
- مقادیر فرکانسهای طبیعی در حالت یک مخزن پر (خروج از مرکزیت جرمی)، تقریباً مشابه حالت نیمه پر است ولی بر خلاف

## ۵- تجزیه و تحلیل نتایج

در این قسمت ضمن ارائه نتایج آزمایشها در حالات مختلف، مقایسه‌ای با مدل ریاضی انجام خواهد شد. نتایج آزمایش از پردازش اندازه‌های ۲۲ آزمون مختلف ثبت شده توسط حس‌کننده‌های شتاب و ۱۲ آزمون مربوط به حس‌کننده‌های سرعت و مجموعاً پردازش بالغ بر ۳۶۰ کانال حقیقی و مجازی به روش FFT به دست آمده است. بدین منظور، نرم افزارهای SWS، PEGASUS، PITSA مورد استفاده قرارگرفته اند. نتایج مدل ریاضی از تحلیل مقادیر ویژه به دست می‌آید.

برای تعیین میزان خطای ناشی از فرضیات مختلف مدل ریاضی و تفکیک آنها از یکدیگر، مدل در سه مرحله مورد تجدید نظر قرار گرفت. در تحلیل اول، پایه صلب و ضریب کشسانی مطابق ACI فرض شد. در تحلیل دوم، مدول کشسانی بتن به منظور در نظر گرفتن اثرات بارگذاری دینامیکی مطابق گزارش مطالعات تجربی بنوسکا و ماتسوموتو [۱۱] و مک هنری و شیدلر [۱۹] به میزان ۲۰ درصد افزایش یافته است. در تحلیل سوم، علاوه بر استفاده از E دینامیکی، سختی چرخشی با معرفی فنر در پایه ستونهای مخزن در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- مقایسه فرکانسهای طبیعی در حالت مخزن خالی بر حسب هرتز (اعداد داخل پراترز نسبت فرکانس تحلیل به فرکانسهای آزمایش در هر مود هستند)

| حالت   |         | مود جانبی |         |         | مود پیچشی |
|--------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
| روش    | مود اول | مود دوم   | مود سوم | مود اول | مود دوم   |
| آزمایش | ۱/۱۲    | ۴/۷۸      | ۸/۲     | ۱/۸۱    | ۶/۵       |
|        | (۱/۰۰)  | (۱/۰۰)    | (۱/۰۰)  | (۱/۰۰)  | (۱/۰۰)    |
|        | ۱/۰۹    | ۵/۱۴      | ۱۱/۹۴   | ۱/۷۴    | ۵/۸۶      |
|        | (۰/۹۷)  | (۱/۰۸)    | (۱/۴۶)  | (۰/۹۶)  | (۰/۹۰)    |
|        | ۱/۱۷    | ۵/۵۸      | ۱۳/۰۶   | ۱/۸۹    | ۶/۵۴      |
|        | (۱/۰۴)  | (۱/۱۷)    | (۱/۵۹)  | (۱/۰۴)  | (۱/۰۱)    |
|        | ۱/۰۸    | ۵/۲۰      | ۱۲/۳    | ۱/۸۷    | ۶/۵۱      |
|        | (۰/۹۶)  | (۱/۰۹)    | (۱/۵)   | (۱/۰۳)  | (۱/۰۰)    |
|        |         |           |         |         |           |

انتظار، با اینکه مقدار جرم در حالت نیمه پر بیشتر است. فرکانس طبیعی مود اول جانبی نیمه پر کمی بیشتر از حالت یک مخزن پر به دست آمده است. البته در هنگام آزمایش یک مخزن پر و بقیه خالی، مقداری آب به مخازن خالی نشت کرده بود ولی با این حال، جرم کل در حالت نیمه پر حدود ۲۰ تن بیشتر از حالت یک مخزن پر بوده است. بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت که خصوصیات دینامیکی نه تنها به مقدار جرم و سختی بلکه به نحوه توزیع آنها (مقارن و نامقارن) نیز وابسته است.

- در بعضی از اندازه گیریهای مخزن پر در فرکانس ۰/۴۸ هرتز، یک پیک مشاهده می شود که مربوط به فرکانس امواج سطحی است.

نتایج آزمایش سوم نشان می دهد که میزان مشارکت چرخش پایه در دامنه مود اول جانبی در تراز سقف در مخزن خالی ۰/۳٪، مخزن پر ۳/۵٪ و یک مخزن پر و بقیه خالی ۰/۴٪ است. مشاهده می شود که افزایش جرم و خروج از مرکزیت جرمی بر افزایش مشارکت اندرکنش خاک و سازه تأثیر دارد. در ضمن می توان حدس زد که این مشارکت در مودهای بالاتر بیشتر می شود. فرکانس حرکت گهواره ای سیستم حدود ۱۸ هرتز اندازه گیری شده است.

در تحلیل سوم، سختی چرخشی پایه با سعی و خطا در

اجراهای متوالی به نحوی انتخاب شده است که میزان مشارکت در دامنه تراز سقف به مقادیر اندازه گیری شده برسد. بدین ترتیب می توان درصد مشارکت چرخش پایه را بر روی فرکانسهای طبیعی از سایر تقریبهای مدلسازی تفکیک کرد. برای مثال در حالت مخزن پر سختی فنر آن قدر تغییر داده شد تا دامنه مود اول در تراز سقف ۳/۵ درصد بیش از حالت پایه ثابت به دست آمد.

همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود، اندرکنش پایه و خاک موجب کاهش فرکانس مود اول جانبی در حالت خالی به میزان ۸ درصد می شود. بنابراین میزان مشارکت سایر پارامترها از قبیل مدول کشسانی، ناهمگونی در ساخت و عدم تطابق نقشه ها با سازه اجرا شده، حدود ۴ درصد در برای افزایش سختی سیستم است. در حالت مخزن پر نیز همان طور که در جدول ۳ دیده می شود، چرخش پایه حدود ۷ درصد از فرکانس مود اول کم می کند. اثر سایر پارامترهای سازه ای مانند حالت مخزنی خالی می تواند تنها حدود ۴ درصد فرکانس را افزایش دهد. در نتیجه بقیه اختلاف مربوط به مدل اندرکنش آب و سازه خواهد بود که در این مدل حدود ۹ درصد در برای کاهش سختی سیستم است.

اختلاف نتایج مدل و آزمایش در مود سوم قابل توجه است که از علل آن می توان به تأثیر بیشتر اندرکنش خاک و سازه و رفتار غیر

جدول ۳- مقایسه فرکانسهای طبیعی در حالت مخزن پر بر حسب هرتز (مدل هاوسنر اصلاح شده)

| مод پیشگی |         | مود جانبی |         |         | حالت<br>روش                    |
|-----------|---------|-----------|---------|---------|--------------------------------|
|           |         | مود سوم   | مود دوم | مود اول |                                |
| مود دوم   | مود اول |           |         |         |                                |
| ۵/۳۷      | ۱/۳     | ۷/۳۱      | ۴/۵۸    | ۰/۸۲    | آزمایش                         |
| (۱/۰۰)    | (۱/۰۰)  | (۱/۰۰)    | (۱/۰۰)  | (۱/۰۰)  |                                |
| ۵/۸۰      | ۱/۲۷    | ۱۱/۴۱     | ۵/۰۸    | ۰/۷۴    | تحلیل با پایه ثابت و E استاتیک |
| (۱/۰۸)    | (۰/۹۸)  | (۱/۵۶)    | (۱/۱۱)  | (۰/۹۰)  |                                |
| ۶/۴۰      | ۱/۳۸    | ۱۲/۲      | ۶/۲۷    | ۰/۷۸    | تحلیل با پایه ثابت و E دینامیک |
| (۱/۱۹)    | (۱/۰۴)  | (۱/۶۷)    | (۱/۳۷)  | (۰/۹۵)  |                                |
| ۶/۳۳      | ۱/۳۷    | ۱۱/۹۷     | ۵/۹۶    | ۰/۷۳    | تحلیل با چرخش پایه و E دینامیک |
| (۱/۱۸)    | (۱/۰۵)  | (۱/۶۴)    | (۱/۳۰)  | (۰/۸۹)  |                                |

جدول ۴- مقایسه فرکانسهای طبیعی در حالت مخزن نیمه پر بر حسب هرتز (مدل هاوسنر اصلاح شده)

| مود پیشگی |         | مود جانبی |         |         | حالت<br>روش                    |
|-----------|---------|-----------|---------|---------|--------------------------------|
|           |         | مود سوم   | مود دوم | مود اول |                                |
| مود دوم   | مود اول |           |         |         |                                |
| ۶/۶۹      | ۱/۶۱    | ۶/۴۶      | ۳/۰۴    | ۰/۹۸    | آزمایش                         |
| (۱/۰۰)    | (۱/۰۰)  | (۱/۰۰)    | (۱/۰۰)  | (۱/۰۰)  |                                |
| ۵/۷۰      | ۱/۴۸    | ۹/۶۸      | ۳/۹۴    | ۰/۸۴    | تحلیل با پایه ثابت و E استاتیک |
| (۰/۸۵)    | (۰/۹۲)  | (۱/۵۰)    | (۱/۳۰)  | (۰/۸۸)  |                                |
| ۶/۲۴      | ۱/۶۱    | ۱۰/۵۸     | ۴/۲۷    | ۰/۹۲    | تحلیل با پایه ثابت و E دینامیک |
| (۰/۹۳)    | (۱/۰۰)  | (۱/۶۴)    | (۱/۴۰)  | (۰/۹۴)  |                                |

است. از طرفی در حالت مخزن پر برای مدول کشسانی دینامیکی  $\pm 5\%$  چرخش پایه  $7\% -$ ، مدول اندرکنش سیال  $9\% -$  و سایر پارامترهای سازه ای  $4\% +$  است. علامت  $+$  در جهت افزایش فرکانس و افزایش سختی سیستم است.

چنانچه از مقایسه جداول ۲ و ۳ حاصل می شود، درصد اختلاف درمود دوم مربوط به حالت پر بیش از اختلاف در حالت خالی است که این به دلیل عدم امکان در نظر گرفتن مودهای موج دوم و بالاتر در مدل های اندرکنش به کار رفته است. زیرا در این مدل ها جرم موج تنها معرف مود اول نوسان سطح آب است. البته باید این نکته را در نظر داشت که مدل های به کار رفته برای حالت مخزن

خطی خاک و عدم کفایت مدل با فتر خطی و تحلیل کشسانی در معرفی رفتار سازه در مودهای بالاتر اشاره کرد. از سوی دیگر، به علت خفیف بودن تحریکات باد در آزمایش های محیطی، انرژی کافی برای به ارتعاش درآوردن سازه در مودهای بالا به وجود نمی آید و نمی توان به خصوصیات کامل این مودها دست یافت. با این حال، مودهای پیشگی توافق خوبی با نتایج آزمایش دارند که نشان دهنده دقت مناسب مدل در هنگام عدم حضور تأثیرات ناشی از دوران پایه است.

بدین ترتیب میزان مشارکت فرضیات مختلف در فرکانسهای طبیعی مود اول در حالت مخزن خالی برای مدول کشسانی دینامیکی  $\pm 7\%$ ، چرخش پایه  $8\% -$  و سایر پارامترهای سازه ای  $4\% +$

جدول ۵- مقایسه فرکانسهای طبیعی در حالت یک مخزن پر بر حسب هرتز (مدل هاوسنر اصلاح شده)

| مод پیشگی      |                | مود جانبی       |                |                | حالت<br>روش                                                                        |
|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|                |                | مود سوم         | مود دوم        | مود اول        |                                                                                    |
| مود دوم        | مود اول        | مود سوم         | مود دوم        | مود اول        | آزمایش<br><br>تحلیل با پایه ثابت و E استاتیک<br><br>تحلیل با پایه ثابت و E دینامیک |
| ۶/۳۲<br>(۱/۰۰) | ۱/۶۵<br>(۱/۰۰) | ۶/۴۷<br>(۱/۰۰)  | ۳/۹۳<br>(۱/۰۰) | ۰/۹۷<br>(۱/۰۰) |                                                                                    |
| ۶/۵۲<br>(۱/۰۳) | ۱/۵۹<br>(۰/۹۶) | ۱۰/۸<br>(۱/۶۷)  | ۵/۱۲<br>(۱/۳۰) | ۰/۹۱<br>(۰/۹۴) |                                                                                    |
| ۷/۱۴<br>(۱/۱۳) | ۱/۷۳<br>(۱/۰۵) | ۱۱/۳۱<br>(۱/۷۰) | ۵/۶۰<br>(۱/۴۲) | ۰/۹۷<br>(۱/۰۰) |                                                                                    |
|                |                |                 |                |                |                                                                                    |
|                |                |                 |                |                |                                                                                    |

جدول ۶- مقایسه فرکانسهای طبیعی در حالت مخزن پر با استفاده از مدل‌های هاوسنر و هارون (پایه ثابت)

| مود پیشگی |         | مود جانبی |         |         | حالت<br>روش                                |
|-----------|---------|-----------|---------|---------|--------------------------------------------|
|           |         | مود سوم   | مود دوم | مود اول |                                            |
| مود دوم   | مود اول | مود سوم   | مود دوم | مود اول | مدل هاوسنر<br>مدل هارون<br><br>درصد اختلاف |
| ۶/۴۰      | ۱/۳۸    | ۱۲/۲۰     | ۶/۲۷    | ۰/۷۸    |                                            |
| ۶/۶۲      | ۱/۳۱    | ۱۱/۹۷     | ۵/۹۹    | ۰/۷۵    |                                            |
| (۰/۹۷)    | (۱/۰۵)  | (۱/۰۲)    | (۱/۰۵)  | (۱/۰۴)  |                                            |

از آزمایش چهارم که مربوط به ثبت ارتعاشات میدان آزاد است، می‌توان نتیجه گرفت که ارتعاشات خفیف زمین از نوع اغتشاش خالص<sup>۳</sup> هستند زیرا تحلیل فوریه این اندازه‌ها معرف طیف وسیعی از فرکانسهاست که پیک خاصی در آنها قابل مشاهده نیست. از روی زمان حرکت یا پالس از فونداسیون سازه تا نقطه‌ای بر روی زمین، به فاصله‌ای مشخص، می‌توان سرعت موج را تعیین کرد. به علت انتشار قسمت اعظم این موج به صورت عرضی می‌توان این سرعت را تقریباً معادل سرعت موج برشی دانست که پارامتر مهمی در طبقه بندی خاکها از نظر تعیین میزان اندرکنش خاک و سازه است. در محل این مخزن سرعت موج برشی حدود ۳۷۵ متر بر ثانیه اندازه گیری شده است که با مقادیر مشارکت اندازه گیری شده همخوانی دارد.

برای مقایسه شکل مودهای مدل ریاضی با آزمایش، مقادیر

استوانه‌ای با کف تخت به دست آمده اند در صورتی که در مخزن مورد آزمایش کف مخازن مخروطی شکل اند که این مسئله موجب بروز درصدی خطا در این مدل می‌شود.

برای بررسی رفتار مهاربندها و اتصالات، از مقایسه مدل ریاضی و نتایج آزمایش کمک گرفته شده است. بدین منظور مدل ریاضی یک مرتبه در حالت خالی بدون مهاربندهای کششی تحلیل شد و در نتیجه آن مشخص شد که، وجود این مهاربندها در افزایش سختی سیستم مؤثر است چون بدون آنها فرکانسهای مدل ریاضی تفاوت نسبتاً زیادی با نتایج آزمایش داشتند. در مورد عملکرد تیرهای افقی و اتصال آنها باید توجه کرد که رفتار اتصال آنها بیشتر نزدیک به حالت اتصال صلب است زیرا مدل ریاضی، یک بار با فرض اتصال مفصلی تیرها به ستون تحلیل شد ولی مقادیر فرکانسهای به دست آمده با نتایج سازگار نبود.

دامنهٔ مود در گره های متناظر با محل نصب حس کننده ها از روی فایلهای خروجی به دست آمده و در حالات مختلف با هم مقایسه شده اند. در این مقایسه، جابه جایی تراز بالا یکسان در نظر گرفته شده است. شکل مودهای حاصل از آزمایش با شکل مودهای تحلیلی توافق مناسبی [۲۰] را نشان می دهد که نتایج زیر استنتاج می شود:

- شکل مودها در حالات مختلف با هم توافق خوبی دارند و دامنهٔ مود مربوط به حالت مخزن پر بزرگتر از حالت خالی و نیمه پر است.

- شکل مود اول جانبی معرف رفتار خمشی سازهٔ مخزن است. - مقادیر دامنهٔ شکل مود پیچشی در حالت یک مخزن پر و بقیه خالی، بسیار نزدیک به حالت تمام مخازن پر است که اثر خروج از مرکزیت جرمی را در شکل مودهای پیچشی به وضوح نشان می دهد.

- از مقایسهٔ زاویه فاز نقاط مختلف در یک فرکانس طبیعی، به همفاز بودن یا ناهمفاز بودن نقاط پی برده می شود. بدین ترتیب که اختلاف فاز دو نقطه ای که در یک جهت در حرکت اند صفر درجه و دو نقطه ای که در خلاف جهت یکدیگرند ۱۸۰ درجه است. البته این حالت مربوط به ارتعاش آزاد یک سیستم خطی ایده آل با مودهای مستقل و بدون میرایی است. نتایج آزمایش نشان می دهد که این اختلاف برای مود اول حدود  $\pm 2^\circ$  درجه و در مودهای بالاتر تا  $\pm 30^\circ$  درجه نیز وجود دارد. این اختلاف با توجه به وجود میرایی در سازه و تأثیر مودهای نزدیک به هم در سازه واقعی قابل توجیه است.

از عوامل مهم مؤثر بر طیف طراحی، نوع خاک، شدت و طول زمان زلزله است. رفتار سیستم سازه ای در جذب نیروهای زلزله نیز از عوامل دیگری است که بر نیروهای طراحی تأثیر می گذارد.

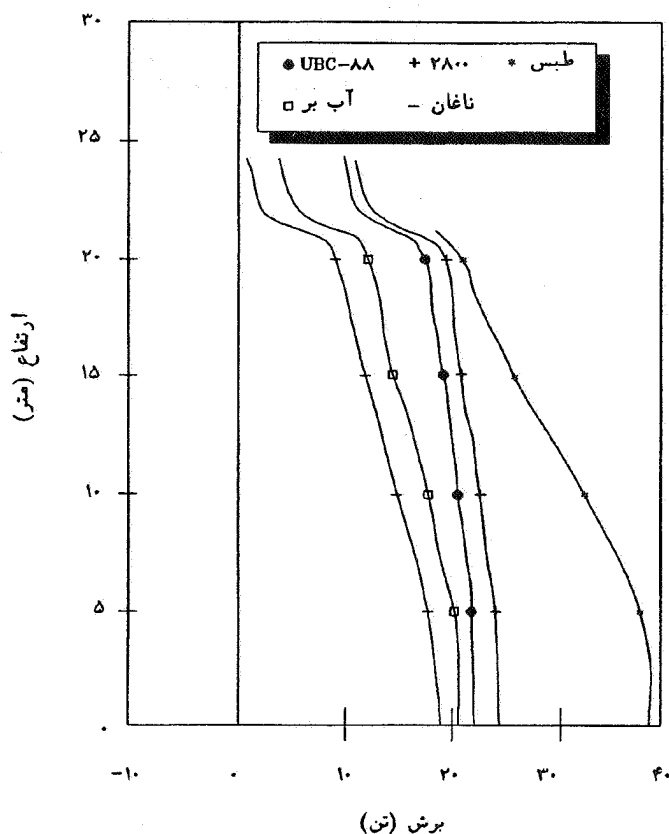
به منظور بررسی اثرات فرضیات مختلف مدل ریاضی بر نیروهای وارده بر سازه تحت زلزله، یک سری تحلیل طیف پاسخ بر روی مدل های تحلیل انجام شده است. برای این منظور، طبق نتایج مقایسهٔ فرکانسها مشاهده شد که در حالت مخزن خالی، مدل با چرخش پایه و مدول کشسانی دینامیکی حدود ۴ درصد در مود اول با واقعیت تفاوت دارد. در حالت مخزن پر، به علت تقریب مدل اندرکنش در جهت نرم تر کردن سازه، پایه ثابت در نظر گرفته می شود تا بخشی از تقریب را با افزایش سختی سیستم جبران کند. در این

حالت مدل از تقریب مناسبتری با ضریب دینامیک و پایه ثابت برخوردار است که حدود ۵ درصد در مود اول با واقعیت اختلاف دارد. با این که درصدهای اختلاف در مود دوم و سوم بیشتر می شود ولی به علت مشارکت کمی که این مودها در پاسخ کل سیستم دارند (حدود ۵ درصد در جرم مؤثر)، نیروهای طراحی را چندان تغییر نمی دهند. این دو مدل اصلاح شده تحت طیف طراحی آئین نامهٔ UBC-88 و آیین نامهٔ طرح مقاوم ساختمانها در برابر زلزله (۲۸۰۰) قرار گرفته اند. همچنین طیف پاسخ زلزله های طیس (۲۵ شهریور ۱۳۵۷) آب بر - منجیل (۳۰ خرداد ۱۳۶۹) و ناغان (۱۷ فروردین ۱۳۵۶) به این سازه اعمال شده اند.

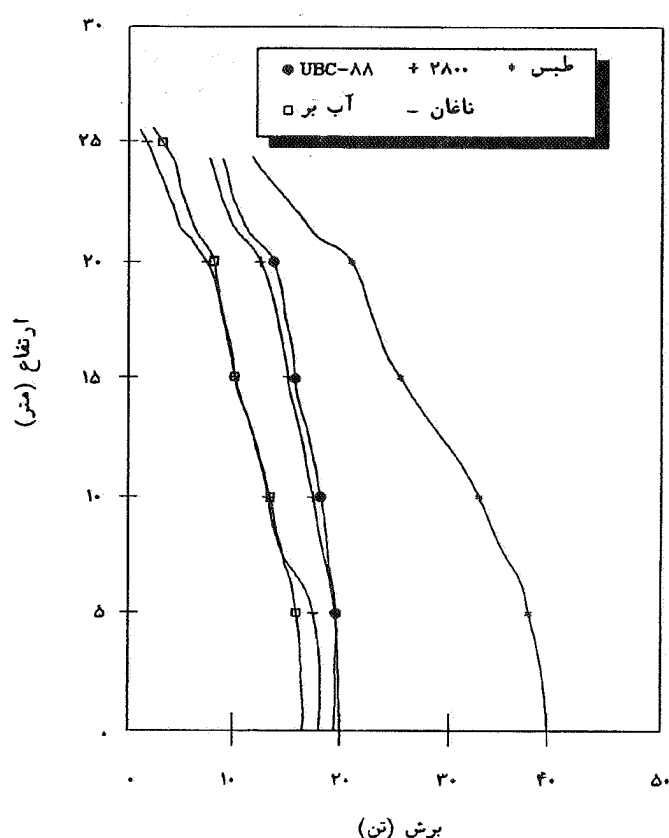
پارامترهای طیف طراحی UBC-88 مطابق زیر انتخاب شده است: ضریب منطقه  $Z=0/3$ ، ضریب اهمیت  $I=1/25$ ، خاک غیر چسبنده عمیق یا رس سخت (خاک نوع ۲) و ضریب سیستم سازه ای  $R_w=3/0$  برای مخازن و پاندولهای وارونه. در طیف ۲۸۰۰ شتاب مبنای طرح  $A=0/35$ ، ضریب اهمیت برابر ۱/۲ و خاک نوع II و ضریب  $R=2/5$  به کار گرفته شده است.

ضریب میرایی مطابق آزمایشها برابر با ۵ درصد در نظر گرفته شده و طیفها در راستای محور تقارن شمالی - جنوبی به سازه اعمال شده اند. نمودار برش در ترازهای مختلف برای این طیفها در حالت خالی در شکل ۴ و در حالت پر در شکل ۵ آمده است. همان طور که مشاهده می شود، اگر طراحی مناسبی براساس آیین نامه ها صورت گیرد، می توان انتظار داشت که این سازه در برابر زلزله هایی مانند طیس، آب - بر و ناغان مقاوم باشد.

به منظور مشاهدهٔ بهتر اثر فرضیات دوران بر نیروهای طراحی، در شکلهای ۶ تا ۱۱ مقایسه ای بین حالت با چرخش و بدون چرخش پایه دیده می شود. در کلیه طیفهای مورد مطالعه همان گونه که انتظار می رفت در حالت سیستم انعطاف پذیر برش کمتری نسبت به سیستم متکی بر تکیه گاه صلب حاصل شده است. کم شدن برش در سیستم انعطاف پذیر نسبت به سیستم متکی بر تکیه گاه صلب باعث تغییر شکل بیشتری در سیستم می شود که طراح بایستی این واقعیت را مد نظر قرار دهد. از طرفی با توجه به قرارگیری جرم سنگینی در ارتفاع زیاد اثرات  $P-\Delta$  می تواند قابل توجه باشد. دیده می شود که اثرات چرخش پایه، مقادیر نیروهای طراحی را به خصوص در نزدیکی پایه به مقدار قابل توجهی تغییر می دهد.



شکل ۵- تغییرات نیروی برشی در ارتفاع سیستم در حالت مخزن پر



شکل ۶- تغییرات نیروی برشی در ارتفاع سیستم در حالت مخزن خالی

و تحلیل می‌توان به فرضیات مدل انتخابی اندرکنش آب و مخزن، انعطاف پذیری فونداسیون و مدول کشسانی در نظر گرفته شده برای بتن اشاره کرد. در مورد این سازه، استفاده از مدل مکانیکی هاوسنر اصلاح شده برای سیال، منجر به تخمین برای مود اول به میزان حدود ۹ درصد کمتر از نتایج آزمایش می‌شود. عدم اجازه چرخش پایه در مدل ریاضی نیز باعث می‌شود که فرکانس مود اول تحلیل حدود ۸ درصد بیش از نتایج آزمایش به دست آید. همچنین پیشنهاد شده است که برای منظور کردن اثرات بارگذاری دینامیکی، مدول کشسانی بتن حاصله از رابطه  $ACI$  به میزان ۲۰ درصد افزایش یابد. تأثیر سایر عوامل سازه‌ای مانند اختلافات احتمالی با نقشه‌های اجرایی و رفتار اتصالات و غیره، حدود ۴ درصد در برای افزایش سختی سیستم محاسبه شده است.

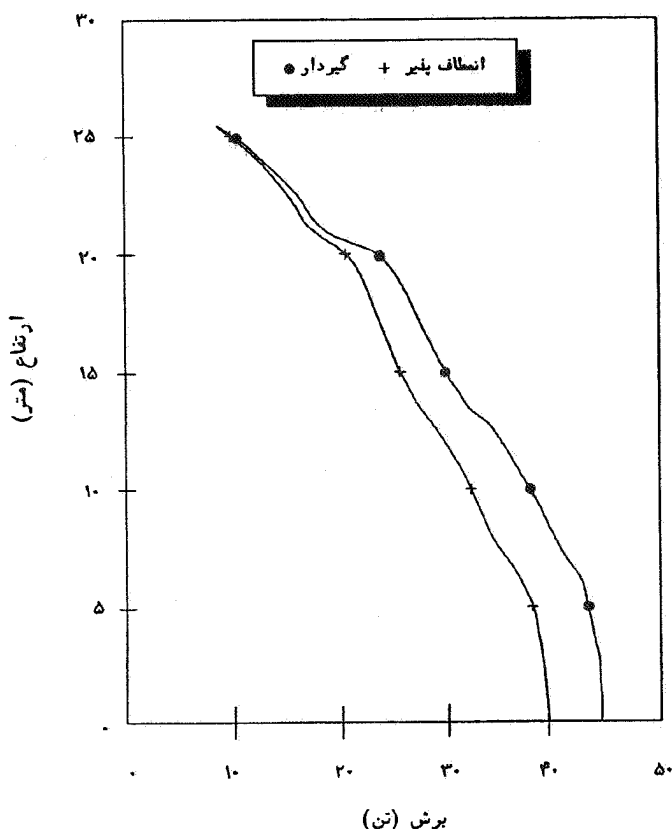
ب - نتایج نشان می‌دهند که در حالت مخزن خالی، مدل با قابلیت چرخش پایه و مدول کشسانی دینامیکی با واقعیت توافق خوبی دارد. در حالت مخازن پر، مدل اندرکنش آب و سازه باعث کاهش

پاسخ سازه به زلزله‌های مختلف به دو عامل اصلی بستگی دارد: خصوصیات دینامیکی سازه که تابعی از میزان آب موجود در مخازن است و خصوصیات نیروی زلزله نظیر بزرگی، محتوای فرکانسی و مدت. به همین علت دیده می‌شود که در بعضی از موارد با وجودی که مخزن خالی است نیروهای بیشتری بر سیستم اثر می‌کند که با توجه به این واقعیت در طراحی این نوع سیستمها باید حالات خالی، نیمه پر و پر مورد تحلیل قرار گیرد.

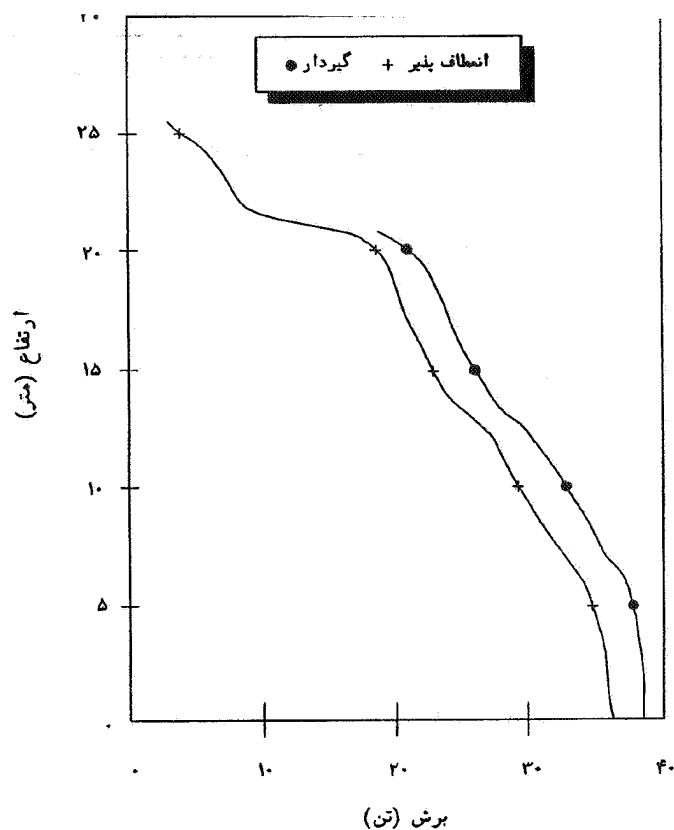
## ۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

به منظور بررسی خصوصیات دینامیکی سازه با در نظر گرفتن اثرات چرخش پایه یکسری آزمایشهای ارتعاشات محیطی بر روی یک مخزن آب و هوایی انجام گرفته است. نتایج حاصل از مقایسه آزمایش و تحلیل به شرح زیر است:

الف - فرکانس طبیعی حاصل از تحلیل با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش تفاوتهایی دارند. از عوامل عمده اختلاف بین نتایج آزمایش



شکل ۷- اثر چرخشی پایه در زلزله طبس (در حالت مخزن پر)



شکل ۶- مقایسه تغییرات برشی سیستم در حالت پایه گیردار و انعطاف پذیر در مخزن خالی، تحت طیف زلزله طبس

تشخیص است. این بررسیها نشان دهنده نزدیکتر بودن رفتار اتصال به حالت صلب است.

هـ - یکسان نبودن فرکانس مودهای شمالی - جنوبی و شرقی - غربی حاصل از آزمایش با یکدیگر می تواند نشان دهنده عدم یکنواختی در ساخت اعضای اتصالات و مهاربندها باشد.

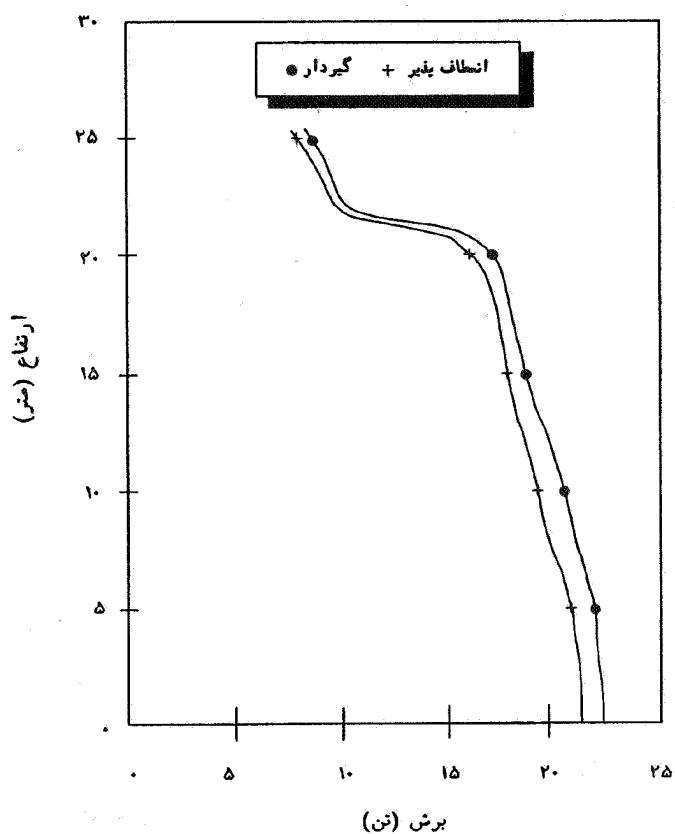
و - فرکانسها و شکل مودها در حالت یک مخزن پر و بقیه خالی نشان دهنده تأثیر زیاد خروج از مرکزیت جرمی بر رفتار سازه است. ز - درصد نسبتاً کم مشارکت چرخش پایه در این سازه خاص به علت بافت متراکم و وضعیت مناسب خاک ساختگاه است که نتایج آزمایش سرعت موج برشی مبین این مطلب است. این پارامتر که عامل مهمی در طبقه بندی خاکهاست، باید قبل از احداث مخازن مشابه اندازه گیری شود و سپس، بر اساس آن طراحی شمعهها و فونداسیون انجام پذیرد.

ح - درصد میرایی این سازه حدود ۵ درصد میرایی بحرانی به دست آمده است که با مقادیر توصیه شده در مورد سازه های بتن مسلح موافقت دارد.

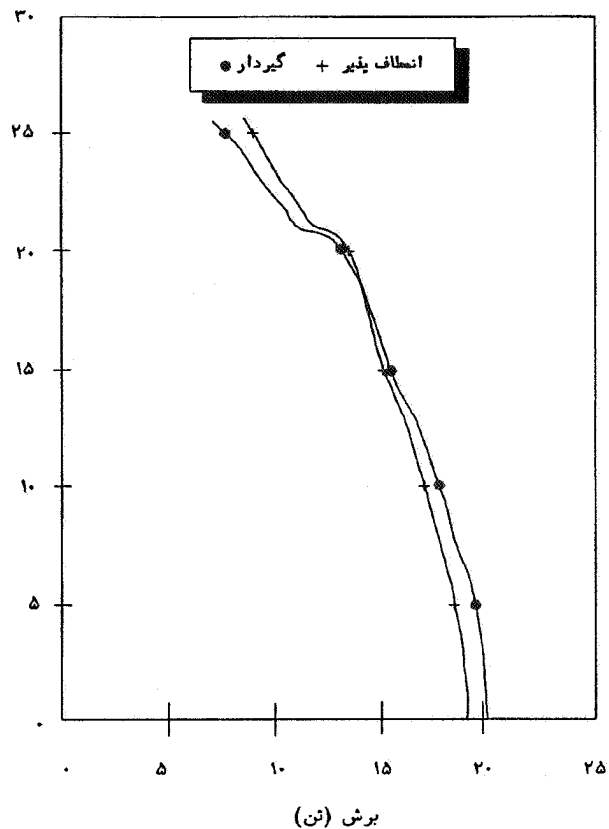
سختی سیستم می شود. این مسئله باعث افزایش فرکانس طبیعی حاصل از مدل می شود که به نوبه خود منجر به تخمین دست پایین نیروهای به دست آمده از طیفهای طراحی خواهد شد. عدم توجه به این مطلب ممکن است به طراحی یک سازه غیر مقاوم منجر شود. بدین جهت پیشنهاد می شود که در این حالت، پایه صلب در نظر گرفته شود تا بخشی از تقریب مدل سیال را با افزایش سختی کل جبران کند بدین ترتیب مدلهای به دست آمده حدود ۵ درصد در مود اول با واقعیت اختلاف خواهند داشت.

ج - درصد اختلاف مدل و آزمایش در مود سوم بسیار زیاد می شود که علت آن می تواند تأثیر اندرکنش خاک و سازه و عدم کفایت فتر خطی و تحلیل کشسانی در تعیین خصوصیت مودهای بالاتر باشد. از عوامل دیگر این اختلاف این است که مدل اندرکنش آب و مخزن تنها می تواند به شکل مود اول موج به ارتعاش در آید و اثرات مودهای موج بالاتر را شامل نمی شود.

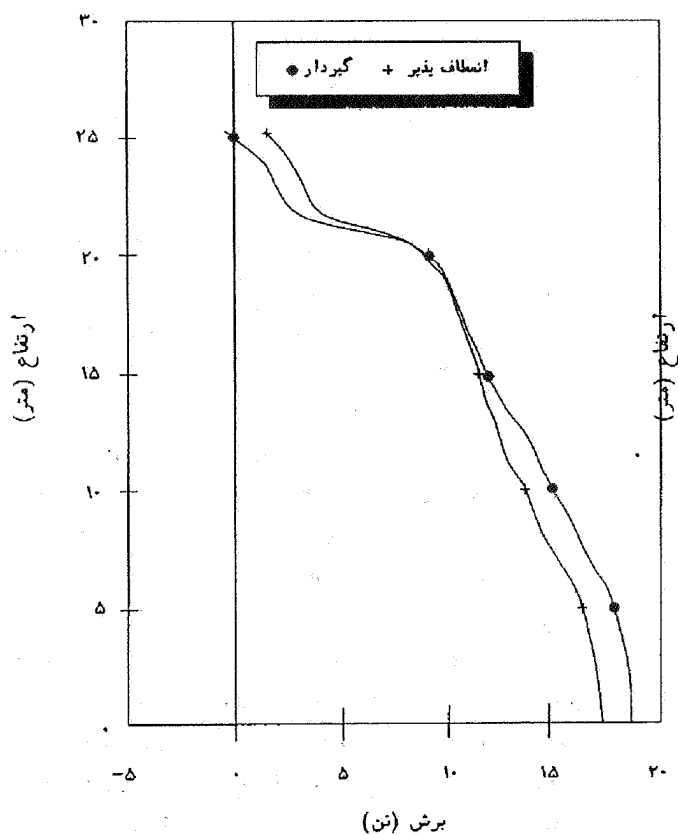
د - رفتار اتصالات در مهاربندها از مقایسه مدل و آزمایش قابل



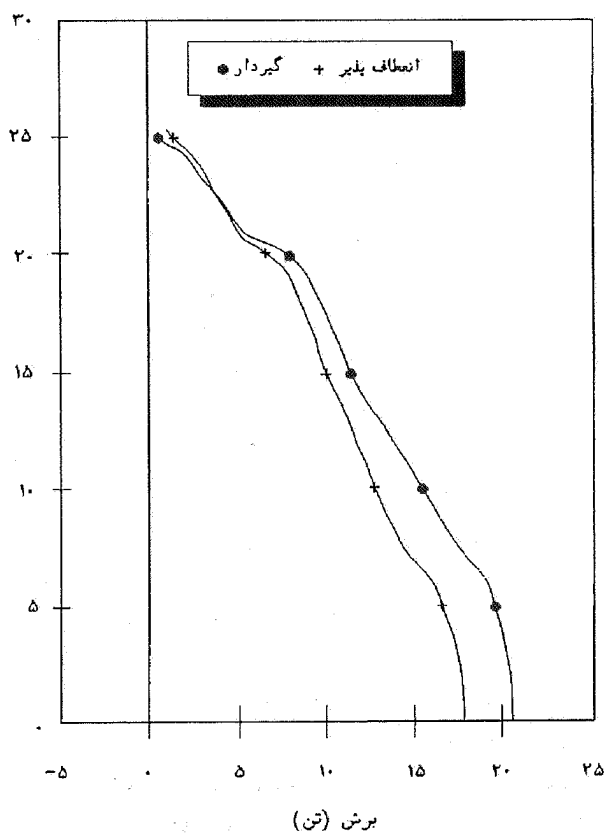
شکل ۹- اثر چرخشی پایه در طیف UBC (در حالت مخزن پر)



شکل ۸- اثر چرخشی پایه در طیف UBC (در حالت مخزن خالی)



شکل ۱۱- اثر چرخشی پایه در زلزله ناغان (در حالت مخزن پر)



شکل ۱۰- اثر چرخشی پایه در زلزله ناغان (در حالت مخزن خالی)

ممکن است نیروهای طراحی را به میزان قابل ملاحظه‌ای تغییر دهد.

### قدردانی

این تحقیق در مؤسسه زلزله شناسی و مهندسی زلزله با حمایت مالی واحد بهداشت وزارت جهادسازندگی انجام شده است که بدین وسیله از مسئولان موسسه و واحد بهداشت و همچنین از دستیار آقایان مرعشی، حسین زاده، شیرازیان و پروازه تشکر و قدردانی می‌شود.

ط - ملحوظ کردن چرخش پایه در مدل‌های ریاضی موجب تغییر نیروهای طراحی حاصل از تحلیل طیفی به‌خصوص در نزدیکی پایه می‌شود. درمورد طیفهای طراحی، چرخش پایه منجر به کاهش نیروهای طراحی می‌شود.

ی - روند طراحی باید مطابق آیین نامه و با در نظر گرفتن کلیه حالات خالی، پر و نیمه پر در تحلیل صورت گیرد، زیرا فرکانس طبیعی حالت مخزن خالی و پر حدود ۴۰ درصد با هم اختلاف دارند و این اختلاف بسته به فرکانس غالب طیف مورد استفاده،

واژه نامه:

- |                |                            |                |
|----------------|----------------------------|----------------|
| 1. ferrocement | 2. Data Acquisition system | 3. white noise |
|----------------|----------------------------|----------------|

### مراجع

1. Housner, G. W., "The Dynamic Behaviour of Water Tanks," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 53, No. 2, pp. 381-387, Feb. 1963.
2. Housner, G. W., "Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 47, NO. 1, Jan. 1957.
3. Veletsos, A. S., and Yang, Y. Y., "Earthquake Response of Liquid Storage Tanks," *Proceeding of 2nd Annual ASCE Engineering Mechanics Specialty Conference*, North Carolina State Univ., Raleigh, N. C., May 1977.
4. Kana, D. D., and Dodge, F. T., "Design Support Modeling of Liquid Slosh in Storage Tanks Subject to Seismic Excitation," *Proceedings of ASCE Conference on Structural Design of Nuclear Plant Facilities*, Vol. 1A, PP. 307-337, December 1975.
5. Chen, P. C., and Barber, R. B., "Seismic Design of Liquid Storage Tanks," *International Symposium of Earthquakes Structural Design*, St. Louis, Missouri, pp. 1211-1247, 1976.
6. Haroun, M. A., "Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks," *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, pp.179-206, March 1983.
7. Moller, O., and Rubinstein M., "Reliability - Based Design of R/C Water Tank Structures under Seismic Action," *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 21, pp. 665-678, 1992.
8. Haroun, M. A., and Temraz, M. K., "Effects of Soil-Structure Interaction on Seismic Response of Elevated Tanks," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 11, pp. 73-86, 1992.
9. Haroun, M. A., and Housner, G.W., "Dynamic Characteristics of Liquid Storage Tanks," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 108, ASCE, No. EM5, pp. 783-800, 1982.
10. Haroun, M. A., and Housner, G. W., "Dynamic Interaction of Liquid Storage Tanks and Foundation Soil," *Proceedings of 2nd Specialty Conference. on Dynamic Response of Structures*, pp. 346-360, Atlanta, Georgia, ASCE, New York, 1981.
11. Benuska, K. L., and Matsummoto, G. Y., "Structural Characterization of Concrete Chimneys," *Proceedings of 2nd Specialty Conference. on Dynamic Response of Structures*, pp. 152-163, Atlanta, Georgia, ASCE, New York, 1981.
12. Meyyapa, M., Palsson, G., and Craig, J. I., "Modal Parameter Estimation for a Highrise Building Using Ambient Response Data Taken During Construction," *Proceedings of 2nd Specialty Conference. on Dynamic Response of Structures*, Atlanta, Georgia, ASCE, New York, 1981.
13. Hart, G. C., McIlmore, V. R., and Stubbs, I. R.,

- "Ambient Vibrations of Two Suspension Bridges," *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 97, pp. 2567-2582, Oct. 1971.
14. Gates, J. H., and Smith, M. J., "Results of Ambient Vibration Testing of Bridges," *Proceedings of 8th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. VI, pp. 873-880, 1984.
  15. Zoropapel, et al., "Experimental Studies on Large Dams by means of Measuring Ambient Vibration," *Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 6, pp. 117-124, Sept. 1982.
  16. Paramasiram, et al., "Fatigue behaviour of ferroce-ment slabs," *Journal of Ferrocement*, Vol. 11, pp. 1-10, Jan. 1981.
  17. American Society of Civil Engineers, "Fluid/Struc-ture Interaction During Seismic Excitation," ASCE Committee on Seismic Analysis Report, ASCE, New York, 1984.
  18. Kalnins, A., "Vibration of Fluid Filled Thin Shells," *Proceedings of 5th International Conference of Structural Mechanics in Reactor Technology*, Berlin, August 1979.
  19. McHenry, D., and Shideler, J. J., "Review of Data on Effect of Speed in Mechanical Testing of Concrete," PCA Research Bull. D9, 1958.
- ۲۰ - شکیب، ح. و مرعشی، ع.، "اثر خصوصیات دینامیکی بر پاسخ مخازن آب هوایی تحت نیروی زلزله،" گزارش تحقیقاتی، مؤسسه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، زیرچاپ.