

شناسایی سیستم سازه‌های مخزن فلزی هوایی ذخیره آب با استفاده از آزمایش ارتعاش محیطی و اعتبارسنجی مدل عددی

محمد عالم باقری*

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۱-۲۷

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۲-۳۱

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۳-۳۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۴-۰۲

کلمات کلیدی:

شناسایی سیستم

مخزن هوایی آب

آزمایش ارتعاش محیطی

روش جستار قله (برداشت پیک)

کالیبراسیون مدل

خلاصه: مقاله حاضر به بررسی امکان استفاده از آزمایشهای ارتعاش محیطی برای شناسایی سیستم‌های سازه‌های مخزن هوایی آب می‌پردازد. این مخازن برای ذخیره و بهره‌برداری از آب چه در شرایط عادی و چه شرایط بحرانی در بسیاری از نقاط کشور مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به حجم آب ذخیره شده توسط این مخازن که در فاصله از سطح زمین نگهداری می‌شود مشخصات دینامیکی و عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، مخزن هوایی آب مستقر در محوطه دانشگاه تربیت مدرس برای انجام آزمایش‌های ارتعاش محیطی انتخاب گردید. این مخزن با استفاده از حسگر سرعت سنج حساس لرزه‌ای (میکروترومر) ابزاربندی شده و سیگنال سرعت محیطی آن در مدت زمان ۳۰ دقیقه در سه راستای متعامد ثبت گردید. مقدار دامنه سرعت جانبی ثبت شده برای تانکر آب تا ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه می‌رسد. با استفاده از الگوریتم جستار قله (برداشت پیک) مقدار فرکانس اول مخزن ۱/۹ هرتز تعیین شد. هر چند به علت عدم تقارن کامل سازه و همچنین جهت‌گیری سنسور، فرکانس‌های شناسایی شده در دو راستای متعامد تا ۵٪ با هم اختلاف دارند. سپس با توجه به داده‌های موجود اقدام به مدل‌سازی عددی مخزن هوایی آب در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ با استفاده از تحلیل ماتریسی و اعتبارسنجی عددی آن گردید. در مدل‌سازی اولیه مقدار فرکانس‌های طبیعی تعیین شده از نرم‌افزار در تطابق مناسبی با فرکانس‌های شناسایی شده از آزمایش‌های میدانی می‌باشند که نشان از اعتبارسنجی مدل‌سازی مخزن در نرم‌افزار دارد.

۱- مقدمه

متعددی بر روی رفتار و عملکرد لرزه‌ای مخزن هوایی که عملکردی مشابه با سازه‌های پاندول معکوس داشته و عموماً با سازه‌های تک‌درجه آزادی معادلسازی می‌شوند، انجام گرفته است. از اولین تحقیقات در این زمینه می‌توان به مطالعه هاوونز در ۱۹۶۳ پس از زلزله مخرب شیلی که در آن خسارت زیادی به سازه‌های مختلف اعمال شد، اشاره کرد [۱]. وی نشان داد که یک اثر مقیاس^۱ وجود دارد که می‌تواند سبب پایداری سازه‌های بلند و نازک در مقابل واژگونی شود. هارون در ۱۹۸۴ به تحلیل ممان‌های خمشی وارد به دیواره‌های مخازن

مخازن هوایی ذخیره آب به شکل گسترده‌ای در کلانشهرها مانند تهران برای ذخیره و بهره‌برداری آب تحت فشار مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مخازن اغلب به صورت پوسته‌های فلزی مسقف ساخته می‌شوند که بر روی یک قاب فضایی ساخته شده از لوله‌های فولادی حمایت می‌شوند. با توجه به حجم آب ذخیره شده توسط این مخازن که در فاصله از سطح زمین نگهداری می‌شود دینامیک و عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. تحقیقات

1 Scale effect

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: alembagheri@modares.ac.ir



ذخیره آب تحت بارهای هیدرودینامیک ناشی از زلزله پرداخت [۲]. با در نظرگیری مولفه‌های افقی و قائم زلزله وی فشارهای هیدرودینامیک را با استفاده از رویکرد جریان پتانسیل کلاسیک محاسبه کرد. کیم و همکاران پاسخ دینامیکی مخازن ذخیره آب را محاسبه کردند [۳]. آنها روش‌های حل تحلیلی برای محاسبه پاسخ دینامیکی مخازن انعطاف‌پذیر تحت تحریکات لرزه‌ای ارائه کردند. این محاسبات با فرض زمین صلب انجام شده است.

لیواغلو و همکاران [۴] به بررسی اثرات پی مدفون بر رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی آب با در نظرگیری شش نوع مختلف خاک پرداختند. آنها از تکنیک اجزاء محدود برای تحلیل سیستم استفاده کرده و نشان دادند که تغییر مکان سقف مخزن شدیداً متأثر از مدفون بودن پی در خاک نرم بوده هرچند برای خاک سخت این اثر کمتر است. آنها همچنین روابط تحلیلی ساده شده برای مخازن هوایی با در نظرگیری اثر اندرکنش سیال-سازه-خاک ارائه کردند [۵]. صالحی و همکاران به بررسی مخازن فلزی هوایی آب با قاب مهاربندی شده با در نظرگیری اثر اندرکنش سازه و آب به روش اجزای محدود تحت اثر شتاب نگاشت‌های مختلف زلزله و نیز اثر تغییر ارتفاع آب داخل مخزن پرداخته و نتایج حاصله را با روش‌های مورد قبول آئین‌نامه ۲۸۰۰ مقایسه کردند [۶]. کورادلی و همکاران [۷] به شکل عددی-آزمایشگاهی به بررسی پاسخ دینامیکی مخازن هوایی ذخیره سیال تحت تحریکات پایه پرداختند. آنها برای تعیین فرکانس‌های طبیعی از آزمایش‌های ارتعاش آزاد برای سطوح مختلف سیال داخل مخزن استفاده کردند. سپس مدل عددی مخازن را با نتایج بدست آمده از آزمایش اعتبارسنجی کرده و نشان دادند که نوسان سطح سیال اثر مهمی بر پاسخ دینامیکی سیستم دارد. آنها همچنین پیشنهاد کردند که برای استفاده از روش ساده شده جرم افزوده متمرکز، حداقل از سه جرم باید استفاده کرد.

شکیب و همکاران یک سازه مخزن هوایی آب را با و بدون اندرکنش خاک و سازه در حالت مخزن پر و خالی مدل‌سازی عددی کردند. آنها بر لزوم در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه در این سازه‌ها تأکید کردند [۸]. پورباقری و همکاران به بررسی مسئله اندرکنش آب و مخزن در تحلیل لرزه‌ای مخازن هوایی آب با استفاده از دو مدل اجزای محدود پرداختند [۹]. شنتون و همپتون نتایج بررسی تحلیلی پاسخ لرزه‌ای مخازن هوایی ایزوله شده را ارائه کردند [۱۰]. آنها فرکانس‌ها

و شکل موده‌های طبیعی سیستم را برای نسبت‌های مختلف ارتفاع به قطر پیدا کرده و اثر ایزوله سازی لرزه‌ای را در کاهش جابجایی، برش پایه و لنگر واژگونی نشان دادند. در تحقیقی دیگر، اشتري و همکاران به بررسی نمونه‌هایی از مخازن هوایی آب، با در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف ارتفاع به شعاع در مخازن استوانه‌ای با استفاده از تحلیل دینامیکی پرداخته و پاسخ‌های آنها شامل تغییر مکان حداکثر و تلاطم سطح آب را مقایسه کردند [۱۱]. هیرده و همکاران به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مخازن هوایی آب در مناطق مختلف لرزه‌ای با در نظرگیری ارتفاع و ظرفیت‌های مختلف مخازن در شرایط مختلف خاک پرداختند. آنها پاسخ مخازن را در حالت‌های مختلف دسته‌بندی کرده و روابطی برای تحلیل ساده شده ارائه کردند [۱۲].

شناسایی سیستم شاخه‌ای از علوم مهندسی می‌باشد که در آن به شناسایی مشخصات اصلی سیستم‌های مهندسی پرداخته می‌شود [۱۳]. در مهندسی سازه و زلزله، شناسایی سیستم سازه‌های عمرانی اغلب به بررسی و شناسایی مشخصات دینامیکی سازه‌ها می‌پردازد. مشخصات دینامیکی سازه‌های عمرانی شامل فرکانس‌ها و شکل موده‌های طبیعی سازه‌ها می‌شود که برای هر سازه منحصر بفرد بوده و مانند اثر انگشت آن سازه می‌باشد. پاسخ دینامیکی یک سیستم سازه‌ای کاملاً به مشخصات طبیعی دینامیکی آن بستگی دارد [۱۴] و [۱۵]. در عمل برای سازه‌های عمرانی ساخته شده تمام مقیاس، از آزمایش‌های ارتعاش اجباری و محیطی برای شناسایی سیستم‌های سازه‌ای استفاده می‌شود. این آزمایش‌ها به همراه الگوریتم‌های مختلف شناسایی برای انواع مختلف سازه‌های عمرانی پیاده‌سازی شده است که از جمله می‌توان به ساختمان‌ها [۱۶]، پل‌ها [۱۷]، سد‌ها [۱۸] و ... اشاره کرد. از روش‌های مختلف پردازش سیگنال برای شناسایی سیستم‌های سازه‌ای براساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌های میدانی استفاده می‌شود. خوانندگان علاقه‌مند می‌توانند به مرجع [۱۹] مراجعه کنند. از آنجا که ارتعاش اجباری سازه‌های عمرانی ساخته شده در محل از مشکلات و پیچیدگی‌های خاص خود برخوردار است، استفاده از آزمایش‌های ارتعاش محیطی از محبوبیت بالایی برای شناسایی سازه‌های عمرانی برخوردار است. در آزمایش‌های ارتعاش محیطی عموماً از الگوریتم‌های خروجی-تنها برای تعیین مشخصات دینامیکی سازه استفاده می‌شود [۲۱ و ۲۲]. در پژوهش حاضر به شناسایی سیستم سازه‌ای یک مخزن هوایی ذخیره آب با استفاده از

ارتفاع دیواره قائم آن ۲۹۰ سانتی متر می‌باشد. ارتفاع نوک سقف تانکر از انتهای دیواره قائم آن ۵۰ سانتی متر می‌باشد. یک راه دسترسی در اطراف تانکر با عرض حدود ۶۵ سانتی متر قرار داشته که با نرده‌های فولادی محافظت می‌شود. ارتفاع مخزن از محل راه دسترسی دور آن تا کف زمین اطراف ۱۵/۲ متر می‌باشد.

تانکر آب برروی یک قاب فولادی متشکل از ۴ ستون اصلی با مقطع دایروی به قطر بیرونی ۲۲ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر قرار گرفته است. این ۴ ستون اصلی توسط تیرهای جانبی لوله‌ای شکل به قطر بیرونی ۱۲ سانتی متر و ضخامت ۴ میلی متر به هم بسته شده‌اند. فاصله مرکز تا مرکز تیرها در راستای ارتفاع مخزن ۳۸۰ سانتی متر می‌باشد. همچنین به عنوان مهار جانبی از پروفیل‌های گرد توپر فولادی به قطر ۲۲ میلی متر در تمام دهانه‌های بین تیرها و ستون‌ها استفاده شده است. این پروفیل‌ها توسط مهارهای قابل تنظیم پیچی به محل اتصالات تیر ستون وصل شده‌اند. غیر از این اتصالات، تمامی اتصالات تیر به ستون و همچنین اتصالات ستون‌های به صفحه ستونها از نوع جوشی گیردار می‌باشد (شکل ۲). مخزن برروی یک پی بتن آرمه قرار گرفته است. ضخامت ورق‌های لچکی مورد استفاده در اتصالات ۸ میلی متر می‌باشد. مقطع طولی مخزن

آزمایش‌های ارتعاش محیطی پرداخته می‌شود. از مزایای این روش تحقیق می‌توان به بررسی میدانی سازه ساخته شده در عمل اشاره کرد که می‌تواند برای اعتبارسنجی مدل عددی آن مورد استفاده قرار گیرد. مخزن هوایی آب مستقر در محوطه دانشگاه تربیت مدرس برای این منظور انتخاب شده و آزمایش‌های میدانی ارتعاش محیطی با ثبت داده‌های محیطی سرعت انجام می‌گیرد. از الگوریتم جستار قله (برداشت پیک) برای پردازش سیگنال‌های سرعت ثبت شده و شناسایی مشخصات دینامیکی سیستم (فرکانس‌های طبیعی) استفاده می‌شود. پس از شناسایی سیستم سازه‌ای مدل عددی مخزن ساخته شده و با استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایش‌های میدانی اعتبارسنجی می‌شود.

۲- مخزن آب هوایی

مخزن آب مدنظر در این تحقیق مخزن هوایی فولادی آب داخل محوطه دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد. این مخزن در ضلع شمال غربی دانشگاه و در مجاورت بزرگراه شهید چمران با فاصله تقریبی ۱۲ متر قرار گرفته است. تصویر مخزن در شکل ۱ نشان داده شده است. قطر بیرونی تانکر آب این مخزن حدود ۴۰۰ سانتی متر بوده و



شکل ۲. اتصالات به کار رفته در مخزن هوایی آب

Fig. 2. Steel connections of the elevated water tank



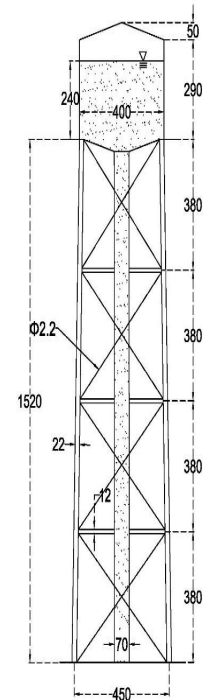
شکل ۱. مخزن هوایی آب دانشگاه تربیت مدرس

Fig. 1. Elevated water tank located at Tarbiat Modares University campus



شکل ۴. حسگر سرعت سنج به همراه سایر تجهیزات اندازه‌گیری مستقر در راه دسترسی کنار تانکر

Fig. 4. Velocimeter sensor along with the related accessories located on the access way



شکل ۳. مقطع طولی مخزن در راستای ارتفاع آن (ابعاد بر حسب سانتی‌متر می‌باشد)

Fig. 3. Longitudinal section of the tank (all dimensions are in cm)

سرعت سنج مورد استفاده در آزمایش مخزن آب هوایی با دقت و حساسیت بسیار بالا می‌باشد. این سرعت سنج‌ها دارای محدوده فرکانسی مناسب و حساسیت بالایی می‌باشند که برای آزمایش میدانی سازه‌های عمرانی بسیار مناسب هستند. این حسگر به یک دستگاه ثابت داده^۱ متصل است که داده‌های حاصل از اندازه‌گیری را به شکل سرعت کمی کرده و در حافظه مینی کامپیوتر متصل به خود ذخیره می‌کند. این دستگاه دارای ۳ کانال ورودی با دقت تبدیل آنالوگ به دیجیتال ۲۴ بیت می‌باشد. حسگر سرعت سنج به همراه دستگاه ثابت داده و تجهیزات و ملحقات اضافی بر روی دسترسی های کنار تانکر آب مستقر شد شکل ۴، به گونه‌ای که یکی از کانال‌های آن تقریباً به سمت شمال (در راستای شمالی-جنوبی) و در امتداد قاب‌های دو طرف نگهدارنده مخزن جهت‌گیری شد. با این شکل، راستای دیگر اندازه‌گیری سرعت جانبی در امتداد شرقی-غربی خواهد بود.

لرزش محیطی مخزن در روز آزمایش عموماً ناشی از ترافیک عبوری روزانه از بزرگراه شهید چمران و نیز وزش باد می‌باشد. سرعت

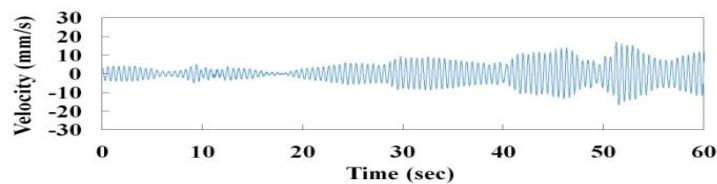
در راستای ارتفاع در شکل ۳ نشان داده شده است. ارتفاع آب داخل مخزن در روز آزمایش‌های محیطی ۵۰ سانتی‌متر پایین‌تر از بالای دیواره قائم مخزن می‌باشد. حجم آب داخل مخزن در روز آزمایش تقریباً ۳۵ مترمکعب می‌باشد.

فاصله مرکز تا مرکز ستون‌ها در تراز زمین ۴۵۰ سانتی‌متر و در تراز زیر تانکر آب حدود ۴۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. لوله اصلی انتقال آب که از تانکر به سطح زمین وصل می‌شود به قطر بیرونی ۷۰ سانتی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد. ساختار کلی مخزن حول دو محور متعامد در راستاهای شمالی-جنوبی و شرقی-غربی تقریباً متقارن می‌باشد.

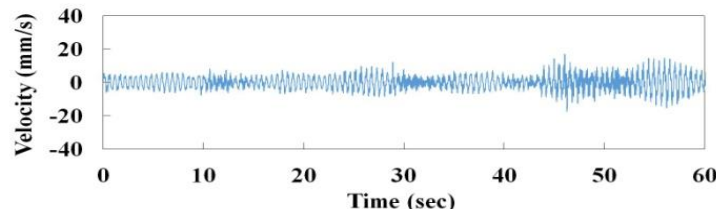
۳- آزمایش‌های میدانی ارتعاش محیطی

برای انجام آزمایش‌های میدانی ارتعاش محیطی مخزن آب هوایی دانشگاه تربیت مدرس از حسگر سرعت سنج بسیار دقیق و حساس لرزه‌ای (میکروترومر) سه جهته (MTSS-1003) ساخت شرکت R-sensors LLC استفاده شد. این حسگر دارای سه کانال ذخیره سرعت در سه راستای کارتزینی عمود بر هم می‌باشد. نوع خاص

1 Data logger



(الف)



(ب)

شکل ۵. نمونه‌ای از داده سرعت ثبت شده در راستای (الف) شمالی-جنوبی، (ب) شرقی-غربی
 Fig. 5. Samples of recorded velocity data in (a) north-south, and (b) east-west direction

محیطی مخزن در راستاهای شمالی-جنوبی و شرقی-غربی در شکل ۵ نشان داده شده است. پالس سرعت مخزن هوایی در این شکل به وضوح دیده شده و همانگونه که ملاحظه می‌شود مقدار سرعت جانبی مخزن در هر دو راستا تا ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه می‌رسد که برای سازه‌های عمرانی مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد.

با توجه به محیطی بودن تحریک مخزن هوایی آب رکوردهای ثبت شده در ارتفاع مخزن و در کنار تانکر آب آن در واقع حاوی مشخصات دینامیکی اصلی مخزن هوایی می‌باشد. برای استخراج مشخصات دینامیکی ارتعاشی مخزن از روش جستار قله (برداشت پیک^۳) استفاده می‌شود. در این روش تبدیل فوریه رکوردهای سرعت ثبت شده محاسبه شده و قله‌های مشاهده شده در آن به عنوان فرکانس‌های اصلی نوسانی مخزن هوایی آب برداشت می‌شوند. به این منظور ابتدا رکوردهای سرعت ثبت شده را که مدت زمان هر کدام حدوداً ۳۰ دقیقه (۱۸۰۰ ثانیه) می‌باشد به بخش‌های کوچکتر تقسیم‌بندی می‌شود. این کار با استفاده از پنجره‌های متحرک^۴ با همپوشانی مناسب قابل انجام می‌باشد. برای کم کردن خطای پراکندگی^۵ از بازه پنجره‌ای Hanning به تعداد $2^{14}=16384$ داده

وزش باد در روز آزمایش ۱۸ کیلومتر بر ساعت، دمای هوا ۷ درجه سانتی‌گراد و رطوبت هوا ۳۹٪ می‌باشد. مدت زمان برداشت داده از مخزن هوایی آب در سه راستای عمود بر هم حدود ۳۰ دقیقه به شکل پیوسته با نرخ نمونه‌برداری ۲۰۰ داده بر ثانیه می‌باشد. با توجه به نرخ نمونه‌برداری انتخاب شده، مقدار فرکانس نایکوئیست^۱ مساله مقدار ۱۰۰ هرتز می‌باشد. فرکانس نایکوئیست به بالاترین فرکانس قابل شناسایی در یک سیگنال یا سری زمانی گفته می‌شود که مقدار آن نصف نرخ (فرکانس) نمونه‌برداری می‌باشد. لازم به ذکر است که یک فیلتر بالاگذر^۲ با فرکانس قطع ۰/۱ هرتز برای حذف خط پایه و نوسان حول مبدا به داده‌های سری زمانی حین داده‌برداری اعمال شد. غیر از این فیلتر هیچگونه فیلتر دیگری در حین داده‌برداری بر روی داده‌های خام ثبت شده در حین آزمایش اعمال نشده است.

۴- نتایج حاصل از آزمایش ارتعاش محیطی

داده‌های سرعت محیطی در دو راستای جانبی متعامد مخزن هوایی آب به همراه راستای قائم برداشت شد. به جهت ارزیابی مشخصات دینامیکی سیستم از دو رکورد ثبت شده در راستاهای جانبی در ادامه استفاده خواهد شد. بخشی از داده ثبت شده حین آزمایش ارتعاش

3 Peak-picking
 4 Moving window
 5 Leakage error

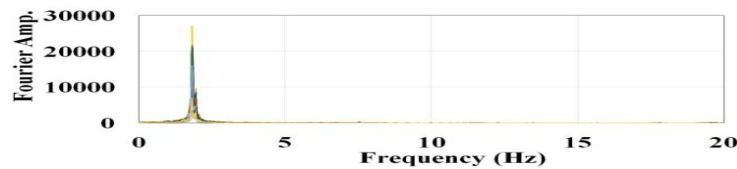
1 Nyquist frequency
 2 High-pass filter

آزمایش انجام گرفته مخزن هوایی آب در شکل ۷ مقایسه شده‌اند. برای یافتن راحت‌تر قله‌های نمودارهای فرکانسی و فرکانس متناظر با آنها می‌توان اقدام به هموارسازی نمودارهای فرکانسی کرد. این کار در شکل ۷ انجام شده است. برای انجام این کار از پنجره میانگین‌گیری متحرک با طول پنج داده استفاده شده است که در طول رکورد حرکت کرده و اقدام به هموارسازی نمودارها می‌کند.

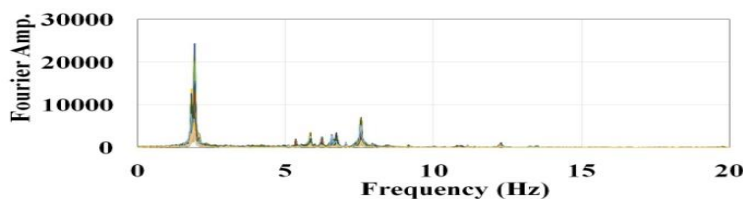
همانگونه که از نمودار شکل ۷ مشاهده می‌شود، اولین و اصلی‌ترین قله (پیک) متناسب با فرکانس اصلی سیستم که در هر دو راستا منتها با دامنه‌های متفاوت دیده می‌شود در فرکانس $1/83$ هرتز قرار گرفته است. قله دوم در هر دو راستا در فاصله بسیار نزدیک با قله اول در فرکانس $1/95$ هرتز قرار دارد. دامنه قله (پیک) اول در امتداد

که معادل زمانی آن $81/92$ ثانیه می‌باشد استفاده می‌شود. مقدار همپوشانی پنجره‌های زمانی معادل نصف زمانی هر بازه یعنی $40/96$ ثانیه انتخاب می‌شود. انتخاب تعداد داده‌ها با نمای ۲ جهت سهولت پردازش داده‌ها و انتقال آنها به محدوده فرکانسی می‌باشد. با این کار هر رکورد ثبت شده ۳۰ دقیقه‌ای به ۲۲ رکورد با طول $81/92$ ثانیه تبدیل شده که هر کدام به شکل مجزا قابل بررسی می‌باشد. در این صورت می‌توان پراکندگی نتایج به دست آمده را نیز بررسی کرده و از صحت نتایج اطمینان حاصل کرد.

تبدیل فوریه (منحنی پاسخ فرکانسی) ۲۲ رکورد کوتاه شده در دو راستای متعامد اصلی جانبی مخزن هوایی آب در شکل ۶ و میانگین منحنی‌های پاسخ فرکانسی (تبدیل فوریه) در دو راستای اصلی در

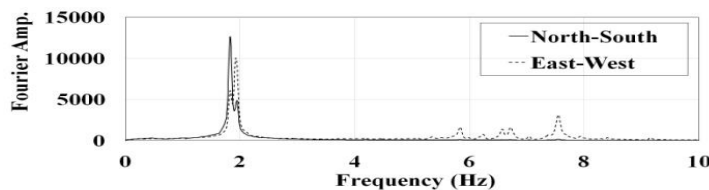


(الف)

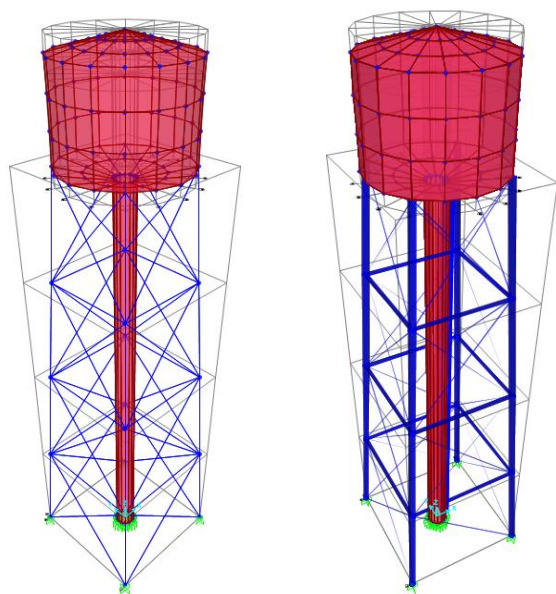


(ب)

شکل ۶. تبدیل فوریه رکوردهای کوتاه شده در دو راستای اصلی (الف) شمالی-جنوبی، (ب) شرقی-غربی
Fig. 6. Fourier transform of the records in (a) north-south, and (b) east-west direction



شکل ۷. مقایسه منحنی میانگین تبدیل فوریه رکوردهای کوتاه شده در دو راستای اصلی شمالی-جنوبی و شرقی-غربی
Fig. 7. Average diagram of Fourier transforms of velocity records in two north-south and east-west directions



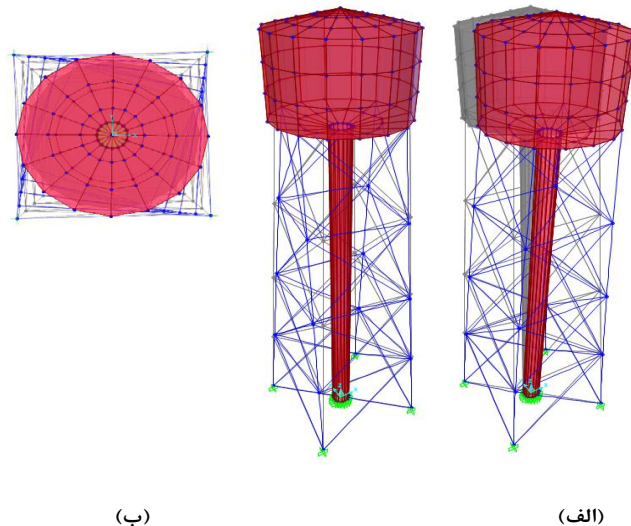
شکل ۸. مدل مخزن هوایی آب در نرم‌افزار
Fig. 8. Numerical model of the elevated water tank

مورد استفاده به همراه جرم آب ذخیره شده در تانکر آن می‌باشد. چگالی آب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب منظور شده و مقدار جرم آب با توجه به حجم متناظر با هر گره به صورت جرم افزوده متمرکز به نقاط گرهی مخزن و لوله اصلی انتقال آب متصل به آن تخصیص داده می‌شود. اتصالات سازه فضایی نگهدارنده بجز اتصالات بادبندها از نوع اتصال گیردار منظور شده و اتصالات بادبندها مفصلی منظور می‌شود. اتصال قاب به پوسته مخزن نیز از نوع گیردار می‌باشد. مدل مخزن در نرم‌افزار حول محورهای جانبی کاملاً متقارن می‌باشد. تحلیل فرکانسی سیستم در نرم‌افزار صورت گرفته و فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای سیستم تعیین می‌شود. فرکانس مودهای اول و دوم سیستم از مدل عددی مقدار $2/0.5$ هرتز به دست می‌آید. این دو فرکانس در واقع فرکانس اول طبیعی سیستم در راستای جانبی می‌باشد که با توجه به تقارن مدل در دو جهت دیده می‌شود. مقدار بدست آمده با نتایج بدست آمده از آزمایش‌های ارتعاش محیطی مخزن برای فرکانس پایه حدود ۱۰٪ اختلاف نشان می‌دهد. با این اوصاف، دو مقدار بدست آمده از نتایج آزمایش ارتعاش محیطی در دو راستای مختلف در واقع فرکانس‌های مود اول سیستم در راستای جانبی می‌باشند که به علت عدم تقارن کامل مخزن آب و همچنین جهت‌گیری حسگر سرعت‌سنج اندکی با هم تفاوت دارند. از علل دیگر

شمالی-جنوبی و دامنه قله دوم در راستای شرقی-غربی غالب است. قله‌های کوچکتر متناظر می‌تواند ناشی از اثرپذیری یک راستا از لرزش در راستای دیگر باشد. این امر با استفاده از مدل عددی مخزن مورد بررسی بیشتر قرار خواهد گرفت. قله (پیک) های بعدی سیستم با دامنه بسیار کمتر در راستای شرقی-غربی و در فرکانس‌های بالاتر از ۵ هرتز مشاهده شدند. این امر نشان از عدم تقارن کامل سازه مخزن هوایی آب ساخته شده دارد. هرچند عدم جهت‌گیری کامل سنسور سرعت سنج در امتداد شمالی-جنوبی و در راستای قاب‌های نگهدارنده سازه مخزن نیز در این امر بی‌تاثیر نیست. همانگونه که دیده می‌شود قله اول نمودارهای فرکانسی (مود اول سیستم) در مقایسه با قله‌های بعدی (مودهای بالاتر) غالب بوده که این امر نشان از رفتار عمدتاً تک‌درجه آزادی مخزن هوایی آب دارد که با فیزیک مساله همخوانی دارد.

۵- مدل‌سازی عددی و اعتبارسنجی

با توجه به مشخصات برداشت شده از هندسه مخزن هوایی آب در حالت موجود، اقدام به مدل‌سازی عددی مخزن در نرم‌افزار SAP2000 با استفاده از روش تحلیل ماتریسی گردید. مشخصات هندسی سیستم شامل مخزن، لوله اصلی انتقال آب و سازه نگهدارنده (قاب فضایی) در بخش ۲ توضیح داده شد که بر اساس آن مدل ساخته شده در شکل ۸ نشان داده شده است. تانکر مخزن و لوله اصلی انتقال آب با استفاده از المانهای پوسته نازک خطی مدل‌سازی می‌شود. برای مخزن از ۱۱۲ المان استفاده می‌شود. برای سازه نگهدارنده مخزن شامل پروفیل‌های افقی و قائم و همچنین بادبندها از المانهای قاب خطی استفاده شده است. شرایط مرزی در پایه سازه نگهدارنده و همچنین لوله اصلی انتقال آب با توجه به وضعیت موجود به صورت کاملاً گیردار منظور می‌شود. در این حالت پی بتنی زیر مخزن در واقع به شکل صلب در نظر گرفته شده است. این فرضیات با توجه به دامنه ارتعاشات محیطی وارد به مخزن معقول می‌باشد. با توجه به سال ساخت مخزن و مصالح مورد استفاده در آن زمان، مشخصات فولاد مورد استفاده از نوع فولاد نرمة معمولی ST37 با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال، چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، و نسبت پواسون 0.25 در نظر گرفته شد. سختی سیستم از روی مشخصات مقاطع و مصالح فولاد مورد استفاده تعیین می‌شود. جرم سیستم شامل وزن مرده مقاطع فولادی



شکل ۹. شکل مود مخزن هوایی آب در نرم‌افزار (الف) مود اول، (ب) مود دوم
 Fig. 9. Mode shapes of the water tank: (a) first mode, (b) second mode

تقریب عمومی مخازن هوایی آب با سازه‌های تکدرجه آزادی سازگاری دارد.

براساس نتایج بدست آمده، سازه مخزن هوایی آب انتخاب شده می‌تواند با یک سازه تکدرجه آزادی با فرکانس طبیعی ۲ هرتز تقریب زده شود. جرم عمده سیستم در محل تانکر شامل پوسته مخزن (تقریباً ۲۷۰۰ کیلوگرم) و جرم آب داخل آن (تقریباً ۳۱۴۰۰ کیلوگرم) می‌باشد. با این اوصاف مقدار سختی جانبی قاب فضایی نگهدارنده مخزن مقدار ۱۳۶ کیلو نیوتن بر متر خواهد بود. با توجه به اینکه نشانه‌های مشهودی از زنگ زدگی، خوردگی و یا زوال در سازه نگهدارنده دیده نمی‌شود، مقدار بدست آمده از مدلسازی عددی در گام اول در تطابق مناسب با نتایج اندازه‌گیری محیطی قرار دارد.

۶- نتیجه‌گیری

مقاله حاضر به بررسی امکان استفاده از آزمایش‌های ارتعاش محیطی برای شناسایی سیستم‌های سازه‌ای مخازن هوای آب می‌پردازد. برای رسیدن به این هدف، مخزن هوایی آب مستقر در محوطه دانشگاه تربیت مدرس برای انجام آزمایش‌های ارتعاش محیطی انتخاب گردید. این مخزن با استفاده از حسگر سرعت سنج بسیار حساس لرزه‌ای (میکروترومر) ابزاربندی شده و سیگنال سرعت محیطی آن در مدت زمان ۳۰ دقیقه در سه راستای اصلی ثبت گردید. دقت تبدیل دستگاه ثبات داده ۲۴ بیت می‌باشد که دقت بالایی برای

ایجاد اختلاف بین نتایج تئوری و اندازه‌گیری محیطی می‌توان به ایده‌آل سازی‌های مدلسازی عددی به خصوص نحوه مدلسازی آب داخل مخزن به شکل جرم افزوده اشاره کرد. هرچند با در نظرگیری جرم ثابت بین مدل و واقعیت، اختلاف بدست آمده در فرکانس پایه سیستم نشان از اختلاف ۱٪ بین سختی جانبی سیستم در مدل تئوری و اندازه‌گیری محیطی دارد.

فرکانس مود بعدی سیستم از مدل عددی مقدار ۶/۷۰ هرتز می‌باشد که در واقع یک شکل مود پیچشی می‌باشد. شکل مودهای بدست آمده از مدل عددی در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. این مقدار نیز تطابق مناسبی با نتایج بدست آمده از آزمایش ارتعاش محیطی مخزن هوایی آب دارد. از آنجا که حسگر سرعت سنج در ضلع شمالی مخزن در کنار تانکر آب قرار داده شده است، این شکل مود پیچشی با توجه به مولفه جهتی آن که در محل قرارگیری سنسور تنها در راستای شرقی-غربی می‌باشد، تنها در این امتداد قابل شناسایی خواهد بود که این امر در شکل ۷ مشهود است. این مطلب نشان از اعتبارسنجی مدل عددی تولید شده در نرم‌افزار دارد.

شکل مودهای جانبی سیستم (مود اول) در مدل عددی دارای جرم موثری به مراتب بالاتر از مود پیچشی (مود دوم) هستند. این مطلب سبب می‌شود تا پاسخ دینامیکی مخزن هوایی عمدتاً در مود اول (حرکت جانبی) ظهور یابد که سیگنال ارتعاش محیطی مخزن هوایی آب در شکل ۵ مویید این نکته است. این امر با فیزیک مساله و

- [6] Salehi S, Davoudi M, Kalani L. Analysis of steel elevated water tanks considering water-structure interaction under earthquakes. 6th National Congress for Civil Engineering, 1390.
- [7] Curadelli, O., Ambrosini, D., Mirasso, A., & Amani, M. (2010). Resonant frequencies in an elevated spherical container partially filled with water: FEM and measurement. *Journal of Fluids and Structures*, 26(1), 148-159.
- [8] Shakib H, Menbari F, Fooladvand A. Investigating seismic performance of elevated water tanks considering soil-structure interaction. 3rd International Conference of Structural and Earthquake Engineering, 1391.
- [9] Poorbagheri H, Ashtari P, Seyedrazaghi M. Water-structure interaction using finite element method for potential and displacement related components in elevated water tanks. 6th National Congress for Civil Engineering, 1390.
- [10] Shenton, H. W., & Hampton, F. P. (1999). Seismic response of isolated elevated water tanks. *Journal of Structural Engineering*, 125(9), 965-976.
- [11] Ashtari P, Seyedrazaghi M, Poorbagheri H. Investigating water and tank interaction for different tank shapes. 6th National Congress for Civil Engineering, 1390.
- [12] Hirde, Suchita, Asmita Bajare, and Manoj Hedao. "Seismic performance of elevated water tanks." *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, IJAERS* 1 (2011): 78-87.
- [13] Ghanem, R., & Shinozuka, M. (1995). Structural-system identification. I: Theory. *Journal of Engineering Mechanics*, 121(2), 255-264.
- [14] Alvin, K. F., Robertson, A. N., Reich, G. W., & Park, K. C. (2003). Structural system identification: from reality to models. *Computers & structures*, 81(12), 1149-1176.
- [15] Bahar O, Yadegari J. Identification of modal

استفاده در سازه‌های عمرانی با دامنه‌های نوسانی پایین می‌باشد. ارتعاش محیطی مخزن هوایی آب ناشی از وزش باد و همچنین ترافیک عبوری از بزرگراه مجاور آن می‌باشد. مقدار دامنه سرعت ثبت شده برای تانکر آب تا ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه (۳ سانتی‌متر بر ثانیه) می‌رسد. با استفاده از روش جستار قله (برداشت پیک)، فرکانس اول مخزن حدوداً ۱/۹ هرتز تعیین شد. هرچند به علت عدم تقارن کامل سازه و همچنین جهت‌گیری سنسور، فرکانس‌های شناسایی شده در دو راستای متعامد تا ۵٪ با هم اختلاف دارند. فرکانس‌های بالاتر مخزن هوایی در مقادیر بالای ۵ هرتز و در راستای شرقی-غربی مشاهده شد. سپس با توجه به داده‌های موجود اقدام به مدل‌سازی عددی مخزن هوایی آب در نرم‌افزار SAP2000 و اعتبارسنجی آن گردید. در مدل‌سازی اولیه مقدار فرکانس‌های طبیعی تعیین شده از نرم‌افزار در تطابق مناسبی با فرکانس‌های یافته شده از اندازه‌گیری‌های میدانی دارد که نشان از مدل‌سازی صحیح و کالیبره شده مخزن در نرم‌افزار دارد.

مراجع

- [1] Housner, George W. "The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes." *Bulletin of the seismological society of America* 53.2 (1963): 403-417.
- [2] Haroun, M.A. (1984), "Stress analysis of rectangular walls under seismically induced hydrodynamic loads", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 1031-1041.
- [3] Kim, J.K., Koh, H.M. and Kwahk, I.J. (1996), "Dynamic response of rectangular flexible fluid containers", *J. Engng. Mech., ASCE*, 122, 807-817.
- [4] Livaoglu, R., and A. Dogangun. "Effect of foundation embedment on seismic behavior of elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27.9 (2007): 855-863.
- [5] Livaoglu, R., and A. Dogangun. "Simplified seismic analysis procedures for elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction." *Journal of fluids and structures* 22.3 (2006): 421-439.

- behaviour. *Structural Safety*, 48, 33-39.
- [19] Amezquita-Sanchez, J. P., & Adeli, H. (2016). Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(1), 1-15.
- [20] Reynders, E., Wursten, G., & De Roeck, G. (2014). Output-only structural health monitoring in changing environmental conditions by means of nonlinear system identification. *Structural Health Monitoring*, 13(1), 82-93.
- [21] Khatibi M, Moradi M, Ashoori M. Ambient vibration analysis of structures using frequency decomposition methods. 14th Students Civil Engineering Conference, 1387.
- parameters based on ambient data using SIP. *Magazine of Civil Engineering and Survey*, Vol 44, No 1, pp. 121-130, 1389.
- [16] Yarnold, M. T., Moon, F. L., & Emin Aktan, A. (2015). Temperature-based structural identification of long-span bridges. *Journal of Structural Engineering*, 141(11), 04015027.
- [17] Astroza, R., Ebrahimian, H., Conte, J. P., Restrepo, J. I., & Hutchinson, T. C. (2016). System identification of a full-scale five-story reinforced concrete building tested on the NEES-UCSD shake table. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(3), 535-559.
- [18] Ranković, V., Grujović, N., Divac, D., & Milivojević, N. (2014). Development of support vector regression identification model for prediction of dam structural

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Alembagheri, tank using ambient vibration test and validation of numerical model, Amirkabir J. Civil Eng., 51(6) (2020) 1177-1186.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14331.5625](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14331.5625)

