رساله دکتری

بررسی رفتار دینامیکی مخازن مستطیلی بتنی ذخیره آب

دانشجو

امیر صمد قدس

دانشجوی دکتری سازه، گروه عمران

استاد راهنما

دکتر محمد رضا اصفهانی

گروه عمران

دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

تابستان 1390

اینجانب امیر صمد قدس گواهی می‌نمایم که تمامی مطالب موجود در این رساله حاصل تحقیق و پژوهش انجام گرفته در دوره دکترای اینجانب بوده و هر جا که از روابط، نکات و نتایج پژوهش‌های دیگران بهره‌جویی شده است، مرجع مورد استفاده مشخص می‌باشد.

امضاء دانشجو

سپاسگزاری

جای آن است در ابتدا از زحمت های دلسوزانه و بی دریغ پدر و مادر ارجمندم که در تمام مراحل دانش‌آموزی و دانشجوئی مشوق من بوده اند، صمیمانه قدردانی کنم. اکنون که به یاری پروردگار یگانه، این پایان نامه به اتمام رسیده است، از زحمات بی‌دریغ استاد راهنمای بزرگوارم، جناب آقای دکتر محمدرضا اصفهانی نهایت سپاس و تشکر را دارم که در همه مدت انجام این کار پژوهشی با راهنمایی‌های ارزشمند، بسیار یاریم کردند. سپاسگزار زحمات بی‌دریغ استاد ارجمندم جناب آقای دکتر کرم‌الدین هستم که آموخته‌هایم از ایشان در کارهای پژوهشی و کار در آزمایشگاه دینامیک سازه همیشه راهگشا بوده‌اند. استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر آفتابی ثانی با راهنمایی‌های گرانمایه‌شان دیدگاه‌های نوینی را در این کار پژوهشی برایم گشودند و همواره با انگیزه‌های تازه‌ای در رفع مشکلات علمی و پژوهشی‌ام کوشیدند، زحماتشان را سپاس می‌گویم. از استادان ارجمند جناب آقای دکتر عطارنژاد ، جناب آقای دکتر شریعتمدار و جناب آقای دکتر معتکف که زحمت بررسی این کار پژوهشی را پذیرفتند و در ارائه بهتر این پایان‌نامه مساعدت فرمودند، کمال سپاس و تشکر را دارم.

چکیده

برای بالا بردن دقت تحلیل دینامیکی مخازن ذخیره آب، بررسی مشخصه‌ها و رفتار ارتعاشی سیستم آب و سازه از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. در این پایان‌نامه به منظور بررسی رفتار ارتعاشی مخازن ذخیره آب، دو مخزن مستطیلی بتنی به صورت مخزن کامل و مخزن U شکل ساخته و برای حالت‌های مختلف ارتفاع آب، آزمایش مودال بر روی آن انجام شد. در بخش تحلیلی، یک برنامه از روش اجزای محدود به زبان فرترن تهیه شده و به کمک آن مخازن ساخته شده در آزمایشگاه مدل شدند و نتایج آن با پاسخ‌های آزمایش مقایسه و مطابقت خوبی مشاهده گردید. بر اساس نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی با زیاد شدن ارتفاع آب درون مخزن، مقادیر فرکانس‌ها کاهش داشته در صورتیکه درصد میرایی افزایش می‌یابد. در مورد رابطه افزایش ارتفاع آب در مخزن و کاهش فرکانس‌ها و افزایش میرایی در این بخش از پژوهش بحث و بررسی شده است. همچنین در تحلیل، اثر امواج سطحی بر روی نتایج وابسته به ارتعاشِ آزاد در حوزه فرکانس، یعنی فرکانس‌های طبیعی، شکل‌مودها و توابعِ پاسخِ فرکانسی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج تحلیل‌ها، در نظر گرفتن امواج سطحی منجر به پدیدار شدن تعداد زیادی فرکانس‌های مربوط به بخش مواج و اعمال فشارهای دینامیکی در قسمت‌های بالایی مخزن نسبت به حالت نبود امواج سطحی می‌شود.

محاسبه فشار هیدرودینامیکی مهمترین مسئله در تحلیل سیستم‌های آب و سازه می‌باشد. در آیین‌نامه‌های طراحی، فشار هیدرودینامیکی آب بر روی بدنه مخزن با فرض صلب بودن دیوارها بدست می‌آید. در این پژوهش، به منظور در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری دیوارها در محاسبه فشار هیدرودینامیکی و در تحلیل دینامیکی سازه، از یک روش پیشنهادی اجزای محدود به صورت حل گام‌به‌گام در حوزه زمان استفاده شده است. پس از تحلیل تاریخچه زمانی تحت شتاب افقی زمین، پاسخ‌های دینامیکی شامل تغییرمکان‌ها، برش‌های پایه و فشارهای هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفتند. از مقایسه پاسخ‌ها نتیجه گرفته می‌شود که استفاده از روش جرم افزوده که توسط آیین‌نامه‌ها بر پایه مدل هاسنر پیشنهاد شده است، محافظه کارانه می‌باشد.

ارائه تحلیل‌های دقیق با استفاده از حل مستقیم و غیر عددی معادلات دیفرانسل حاکم بر مسئله از اهمیت زیادی برخوردار است. پاسخ بدست آمده از حل دقیق، معیار و محک مطمئنی برای سنجش دقت روش عددی مورد بررسی و یا هر روش عددی دیگر خواهد بود. همچنین آشکار است به دلیل بزرگی مجموعه و تعداد درجات آزادی فراوان موجود در روش عددی اجزای محدود، زمان لازم برای دستیابی به پاسخ عددی سیستم قابل توجه می‌باشد. باید دانست که در نظر گرفتن اندرکنش سازه – سیال نیز سبب افزایش زمان اجرای برنامه و کاهش کارایی آنها می‌گردد. بنابراین شایسته خواهد بود که با ارائه روش‌های کارا و مؤثری برای تحلیل مسئله، بتوان دقت مورد نیاز را تأمین کرد و زمان اجرای برنامه‌ها را کاهش داد. در همین راستا، در این پژوهش مسئله ارتعاش آزاد و اجباری سازه انعطاف‌پذیر و سیال تراکم‌پذیر در دو حالتِ بود و نبود امواج سطحی، در محیطی دوبعدی با دو شیوه دقیق و عددی حل شده است. این محیط دوبعدی، یک مخزن مستطیلی با دو دیوار انعطاف‌پذیر و کف صلب می‌باشد که سطح آن می‌تواند دارای امواج سطحی نیز باشد.

این تحلیل‌ها، همگی در حوزه فرکانس، با فرض رفتار خطی به انجام می‌رسند که با استفاده از تبدیلات فوریه پاسخ‌ها را می‌توان به حوزه زمان نیز منتقل کرد. در پایان، نتایج حاصل از روش عددی اجزای محدود با پاسخ‌های دقیق مقایسه شده و دقت روش عددی مزبور مورد سنجش و ارزیابی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: آزمایش مودال، امواج سطحی، اندرکنش سازه-سیال، انعطاف‌پذیری دیوارها، تحلیل دقیق در حوزه فرکانس، روش اجزای محدود، سیال تراکم‌پذیر، مخازن مستطیلی بتن آرمه.

فهرست

لیست شکل‌ها ..... أ

لیست جدول‌ها ..... خ

فصل اول ۱۶

مقدمه ۱۶

۱-۱- پیشگفتار ۱۶

۱-۲- اهداف و ساماندهی پایان‌نامه ۱۸

۱-۳- خلاصه فصل یکم ۲۱

فصل دوم ۲۲

مخازن ذخیره مایعات ۲۲

۲-۱- پیشگفتار ۲۲

۲-۲- مبانی نظری لازم ۲۵

۲-۲-۱- اندرکنش سازه و سیال ۲۶

۲-۲-۲- تحلیل عددی دینامیکی مخازن مستطیلی ۲۶

۲-۲-۳- تکنیک‌های تحلیل دینامیکی ۲۶

۲-۲-۴- تبدیلات فوریه ۲۷

۲-۳- آزمایش مودال ۲۷

۲-۴- مرور مقالات ۳۲

۲-۴-۱- حرکت امواج سطحی ۳۲

۲-۴-۲- فشار هیدرودینامیکی ۳۵

۲-۴-۳- پژوهش‌های آزمایشگاهی بر روی مخازن ۳۶

۲-۵- خلاصه فصل دوم ۳۸

فصل سوم ۴۰

تحلیل اجزای محدود و بررسی آزمایشگاهی رفتار ارتعاشی مخازن مستطیلی ۴۰

۳-۱- پیشگفتار ۴۰

۳-۲-تحلیل عددی دینامیکی مخازن مستطیلی ۴۰

۳-۲-۱- معادلات حاکم بر سازه ۴۰

۳-۲-۲- معادلات حاکم بر آب ۴۱

۳-۲-۳-معادلات اندرکنش آب و سازه ۴۳

۳-۳-آزمایش مودال ۴۵

۳-۳-۱- ابزار آزمایش مودال ۴۶

۳-۳-۲- تعیین پارامترهای مودال ۴۸

۳-۴- نمونه‌های آزمایشی و نتایج ۴۹
۳-۴-۱- مخزن U شکلِ مستطیلیِ فولادی ۴۹
۳-۴-۲- مخزن U شکلِ مستطیلیِ بتنی ۵۲
۳-۴-۳- مخزن مستطیلی بتنی ۶۰
۳-۵- خلاصه فصل سوم ۶۹
فصل چهارم ۷۱
تعیین پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن مستطیلی به روش تحلیلی گام‌به‌گام ۷۱
۴-۱- پیشگفتار ۷۱
۴-۲- رابطه فشار دینامیکی با اثر انعطاف‌پذیر دیوارها ۷۱
۴-۳- روش تحلیلی پشنهادی ۷۴
۴-۴- نتایج تحلیلی ۷۶
۴-۴-۱- مخزن خالی ۷۸
۴-۴-۲- مخزن پر از آب ۸۰
۴-۵- بررسی اثر مقطع دیوار و نسبت میرایی بر روی پاسخ‌ها ۸۴
۴-۶- خلاصه فصل چهارم ۹۰
فصل پنجم ۹۱
حل دقیق معادله نوسان آزاد و اجباری سیال تراکم‌پذیر در مخازن مستطیلی ۹۱
۵-۱-پیشگفتار ۹۱
۵-۲- تعریف مسأله مقدار مرزی سیال مرتعش ۹۱
۵-۲-۱- معادله دیفرانسیل ۹۲
۵-۲-۲- شرایط مرزی ۹۳
۵-۳- تحلیل دقیق و غیرعددی نوسان آزاد ۹۴
۵-۳-۱- نبود امواج سطحی ۹۵
۵-۳-۲- وجود امواج سطحی ۹۷
۵-۳-۳- اثر تراکم‌پذیری سیال ۱۰۰
۵-۳-۴- روش اجزای محدود ۱۰۲
۵-۳-۵- نتایج عددی ۱۰۴
۵-۴- تحلیل دقیق و غیرعددی نوسان اجباری ۱۱۲
۵-۴-۱- نبود امواج سطحی ۱۱۳
۵-۴-۲- وجود امواج سطحی ۱۱۵
۵-۴-۳- روش اجزای محدود ۱۲۰
۵-۴-۴- نتایج عددی ۱۲۰

۵-۴-۱- نتایج عددی در حوزه فرکانس ۱۲۱
۵-۴-۲- نتایج عددی در حوزه زمان ۱۲۳
۵-۵- خلاصه فصل پنجم ۱۲۸
فصل ششم ۱۲۹
حل دقیق مسأله اندرکنش سازه انعطاف‌پذیر ـ سیال تراکم‌پذیر ۱۲۹
۶-۱- پیشگفتار ۱۲۹
۶-۲- معرفی مسأله مقدار مرزی ۱۳۰
۶-۲-۱- معادله و شروط مرزی حاکم بر سیال ۱۳۰
۶-۲-۲- معادله و شرایط مرزی حاکم بر سازه ۱۳۱
۶-۲-۳- شروط مرزی اندرکنشی ۱۳۳
۶-۳- حل دقیق ریاضی با فرض نبود امواج سطحی ۱۳۴
۶-۳-۱- روش اجزای محدود ۱۴۱
۶-۳-۲- نتایج عددی ۱۴۲
۶-۴- حل دقیق ریاضی با در نظر گرفتن امواج سطحی ۱۵۱
۶-۴-۱- روش اجزای محدود ۱۶۱
۶-۴-۲- نتایج عددی ۱۶۲
۶-۴-۲-۱- نتایج عددی در حوزه فرکانس ۱۶۳
۶-۴-۲-۲- نتایج عددی در حوزه زمان ۱۶۸
۶-۵- خلاصه فصل ششم ۱۷۰
فصل هفتم ۱۷۲
نتیجه‌گیری ۱۷۲
پیشگفتار ۱۷۲
۱- آزمایش مودال بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی اجزای محدود ۱۷۲
۲- تحلیل تاریخچه زمانی مخازن (روش گام‌به‌گام) ۱۷۳
۳- حل دقیق مسأله اندرکنش سازه ـ سیال در مدل دوبعدی مخزن ۱۷۵
پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده ۱۷۷
مراجع ۱۷۸
پیوست- جزئیات پارامترهای موجود در رابطه (۶-۴۹) ۱۸۳

فهرست شکل‌ها

شکل۱-۱- مدل جرم هیدرودینامیکی افزوده وسترگارد [1] برای سدها ۵

شکل۱-۲- مدل دینامیکی هاسنر [2] ۵

شکل۲-۱- (الف) مخازن زمینی، (ب) مخازن هوایی ۱۰

شکل۲-۲- نمونه‌ای از مخازن ذخیره مایعات (الف) استوانه‌ای، (ب) مستطیلی ۱۱

شکل۲-۳- کمانش الماسی شکل در مخازن [15] ۱۱

شکل۲-۴- تغییر شکل پافیلی در مخزن فولادی [15] ۱۲

شکل۲-۵- مخزن فولادی آتش گرفته در ترکیه سال ۱۹۹۹[16] ۱۲

شکل۲-۶- خسارت در مخزن ذخیره آب هوایی بتنی با حجم ۷۰۰۰۰۰ لیتر [17] ۱۳

شکل۲-۷- اساس کار تحلیل‌گرهای رقمی [22] ۱۷

شکل۲-۸- اندازه‌گیری FRF ها روی یک سازه [24] ۱۹

شکل۲-۹- نمودار پاسخ در دامنه فرکانسی(FRF) [24] ۱۹

شکل۲-۱۰-تقسیم بندی امواج سطحی [14] ۲۲

شکل۲-۱۱- دستگاه آزمایشی برای مخزن مستطیلی ۲۴

شکل۲-۱۲- مخزن کروی هوایی [52] ۲۶

شکل۳-۱- وسایل تحریک کننده مورد مصرف در آزمایش ۳۵

شکل۳-۲- شتاب سنج سه جهته ۳۵

شکل۳-۳-تحلیل گر دو کاناله ۳۶

شکل۳-۴- نرم‌افزار STAR برای بدست آوردن پارامترهای مودال نمونه‌های آزمایشگاهی ۳۶

شکل۳-۵- دستگاه و نمونه آزمایشی نمونه فولادی ۳۷

شکل۳-۶- تعداد و محل درجات آزادی تعریف شده بر روی دیوار مخزن فولادی ۳۸

شکل۳-۷- نمودارهای Coherence و FRF ۳۹

شکل۳-۸- سه شکل مود خمشی آزمایشی دیوارهای مخزن فولادی ۳۹

شکل۳-۹- نحوه آرماتوربندی مخزن U شکلِ بتنی ۴۱

شکل۳-۱۰- دستگاه و نمونه آزمایشی نمونه U شکلِ بتنی ۴۱

شکل۳-۱۱- نمودار و Coherence نمونه آزمایشی U شکلِ بتنی ۴۲

شکل۳-۱۲- نمودارFRF برای مخزن خالی و ارتفاع‌های مختلف پر از آب در محدوده فرکانس مود اول خمشی ۴۳

شکل۳-۱۳- دو شکل مود آزمایشی دیوارهای مخزن U شکلِ بتنی ۴۳

شکل۳-۱۴- نمایش برداری سه شکل مود آزمایشی دیوارهای مخزن پر U شکلِ بتنی ۴۴

شکل۳-۱۵- مدل شماتیک اجزای محدود مخزن دو بعدی ۴۴

شکل۳-۱۶- نمودار FRF تحلیلی برای مخزن U شکلِ بتنی در حالت خالی و پر از آب ۴۶

شکل۳-۱۷- روند کاهش فرکانس مود اول و دوم خمشی با افزایش ارتفاع آب داخل مخزن U شکلِ بتنی ۴۷

شکل۳-۱۸- کانتور فشار آب برای برای مخزن U شکلِ بتنی ۴۷

شکل۳-۱۹- آرماتور و قالب‌بندی مخزن بتنی ۴۸

شکل۳-۲۰- دستگاه و نمونه آزمایشی مخزن بتنی ۴۸

شکل۳-۲۱- نمودار FRF و Coherence نمونه آزمایشی ۴۹

شکل۳-۲۲- نمودارFRF برای مخزن خالی و ارتفاع‌های مختلف پر از آب ۵۰

شکل۳-۲۳- نمودار بخش حقیقی و موهومی برای تعیین درصد میرایی ۵۱

شکل۳-۲۴- مدل المان محدود مخزن مستطیلی ۵۱

شکل۳-۲۵- شکل‌مود اول خمشی آزمایشگاهی و تحلیلی دیوارهای مخزن پر از آب ۵۲

شکل۳-۲۶- شکل‌مود دوم خمشی آزمایشگاهی و تحلیلی دیوارهای مخزن پر از آب ۵۳

شکل۳-۲۷- روند کاهش فرکانس با افزایش ارتفاع آب داخل مخزن ۵۴

شکل۳-۲۸- نمودار FRF تحلیلی با ضرایب مختلف بتا ۵۵

شکل۳-۲۹- وضعیت توزیع فشار با در نظر گرفتن اثر امواج سطحی ۵۷

شکل۴-۱- هندسه مخزن مستطیلی (الف)مدل سه بعدی و (ب)مدل دو بعدی[11] ۶۰

شکل۴-۲- مدل المان محدود مخزن مستطیلی[11] ۶۱

شکل۴-۳- مدل المان محدود مخزن ۶۴

شکل۴-۴- شتاب ثبت شده زلزلهImperial Valley 1940 ۶۵

شکل۴-۵- سه مدل مخزن خالی از آب ۶۶

شکل۴-۶- نمودار تغییرمکان سر آزاد دیوار سه مدل مخزن خالی از آب ۶۸

شکل۴-۷- شش مدل مخزن پر از آب ۶۹

شکل۴-۸- نمودار تغییرمکان سر آزاد دیوار سه مدل مخزن پُر از آب ۷۱

شکل۴-۹- (الف) تغییرات شتاب (ب)- فشار هیدرودینامیکی در ارتفاع دیوار مخزن ۷۲

شکل۴-۱۰- شش مدل مختلف از دیوارهای مخزن ۷۲

شکل۴-۱۱- نمودار تغییر مکان-زمان مدل‌های اول، دوم، سوم و چهارم ۷۳

شکل۴-۱۲- الف- تغییرات شتاب دیوارهای مخزن ب- فشار هیدرودینامیکی ۷۴

شکل۴-۱۳- الف)توزیع فشار هیدرودینامیکی ب) شتاب بدنه مخزن ج) منحنی وابستگی این دو پارامتر برای مدل دوم ۷۵

شکل۴-۱۴-توزیع فشار هیدرودینامیکی برای مدل سوم و پنجم ۷۶

شکل۴-۱۵- توزیع فشار هیدرودینامیکی برای مدل دوم برای نسبت‌های مختلف میرایی ۷۷

شکل۴-۱۶- نمودار تغییرات زمان-برش‌پایه مدل دوم برای نسبت‌های مختلف میرایی ۷۷

شکل۵-۱- مخزن مستطیلی با دو جداره و کف صلب و سطح فوقانی آزاد یا مواج ۸۱

شکل۵-۲- نمودارهای توابع (۵-۱۹) و (۵-۲۴) ۸۷

شکل ۵-۳- مدل المانهای محدود سیال ۹۱

شکل ۵-۴- شکل مود اول در حالت چشم‌پوشی از اثر امواج سطحی ۹۳

شکل ۵-۵- شکل مود چهاردهم در حالت چشم‌پوشی از اثر امواج سطحی ۹۳

شکل ۵-۶- شکل مود دوم مربوط به بخش سخت با در نظر گرفتن اثر امواج سطحی ۹۴

شکل ۵-۷- شکل مود اول مربوط به بخش مواج با در نظر گرفتن اثر امواج سطحی ۹۶

شکل ۵-۸- شکل مود دوم مربوط به بخش مواج با در نظر گرفتن اثر امواج سطحی ۹۶

شکل۵-۹- ارتفاع موج در سطح سیال ($y=0$) بر اساس شکل مودهای اول تا سوم بخش مواج ۹۷

شکل ۵-۱۰- توزیع فشار بخش سخت در $x=0$ بدون در نظر گرفتن اثر امواج سطحی ۹۷

شکل ۵-۱۱- توزیع فشار بخش مواج در $x=0$ با در نظر گرفتن اثر امواج سطحی ۹۸

شکل ۵-۱۲- نمودار اثر سرعت موج بر چهار فرکانس طبیعی نخست بخش مواج (روش پیشنهادی) ۹۹

شکل۵-۱۳- نمودار اثر سرعت موج بر چهار فرکانس طبیعی نخست بخش سخت (روش پیشنهادی) ۱۰۰

شکل ۵-۱۴- مخزن مستطیلی با دو جداره و کف صلب و سطح فوقانی آزاد یا موّاج تحت نوسان اجباری ۱۰۱

شکل۵-۱۵- وضعیت فشار به ازاءِ $\omega=60$ رادیان‌برثانیه ۱۰۹

شکل۵-۱۶- وضعیت فشار به ازاءِ $\omega=1.5$ رادیان‌برثانیه ۱۰۹

شکل۵-۱۷- وضعیت فشار به ازاءِ $\omega=5$ رادیان‌برثانیه ۱۱۰

شکل۵-۱۸- تابع پاسخ فرکانسی نقطه‌ای با مختصاتِ $x=0$ و $y=5$ متر برای محدوده $\omega=1250$ رادیان‌برثانیه ۱۱۰

شکل۵-۱۹- تابع پاسخ فرکانسی نقطه‌ای با مختصاتِ $x=0$ و $y=5$ متر برای محدوده $\omega=8$ رادیان‌برثانیه ۱۱۱

شکل۵-۲۰- تابع پاسخ فرکانسی نقطه‌ای با مختصات $x=0$ و $y=5$ متر برای محدوده $\omega=60$ رادیان‌برثانیه ۱۱۱

شکل۵-۲۱- شتابنگاشت مؤلفه S69E زلزله ۱۹۵۲ Taft در حوزه زمان ۱۱۲

شکل۵-۲۲- شتاب‌نگاشت مؤلفه S69E زلزله ۱۹۵۲ Taft در حوزه فرکانس ۱۱۲

شکل۵-۲۳- تغییرات فشار در طول زمان در نقطه $x=0, y=5$ متر در دو حالت بود و نبود امواج سطحی ۱۱۳

شکل۵-۲۴- توزیع فشار دینامیکی بر روی دیوار مخزن در حالت نبود امواج سطحی در زمان $t=1s$ ۱۱۳

شکل۵-۲۵- توزیع فشار دینامیکی بر روی دیوار مخزن در حالت وجود امواج سطحی در زمان $t=9s$ ۱۱۴

شکل۵-۲۶- توزیع فشار دینامیکی بر روی دیوار مخزن در حالت وجود امواج سطحی در زمان $t=2s$ ۱۱۴

شکل۵-۲۷- اثر تراکم‌پذیری سیال بر روی تغییرات فشار در طول زمان در نقطه $x=0, y=0$ ۱۱۵

شکل۵-۲۸- تغییرات ارتفاع موج در طول زمان در نقطه $x=0, y=\mathrm{H}$ ۱۱۵

۵-۲۹- وضعیت سطح آب در دو زمان مختلف ۱۱۶

شکل۶-۱- مخزن مستطیلی با دو دیوار انعطاف‌پذیر، کف صلب و سطح آزاد ۱۱۸

شکل۶-۲- دیوارهای در مجاورت سیال ۱۲۰

شکل۶-۳- نمودار FRF برای تغییرمکان سر آزاد دیوار سمت راست از دو روش پیشنهادی و FEM در بازه ۰ تا ۱۰۰ رادیان بر ثانیه ۱۳۱

شکل۶-۴- نمودار FRF برای تغییرمکان سر آزاد دیوار سمت راست از دو روش پیشنهادی و FEM در بازه ۸۰۰ تا۱۰۰۰ رادیان بر ثانیه ۱۳۱

شکل۶-۵- نمودار FRF برای تغییرمکان سر آزاد دیوار سمت راست از دو روش پیشنهادی و FEM در بازه ۸۰۰ تا۱۰۰۰ رادیان بر ثانیه با المان‌های ریز ۱۳۲

شکل۶-۶- نمودار FRF برای تغییرمکان سر آزاد دیوار سمت راست از دو روش پیشنهادی و FEM برای مخزن خالی ۱۳۳

شکل۶-۷- نمودار FRF برای تغییرمکان سر آزاد دیوار سمت راست و چپ از روش پیشنهادی برای مخزن خالی ۱۳۴

شکل۶-۸- نمودار FRF برای تغییرمکان سر آزاد دیوار سمت راست و چپ از روش پیشنهادی برای مخزن پر ۱۳۴

شکل۶-۹- نمودار FRF برای تغییرمکان سر آزاد دیوار سمت راست از روش پیشنهادی برای مخزن خالی و پر ۱۳۴

شکل۶-۱۰- نمودار FRF فشار دینامیکی از روش پیشنهادی و FEM برای مخزن با دیوارهای صلب ۱۳۵

شکل۶-۱۱- نمودار FRF فشار دینامیکی از روش پیشنهادی برای مخزن با دیوارهای صلب و انعطاف‌پذیر ۱۳۵

شکل۶-۱۲- مقایسه نمودار FRF فشار دینامیکی و تغییرمکان دیوار از روش پیشنهادی برای مخزن انعطاف‌پذیر ۱۳۶

شکل۶-۱۳- اثر انعطاف‌پذیری بر روی نمودار FRF ۱۳۷

شکل۶-۱۴- اثر تراکم‌پذیری سیال بر روی نمودار FRF ۱۳۷

شکل۶-۱۵- کانتورهای فشار دینامیکی در سیال برای چهار فرکانس مختلف از روش پیشنهادی و FEM ۱۳۸

شکل۶-۱۶- نمودار FRF تغییر مکان سر آزاد دیوار سمت راست ۱۵۲

شکل۶-۱۷- نمودار FRF تغییر مکان سر آزاد دیوار سمت راست با المان‌های زیر در روش FEM ۱۵۲

شکل۶-۱۸- نمودار FRF تغییرمکان سر آزاد دیوار سمت راست شامل فرکانس‌های بخش مواج و سخت ۱۵۳

شکل۶-۱۹- نمودار FRF برای دو حالت وجود و نبود اثر امواج سطحی ۱۵۳

شکل۶-۲۰- نمودار FRF برای مخزن پر و خالی ۱۵۴

شکل۶-۲۱- نمودار FRF فشار دینامیکی سیال برای مخزن با سختی خمشیEI و 3EI ۱۵۴

شکل۶-۲۲- نمودار FRF فشار دینامیکی سیال برای مخزن با سختی خمشی EI و 0.25EI ۱۵۴

شکل۶-۲۳- کانتور توزیع فشار در سه فرکانس مختلف ۱۵۵

شکل۶-۲۴-تغییر مکان سر آزاد دیوار سمت راست با در نظر گرفتن امواج سطحی ۱۵۶

شکل۶-۲۵-تغییر مکان سر آزاد دیوار سمت راست در حالت چشم‌پوشی از امواج سطحی ۱۵۶

شکل۶-۲۶-تغییر مکان سر آزاد دیوار سمت چپ با در نظر گرفتن امواج سطحی ۱۵۷

شکل۶-۲۷- تغییرات فشار در طول زمان در نقطه $y=0, x=0$ برای دیوارها با سختی EI ۱۵۷

شکل۶-۲۸- تغییرات فشار در طول زمان در نقطه $y=0, x=0$ برای دیوارها با سختی $0.5EI$ ۱۵۸

شکل۶-۲۹- تغییرات ارتفاع موج در طول زمان در نقطه $x=0, y=6\mathrm{m}$ برای دو حالت مخزن انعطاف‌پذیر و صلب ۱۵۸

فهرست جدول‌ها

جدول۲-۱- مدل‌های عددی حرکت امواج مایع ۲۱

جدول۳-۱- فرکانس‌های بدست آمده از آزمایش برای مخزن مستطیلی فولادی ۴۰

جدول۳-۲- فرکانس‌های مود اول و دوم خمشی آزمایشگاهی و تحلیلی مخزن U شکلِ بتنی ۴۶

جدول۳-۳- نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی برای مود اول و دوم مخزن کامل بتنی ۵۲

جدول۳-۴- درصد کاهش فرکانس مود اول با افزایش ارتفاع آب داخل مخزن نسبت به مخزن خالی ۵۴

جدول۳-۵-فرکانس‌های طبی‌عی امواج سطحی ۵۶

جدول۴-۱- مشخصات هندسه و مواد مدل تحلیلی ۶۶

جدول۴-۲- نتایج پاسخ دینامیکی برای مخزن خالی از آب ۶۸

جدول۴-۳- خواص مختلف مدل‌های مخزن پر از آب ۶۷

جدول۴-۴- خلاصه نتایج تحلیل دینامیکی مدل‌های مخزن پر از آب ۷۰

جدول۴-۵- خلاصه نتایج تحلیل دینامیکی مدل‌های مخزن با ضخامت‌های مختلف ۷۳

جدول۴-۶- برش پایه ناشی از این فشار هیدرودینامیکی و محل برآیند نیرو ۷۴

جدول۴-۷- خلاصه نتایج تحلیل دینامیکی مدل دوم با نسبت‌های میرایی متفاوت ۷۷

جدول۵-۱- فرکانس‌های طبیعی محیط در حالت چشم‌پوشی از اثر امواج سطحی ۹۲

جدول۵-۲- فرکانس‌های طبیعی مربوط به بخش سخت با در نظر گرفتن اثر امواج سطحی ۹۵

جدول۵-۳- فرکانس‌های طبیعی مربوط به بخش مواج با در نظر گرفتن اثر امواج سطحی ۹۵

جدول۵-۴- اثر سرعت موج بر چهار فرکانس طبیعی نخست محیط در حالتِ وجودِ امواج سطحی ۹۸

جدول۶-۱- مقایسه بُعد دستگاه معادله تشکیل شده در روش پیشنهادی و اجزای محدود ۱۳۳

جدول۶-۲- فرکانس‌های طبیعی بخش مواج ۱۵۱

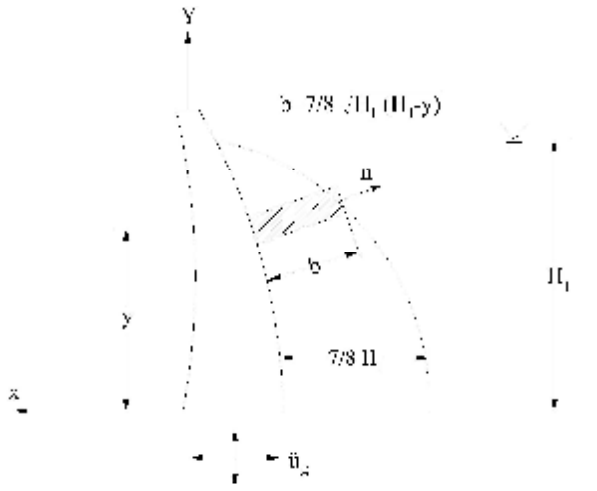
فصل اول

مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

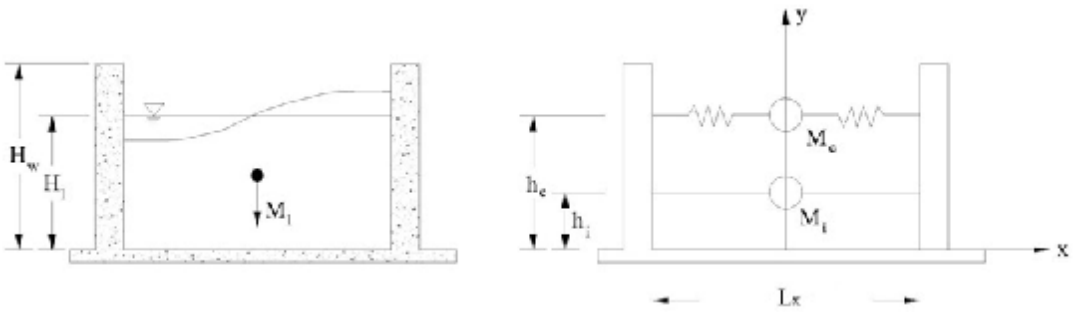
طراحی، ساخت و نگهداری مخازنی که برای ذخیره‌سازی مایعات مورد استفاده قرار می‌گیرند با توجه به رشد فزاینده جمعیت و توسعه شهرها، از اهمیت بسزایی برخوردار است. نگرشی اجمالی به نحوه تحلیل، طراحی و روش‌های اجرایی مخازن مایعات مشخص می‌سازد که باید در جهت بررسی دقیق‌تر رفتار لرزه‌ای، طرح و اجرای اینگونه سازه‌ها تلاش بیشتری به عمل آید. با توجه به کاربرد مخازن ذخیره مایعات، بررسی رفتارشان در هنگام زلزله بسیار مهم می‌باشد. این سازه‌ها بایستی پس از وقوع زلزله قابل استفاده باشند زیرا برآورد کننده نیازهای اولیه از جمله آبرسانی در زمان آتش سوزی و تأمین کننده آب مصرفی مردم می‌باشند. بنابراین درک صحیح از رفتار لرزه‌ای این نوع سازه‌ها هم برای ایمن بودن آنها و هم برای کاهش هزینه‌های نگهداری ضروری می‌باشد.

محاسبه فشار هیدرودینامیکی مهمترین مسئله در تحلیل سیستم‌های آب و سازه است. اثر فشار هیدرودینامیکی بر روی سازه از مدت‌ها پیش مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. حجم زیادی از مطالعات انجام شده در ارتباط با تخمین فشار هیدرودینامیکی در مخازن و سدها به گونه‌ای بوده است که از اثر اندرکنش آب و سازه صرفنظر شده به طوریکه اثر آنها به صورت نیروها و جرم افزوده در نظر گرفته شده است. وسترگارد [1] در سال ۱۹۳۳ اولین راه حل را برای تعیین فشار هیدرودینامیکی یک سد عمودی تحت شتاب افقی ارائه کرد. وسترگارد [1] نشان داد که فشار هیدرودینامیکی اعمال شده بر روی بدنه به علت زلزله ناشی از حرکت زمین، معادل نیروی اینرسی جسم آب پیوست شده به سد است. او برای این جرم آب، یک سهمی را پیشنهاد نمود که پایه آن معادل (7/8) ارتفاع مایع است (شکل۱-۱).



شکل۱-۱- مدل جرم هیدرودینامیکی افزوده وسترگارد [1] برای سدها

پس از آن هاسنر [2] در سال ۱۹۵۷جزئیات بیشتری از فشار هیدرودینامیکی را برای مخازن مستطیلی و استوانه‌ای ارائه کرد. هاسنر [2] یک روش تقریبی برای تعیین فشار هیدرودینامیکی ناشی از شتاب افقی را ارائه داد و فرض نمود که مایع درون مخزن تراکم‌ناپذیر بوده و دیواره‌های آن صلب می‌باشد. این روش در بسیاری از آیین‌نامه‌ها جهت محاسبه فشار هیدرودینامیکی مخازن بتنی وارد شده است. طبق تئوری هاسنر [2]، مدل دینامیکی مایعات که در درون یک مخزن با جدار سخت قرار دارند، یک مدل با دو درجه آزادی می‌باشد. در این مدل M_i آن قسمت از جرم مایع درون مخزن است که به همراه مخزن ارتعاش پیدا می‌کند و جرم سخت نامیده می‌شود. M_c آن قسمت از مایع درون مخزن است که به طور مستقل با زمان تناوبی به مراتب بزرگتر از زمان تناوب قسمت سخت و سازه نوسان می‌کند و جرم مواج نامیده می‌شود. بر این اساس او فشار هیدرودینامیکی را با جرم‌های افزوده تقریب زد. به این صورت که جرم افزوده ناشی از فشار جرم سخت را به صورت میله‌های صلب و جرم افزوده ناشی از فشار هیدرودینامیکی جرم مواج را توسط فنرهایی بر جداره مخزن قرار داد. قابل توجه است که تعیین فشار هیدرودینامیکی از این روش بر اساس شرایط مرزی صلب می‌باشد. شکل (۱-۲) مدل دینامیکی هاسنر را نشان می‌دهد.



شکل۱-۲- مدل دینامیکی هاسنر [2]

اگر روش جرم افزوده در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد، ماتریس جرم افزوده ارائه شده برای فشار جرم سخت و مواج از شرایط مرزی دیوار صلب بدست آمده و با زمان تغییر نمی‌کند. بنابراین اثر انعطاف‌پذیری دیوارها در تحلیل دینامیکی سازه و در تعیین فشار هیدرودینامیکی درنظر گرفته نمی‌شود. قابل توجه می‌باشد که برخی از محققین با مقایسه پاسخ‌های بدست آمده از روش جرم افزوده با مدل‌سازی‌های اجزای محدود، محافظه کارانه بودن روش جرم افزوده را تأیید کرده‌اند [3, 4]. یانگ و ولتسس [5] در سال ۱۹۷۶ اثر انعطاف‌پذیری دیوارها را برای تعیین مقدار و نحوه توزیع فشار هیدرودینامیکی در نظر گرفتند و نشان داده شد که فشارهای هیدرودینامیکی ناشی از بخش سخت مایع با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری دیوارها افزایش می‌یابد. در ادامه، هارون [6] پژوهش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی متعددی را بر روی رفتار دینامیکی مخازن ذخیره مایعات انجام داده است. در اکثر تحقیقات صورت گرفته بر روی مخازن ذخیره مایعات به مخازن استوانه‌ای فولادی توجه شده است. در این میان، پژوهش‌هایی بر روی تحلیل تاریخچه زمانی مخازن مستطیلی با هدف تعیین فشارهای هیدرودینامیکی، برش پایه و لنگرهای خمشی پای دیوار انجام شده است. در شماری از این پژوهش‌ها، یک روش حل عددی برای بدست آوردن پاسخ‌های دینامیکی مخازن مستطیلی، تحت اثر تحریک افقی و قائم زمین، با ترکیبی از المان‌های محدود و اجزای مرزی ارائه شده است [7, 8]. در پژوهشی دیگر رفتار لرزه‌ای مخازن ذخیره مایعات به صورت دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از روش اجزای محدود، اثر بخش سخت و مواج مایع لحاظ گردیده است [9, 10]. همچنین چن و کیانوش [11] ابتدا یک رابطه برای تعیین فشار دینامیکی ناشی از بخش سخت به بدنه‌های مخزن ارائه کردند که اثر انعطاف‌پذیری دیوارها در آن وارد شده است و سپس برای محاسبه فشار هیدرودینامیکی و تحلیل دینامیکی سازه از روشی به صورت حل پیاپی غیردرگیر استفاده کردند.

یکی دیگر از مهمترین موضوعات مربوط به اندرکنش آب و سازه در مخازن ذخیره مایعات، پدیده حرکت سطح آزاد مایع است که از تحریک خارجی مخزن بر اثر عواملی چون زلزله ناشی می‌شود. امواج سطحی معمولاً موجب افزایش بارهای دینامیکی بر روی سازه می‌شود که بایستی در طراحی مخزن وارد شود [12, 13]. دامنه این حرکت به دامنه و فرکانس تحریک مخزن، عمق مایع درون مخزن، مشخصات مایع و هندسه مخزن بستگی خواهد داشت [14]. با توجه به موارد اشاره شده، مهمترین هدف این پژوهش در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال و به بیان دیگر در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری دیوارهای مخزن در بررسی رفتار ارتعاشی و تعیین هر چه دقیق‌تر پاسخ‌های دینامیکی که شامل نحوه توزیع فشارهای دینامیکی از طرف سیال بر دیوارهای مخزن و چگونگی حرکت امواج سطحی در مخازن مستطیلی به روش‌های آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی می‌باشد. در ادامه این فصل، اهداف پژوهش و ساماندهی کلی رساله ارائه می‌شود.

۱-۲- اهداف و ساماندهی پایان‌نامه

همانطور که بیان شد، حجم زیادی از مطالعات اولیه انجام شده در ارتباط با تخمین فشار هیدرودینامیکی در مخازن و سدها به گونه‌ای بوده است که از اثر اندرکنش آب و سازه صرفنظر شده به طوریکه اثر آنها به صورت نیروها و جرم افزوده در نظر گرفته شده است. این درحالی است که در بررسی پژوهش‌هایی که در

سال‌های اخیر صورت گرفته است، اهمیت زیاد اثر انعطاف‌پذیری دیوارهای مخزن و حرکت امواج سطحی در پاسخ‌های دینامیکی مخازن ذخیره مایعات نشان داده شده است.

بنابراین هدف اصلی از انجام این پژوهش و نگارش این پایان‌نامه، تحلیل دینامیکی خطی مخازن مستطیلی با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال در حوزه فرکانس و زمان است. برای رسیدن به این هدف، این پژوهش در دو مرحله تجربی و نظری انجام می‌شود. این مراحل به بخش‌های مختلف تقسیم شده که مجموعه کارهای انجام شده بر روی هر یک از بخش‌ها و نتایج بدست آمده از آنها، در یکی از فصل‌های پایان‌نامه درج گردیده است که به صورت خلاصه در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

این پایان‌نامه در هفت فصل تدوین شده است. در فصل دوم پاره‌ای از مبانی تئوریک و آزمایشگاهی مورد بحث قرار می‌گیرد و سپس به مرور مقالات و پژوهش‌های انجام شده پرداخته می‌شود.

در فصل سوم و در بخش آزمایشگاهی این پژوهش، به منظور تعیین مشخصات دینامیکی مخزن مستطیلی، آزمایش مودال بر روی نمونه‌هایی از این مخازن صورت می‌پذیرد. هدف از این بخش، ترسیم نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی و استخراج فرکانس‌های طبیعی سیستم سازه و سیال برای نمونه بتنی به صورت U شکل که بیانگر مدل دوبعدی و نمونه بتنی به شکل مخزن کامل (سه‌بعدی) می‌باشد. به این منظور مخازن ساخته شده در آزمایشگاه در ارتفاع‌های مختلف از آب پُر شد و آزمایش مودال بر روی آنها صورت گرفت. پاسخ‌های ارتعاشی نمونه‌ها پس از هر گام دریافت و در حافظه رایانه ذخیره شد. یادآور می‌شود، داده‌های مودال به دقت اندازه‌گیری و وجود اغتشاشات (noise) بسیار حساس می‌باشند. از این رو پس از تکرار هر آزمایش و بررسی داده‌های دریافتی، بهترین داده‌ها انتخاب و پردازش بر روی آنها صورت گرفت. از نتایج بخش آزمایشگاهی برای صحت آزمایی مدل‌های عددی استفاده خواهد شد.

در بخش عددی از پژوهش، تحلیل ارتعاش آزاد و اجباری محیط، با بکار بستن شیوه عددی اجزای محدود و با حل مسأله مقدار ویژه ماتریسی آن برای مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی به انجام می‌رسد تا با مقایسه نتایج حاصل از آن با پاسخ‌های دقیق و آزمایشگاهی، صحت و دقت روش عددی مزبور مورد سنجش و ارزیابی قرار گیرد و پس از آن اثر پارامترهای مختلف از جمله در نظر گرفتن امواج سطحی بر روی پاسخ‌های دینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. روابط و مدل‌های روش اجزای محدود در فصل‌های سوم، پنجم و ششم در کنار نتایج آزمایشگاهی و روابط دقیق پیشنهادی در این پژوهش آورده شده است.

همانطور که مطرح شد، چن و کیانوش [11] به منظور در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری دیوارها در محاسبه فشار هیدرودینامیکی و در تحلیل دینامیکی سازه از روشی به صورت حل پیاپی غیردرگیر استفاده کردند. استفاده از فشار هیدرودینامیکی بدست آمده از گام قبلی و استفاده آن به عنوان بار خارجی در گام فعلی می‌تواند خطا در محاسبات وارد نماید و موجب ناپایداری عددی حل نیز شود که با بسیار کوچک کردن زمان هر گام تا حدی قابل حل می‌باشد.

در فصل چهارم این رساله با یک رابطه‌سازی، معادله حرکت دیوار مخزن مستطیلی و رابطه فشار هیدرودینامیکی استخراج شده توسط چن و کیانوش با یکدیگر ترکیب و در قالب یک رابطه ارائه شده‌اند که معادله حاکم جدید در یک مرحله در هر گام زمانی قابل حل می‌باشد. این روش پیشنهادی این مزیت را دارد

که اگر از روش نیومارک استفاده شود، پاسخ در هر شرایطی دارای پایداری عددی می‌باشد. علاوه بر آن در این روش فشار هیدرودینامیکی در گام مربوط به همان گام زمانی است. از این روش می‌توان به روابط ساده‌تری برای تعیین پاسخ‌ها رسید و آنرا برای استفاده در آیین‌نامه‌ها پیشنهاد نمود. در بخش نتایج در این فصل با استفاده از روش پیشنهادی، توزیع فشار هیدرودینامیکی ناشی از بخش سخت بر روی دیوارهای مخزن تعیین شده و پاسخ‌های بدست آمده به همراه نتایج حاصل از روش‌های آیین‌نامه‌ای مورد بحث قرار گرفته است.

ارائه حل‌های بسته با استفاده از حل مستقیم و غیر عددی معادلات دیفرانسل حاکم بر مسئله از اهمیت زیادی برخوردار است. پاسخ بدست‌آمده از حل دقیق، معیار و محک مطمئنی برای سنجش دقت روش عددی مورد بررسی و یا هر روش عددی دیگر خواهد بود. همچنین حل‌های بسته علاوه بر دقیق بودن از کارایی بسیار بالاتری نسبت به روش‌های عددی نیز برخوردار خواهند بود. همچنین آشکار است به دلیل بزرگی مجموعه و تعداد درجات آزادی فراوان موجود در روش عددی اجزای محدود، زمان لازم برای دستیابی به پاسخ عددی سیستم قابل توجه می‌باشد. باید دانست که در نظر گرفتن اندرکنش سازه - سیال نیز سبب افزایش زمان اجرای برنامه و کاهش کارایی آنها می‌گردد. بنابراین شایسته خواهد بود که با ارائه روش‌های کارا و مؤثری برای تحلیل مسئله، بتوان دقت مورد نیاز را تأمین کرد و زمان اجرای برنامه‌ها را کاهش داد.

در همین راستا در این بخش از پژوهش، مسأله مقدار مرزی مربوط به اندرکنشِ سازه انعطاف‌پذیر ـ سیالِ تراکم‌پذیر که شامل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل مشتقاتِ جزئی و شُماری شرط مرزی است، در محیطی دوبعدی و بسته معرفی می‌گردد. این محیط دوبعدی، یک مخزن مستطیلی با دو دیوار انعطاف‌پذیر و کف صلب می‌باشد که سطح سیال درون آن می‌تواند دارای امواج سطحی نیز باشد. دستگاه مزبور دارای سه معادله دیفرانسیل خواهد بود که یکی، معادله دیفرانسیل حاکم بر انتشارِ امواج در سیالِ تراکم‌پذیر است؛ و مابقی، دو معادله دیفرانسیل حاکم بر رفتار نوسانی تیر اویلر ـ برنولی که دیوارهای راست و چپ مخزن را تشکیل می‌دهند. پس از مشخص‌شدن معادلات دیفرانسیل و شرایط مرزی آنها، حل مستقیم و غیرعددی مسأله مقدار مرزی مربوطه با استفاده از تکنیک حل دقیق معادلات دیفرانسیل مشتقات جزئی صورت می‌پذیرد. ناگفته نماند، این تحلیل‌ها، همگی در حوزه فرکانس، با فرض رفتار خطی به انجام می‌رسند که با استفاده از تبدیلات فوریه پاسخ‌ها را می‌توان به حوزه زمان نیز منتقل کرد. این بخش از پژوهش در فصل‌های پنجم و ششم پایان‌نامه آورده شده است که در فصل پنجم، حل بسته معادله نوسان آزاد و اجباری سیال تراکم‌پذیر در مخازن مستطیلی با بدنه صلب و در فصل ششم، مخزن با دیوارهای انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته است.

قابل توجه است که در مدل‌سازی‌ها، تحلیل‌ها، استخراج روابط، ارائه نتایج و نمایش آنها از نرم‌افزارهای Compaq Visual Frotran 6، Mathematica 7 و Matlab2008 استفاده شده است. فصل هفتم پایان‌بخش این مجموعه است که در آن نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای پژوهش‌های آیندگان به نظر خواهد رسید.