



پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
پژوهشکده سازه، گروه شریان‌های حیاتی

رساله دکترا
مهندسی عمران-مهندسی زلزله

کاهش تلاطم در مخازن استوانه‌ای دارای سقف شناور تک لایه با استفاده از جاذب‌های انرژی

دانشجو

امیرحسین سرور

استاد راهنما

دکتر محمود حسینی

استاد مشاور

دکتر محمدعلی گودرزی

آبان ۱۳۹۷

به نام حقیقت

تقدیم به روان پاک، مهربان، دلسوز و همیشه آگاه پدرم
 که تمام عمرش، در جهت تعلیم و تربیت فرزندانش سپری گشت
 تقدیم به مادرم که سالوده خانواده را به زیبایی نگه داشته
 تقدیم به همسر فداکار و سخت کوشم
 آنکه از لحظه ورود به زندگی ام، از هیچ چیز دریغ نکرده است.....
 و تقدیم به کیو و پناه کوچک زندگیمان

برخورد لازم می دانم، از جناب آقای دکتر محمود حسینی که در به تبع رساندن این تلاش با راهنمایی های ممتد، خالصانه و بی دریغ خود مرایای نمودند و نیز از جناب آقای دکتر محمد علی کوردزی که قسمت مهمی از ایده شکل گرفته حاصل راهنمایی های ایشان بود و همچنین از همسرم، سرکار خانم مهندس زهرا بیات، که پشتوانه اصلی من در این تلاش بودند، کمال مراتب سپاسگزاری را به جا آوردم. از جناب مهندس جبار زاده و سایر همکاران ایشان بواسطه همکاری های فنی در آزمایشگاه پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله و همچنین از مسئولین پژوهشگاه بواسطه بودجه ای که جهت انجام آزمایشات در اختیار قرار دادند، کمال تشکر را دارم. همچنین از دوست عزیز، آقای دوستی بواسطه همکاری ها و همکاری های لازم در انجام امور اداری بسیار تشکر می کنم. همچنین از دوستان عزیزم آقایان مهندس رضا طایفی و پیمان رضوی جهت همکاری در آزمایشات و فیلمبرداری سپاسگزاری می نمایم.

چکیده

تلاطم^۱ به مفهوم نوسان مایع در اثر ایجاد تحریک‌هایی از قبیل جابجایی ناگهانی و اعمال شتاب می‌باشد که در اثر این نوسان، نیروها و گشتاورهایی به ظرف محتوی آن و یا سازه‌های داخل مایع اعمال می‌گردد. تلاطم سبب بروز خرابی در مخازن هنگام وقوع زلزله می‌باشد. جهت کنترل پدیده تلاطم روش‌های مختلفی ارائه شده است که عمده آن استفاده از دیواره‌های میراکننده^۲ می‌باشد. مخازن دارای سقف‌های شناور تحت اثر زلزله، خسارت‌های مالی قابل توجهی داشته‌اند. با توجه به احتمال بالای آتش‌سوزی در این مخازن و غرق شدن سقف‌ها در زلزله‌های گذشته، بررسی رفتار این مخازن از لحاظ استراتژیک و اقتصادی حائز اهمیت می‌باشد. بنابر مطالب مطرح شده و اهمیت مطالعه بر روی کنترل رفتار لرزه‌ای سقف شناور، هدف اصلی این پروژه ارائه روشی نوین جهت کنترل رفتار لرزه‌ای سقف شناور و جلوگیری از غرق شدن یا آتش گرفتن آن می‌باشد. در این روش با استفاده از میرایی ذاتی سیال و به کارگیری بافل حلقوی آویخته^۳ از سقف مخزن و غرق شده در سیال که در نزدیکی کف مخزن مسقر می‌گردد، سعی بر آن است که بتوان دامنه حرکت سقف شناور را با استفاده از میرایی ناشی از حرکت حلقه آویخته در سیال، کنترل نمود. ابتدا کارایی ایده پیشنهادی با سه عمق مختلف سیال، در حالات سقف شناور تنها و سقف شناور به همراه بافل با پهنای متفاوت، تحت اثر بارهای هارمونیک و لرزه‌ای در آزمایشگاه بررسی شد، و میزان تاثیر بافل در کاهش تلاطم مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به استخراج معادلات دینامیکی حاکم بر پدیده تلاطم سیال همراه با سقف شناور و نیز همراه با بافل حلقوی آویخته با استفاده از معادلات لاگرانژ، تابع پتانسیل سرعت و نیروی مقاومت سیال پرداخته شد. شایان ذکر است که در فرمول بندی سقف شناور و بافل صلب فرض شده‌اند. سپس با تدوین یک برنامه در محیط نرم افزار متلب^۴ با تحلیل‌های مکرر و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی تا حصول اطمینان از تطابق زمان تناوب تلاطم تحلیلی با آزمایشگاهی و نزدیکی کافی تاریخچه‌های تلاطم سقف شناور، حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی و تحلیلی تحت اثر تحریکات هارمونیک و لرزه‌ای، در دو حالت با و بدون بافل، برنامه نوشته شده جهت بدست آوردن حداکثر دامنه تلاطم، مورد تدقیق و تکمیل قرار گرفت. نتایج نشان داده است که ایده بکارگیری بافل حلقوی آویخته، می‌تواند دامنه تلاطم را به صورت میانگین ۴۰ درصد کاهش می‌دهد. از مقایسه پاسخ‌های تحلیلی و آزمایشگاهی، می‌توان نتیجه گرفت که با وجود ترم‌های غیرخطی ناشی از میرایی سیال و پیچیدگی رفتار شل افتادگی نخ‌های نگهدارنده بافل و تفاوت رفتار بافل در حرکات به سمت بالا و پایین، نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی به صورت میانگین در حالت تحریکات هارمونیک و لرزه‌ای بیش از ۹۰ درصد با هم تطابق دارند.

¹ Sloshing

² Baffles

³ Suspended Annular Baffles (SAB)

⁴ MATLAB

واژه های کلیدی

کاهش تلاطم مخازن سقف شناور، بافل مدور آویخته، آزمایش میز لرزان مخزن سقف شناور، مطالعات تحلیلی رفتار لرزه ای مخازن با سقف شناور همراه با بافل

فهرست نوشتار

فصل ۱- مقدمه، معرفی سقف های شناور و بررسی ادبیات فنی.....	۱۶
۱-۱- مقدمه.....	۱۶
۲-۱- مخازن دارای سقف شناور.....	۱۷
۳-۱- انواع سقف های شناور.....	۱۸
۴-۱- تجهیزات سقف های شناور.....	۱۹
۱-۴-۱- تجهیزات لازم جهت آب بند نمودن سقف.....	۱۹
۲-۴-۱- نردبان.....	۲۰
۳-۴-۱- تاسیسات زهکشی آبهای ناشی از بارندگی روی سقف.....	۲۱
۵-۱- رویکرد آیین نامه API650 به طراحی مخازن نفتی با سقف شناور.....	۲۲
۶-۱- بررسی پژوهش های گذشته.....	۲۲
۱-۶-۱- آسیب های وارده به مخازن سقف شناور تحت اثر تحریکات لرزه ای.....	۲۲
۲-۶-۱- ارائه روش هایی جهت کاهش تلاطم در مخازن سقف شناور.....	۳۳
۷-۱- چالش مورد نظر و ارائه راهکار برای رفع آن.....	۳۹
فصل ۲- مطالعات آزمایشگاهی.....	۴۱
۱-۲- علت انجام آزمایش.....	۴۱
۲-۲- شرح آزمایش ها.....	۴۱
۳-۲- تنظیمات آزمایش.....	۴۲
۴-۲- تحریکات اعمال شده.....	۵۲
۱-۴-۲- تحریکات هارمونیک.....	۵۲
۲-۴-۲- تحریکات لرزه ای.....	۵۳
۵-۲- نامگذاری آزمایش ها.....	۵۵
فصل ۳- معادلات تحلیلی حرکت سقف و بافل.....	۵۷
۱-۳- علائم اختصاری.....	۵۷
۲-۳- مقدمه.....	۵۹
۳-۳- مدل مکانیکی معادل.....	۵۹
۴-۳- تابع پتانسیل سرعت.....	۵۹
۵-۳- اصل همیلتون.....	۶۲
۶-۳- استفاده از اصل همیلتون جهت تشکیل معادله حرکت سقف شناور با حضور بافل.....	۶۳
۷-۳- لاگرانژ بخش سیال.....	۶۳
۸-۳- لاگرانژ بخش سقف شناور.....	۶۸
۹-۳- معادله حرکت سقف بدون بافل مدور آویخته.....	۶۸

- ۱-۳-۹- بدون در نظر گرفتن میرایی ناشی از سقف و سیال ۶۸
- ۲-۳-۹- با در نظر گرفتن میرایی ناشی از سقف و سیال ۷۰
- ۳-۱۰- **معادله حرکت سقف همراه با بافل مدور آویخته** ۷۱
- ۱-۳-۱۰- لاگرانژ بخش بافل مدور آویخته در سیال ۷۱
- ۲-۳-۱۰- کار نیروهای ناپایستار در بافل مدور آویخته در سیال ۷۱
- ۳-۳-۱۰- معادله حرکت سقف همراه با بافل مدور آویخته ۷۴
- ۴-۳-۱۰- اعمال تاثیر لحظات فعال نبودن و مجدداً فعال شدن بافل در معادلات حرکت ۷۵
- ۵-۳-۱۰- نتایج محاسبات تحلیلی ۷۷
- ۴- **فصل ۴- نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی و مقایسه آنها** ۷۸
- ۱-۴- **مقدمه** ۷۸
- ۲-۴- **نتایج آزمایشگاهی** ۷۸
- ۱-۴-۲- نتایج آزمایشگاهی مربوط به ارتفاع ۷۰ سانتیمتر ۸۳
- ۴-۲-۲- نتایج آزمایشگاهی مربوط به ارتفاع ۵۰ سانتیمتر ۸۵
- ۴-۲-۳- نتایج آزمایشگاهی مربوط به ارتفاع ۲۰ سانتیمتر ۸۷
- ۴-۲-۴- مقیاس آزمایش انجام شده بر اساس معادله حرکت سقف شناور بدون بافل آویخته و میرایی سقف ۸۹
- ۵-۴-۲- محاسبه میرایی ویسکوز معادل ۹۰
- ۳-۴- **نتایج تحلیلی** ۹۲
- ۱-۴-۳- نتایج مطالعات تحلیلی آزمایش های لرزه ای سقف شناور، بدون حضور بافل ۹۲
- ۴-۳-۲- نتایج مطالعات تحلیلی آزمایش های لرزه ای سقف شناور، با حضور بافل به عرض ۷ سانتیمتر ۹۶
- ۳-۴-۳- نتایج مطالعات تحلیلی آزمایش های لرزه ای سقف شناور، با حضور بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر ۱۰۱
- ۴-۳-۴- مقایسه نموداری نتایج حاصل از آزمایشها و مطالعات تحلیلی ۱۰۵
- ۴-۳-۵- بررسی حضور بافل مدور آویخته در بخش ضربه ای ۱۰۹
- ۵- **فصل ۵- جمع بندی** ۱۱۰
- ۱-۵- **نتایج مطالعات آزمایشگاهی** ۱۱۰
- ۲-۵- **نتایج مطالعات تحلیلی** ۱۱۱
- ۳-۵- **پیشنهادهای** ۱۱۳
- فهرست منابع ۱۱۴
- پیوست الف: **منتخبی از نتایج تصویری آزمایش ها** ۱۱۷
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، بدون بافل، تحت تحریک زلزله چی چی ۱۱۷
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۷ سانتیمتر، تحت تحریک زلزله چی چی ۱۱۹
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر، تحت تحریک زلزله چی چی ۱۲۱

- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، بدون بافل، تحت تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۳ هرتز ۱۲۵
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۷ سانتیمتر، تحت تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۳ هرتز ۱۲۹
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر، تحت تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۳ هرتز ۱۳۳
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، بدون بافل، تحت تحریک زلزله، تحت تحریک زلزله کوجایلی .. ۱۳۶
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۷ سانتیمتر، تحت تحریک زلزله کوجایلی ۱۳۹
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، با جابه جایی اولیه ۲۵ سانتیمتر جهت برداشت زمان تناوب ۱۴۲
- پیوست ب: گزارش بازدید از مخازن سقف شناور ۱۴۳
- بازدید از مخازن نفتی سقف شناور در حال بهره برداری جزیره خارگ ۱۴۳
- بازدید از مخزن در حال ساخت (مخزن شماره ۳۸) واقع در جزیره خارگ ۱۴۵
- بازدید از پالایشگاه نفت تهران ۱۵۴
- پیوست ج: برنامه متلب حل معادله دیفرانسیل مرتبه دو به روش رانگ کوتا ۱۵۶
- پیوست د: مقاله های برگرفته از رساله ۱۵۹

فهرست جداول

جدول ۱-۱	تعداد حوادث مخازن نفتی در بین سالهای ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۰	۲۳
جدول ۱-۲	تعداد حوادث آتشسوزی در هریک از دسته ها	۲۴
جدول ۱-۳	مخازن با سقف شناور که در شهر توماکومی به شدت آسیب دیدند	۲۸
جدول ۱-۴	فرکانس مدل های مخزن حاوی سایل در ارتفاعات مورد نظر آزمایش	۵۲
جدول ۲-۲	نامگذاری مدل های آزمایشگاهی و تحلیلی نظیر یکدیگر، ارتفاع سیال ۷۰ سانتیمتر	۵۵
جدول ۲-۳	نامگذاری مدل های آزمایشگاهی و تحلیلی نظیر یکدیگر، ارتفاع سیال ۵۰ سانتیمتر	۵۵
جدول ۲-۴	نامگذاری مدل های آزمایشگاهی و تحلیلی نظیر یکدیگر، ارتفاع سیال ۲۰ سانتیمتر	۵۶
جدول ۴-۱	مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در آزمایش ارتفاع سیال ۷۰ سانتیمتر و درصد کاهش پاسخ	۸۳
جدول ۴-۲	مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در آزمایش ارتفاع سیال ۵۰ سانتیمتر و درصد کاهش پاسخ	۸۵
جدول ۴-۳	مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در آزمایش ارتفاع سیال ۲۰ سانتیمتر و درصد کاهش پاسخ	۸۷
جدول ۴-۴	مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در حالت بدون بافل	۹۶
جدول ۴-۵	مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در حالت بافل با عرض ۷ سانتی متر	۱۰۰
جدول ۴-۶	مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در حالت بافل با عرض ۱۱ سانتی متر	۱۰۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ مخزن با سقف شناور خارجی از نوع یک عرشه‌ای پانتون [۱]..... ۱۷
- شکل ۱-۲ مخزن با سقف شناور خارجی با عرشه‌ی تشتکی [۱]..... ۱۸
- شکل ۱-۳ مقطعی از مخزن با سقف شناور خارجی با عرشه‌ی دو لایه [۱]..... ۱۹
- شکل ۱-۴ سه نوع سیستم عایق بندی ثبت شده در اداره ثبت اختراع آمریکا [۱]..... ۲۰
- شکل ۱-۵ سه نوع نردبان ثبت شده در اداره‌ی ثبت اختراع آمریکا [۱]..... ۲۱
- شکل ۱-۶ دو نوع زهکش ثبت شده در اداره ثبت اختراع آمریکا: زهکشی ثقلی و زهکشی توسط پمپاژ [۱]..... ۲۲
- شکل ۱-۷ اشاره آیین نامه API650 به عدم شمول طراحی لرزه ای سقف مخازن شناور ۲۲
- شکل ۱-۸ آتشسوزی و آسیبهای وارده بر مخازن با سقف شناور در زمین لرزه‌ی ترکیه ۱۹۹۹ [۱۷]..... ۲۶
- شکل ۱-۹ شناور شدن سقف مخزن و خرابی سقف (زلزله از میت ترکیه، ۱۹۹۹) [۱۷]..... ۲۷
- شکل ۱-۱۰ پالایشگاه توپراس، مخازن دارای سقف شناور دچار حریق شدند [۱۷]..... ۲۷
- شکل ۱-۱۱ (b) آتشسوزی کامل مخزن بنزین سنگین (سمت راست) a) آتشسوزی حلقه‌های مخزن نفت سفید (سمت چپ) [۱۹]..... ۲۹
- شکل ۱-۱۲ مخزن b در حال آتشسوزی. (زلزله‌ی توکاشیاوکی ژاپن ۲۰۰۳) [۱۹]..... ۲۹
- شکل ۱-۱۳ ارتفاع تلاطم و میزان آسیب دیدگی مخازن و غرق شدن سقف مخازن c و d [۱۹]..... ۳۰
- شکل ۱-۱۴ خروج نفت در قسمتهایی که دچار کمانش شدند در اثر پدیده تلاطم [۱۹]..... ۳۱
- شکل ۱-۱۵ آتش گرفتن مخازن نفت در زلزله توکاچی اکی-ژاپن (۲۰۰۳) [۱۹]..... ۳۱
- شکل ۱-۱۶ سقف مخازن نفت خام ۴ روز پس از زلزله به طور کامل غرقاب شدند [۱۹]..... ۳۲
- شکل ۱-۱۷ آتش گرفتن سقف مخزن در اثر پدیده تلاطم در زلزله توکاچی-اوکی (۲۰۰۳) [۱۹]..... ۳۲
- شکل ۱-۱۸ نمای سه بعدی و مقطع سیستم پیشنهادی به همراه بافل های مدور آویخته SAB از سقف شناور ۴۰
- شکل ۲-۱ مخزن پلاکسی گلاس حاوی سیال، قرار گرفته بر روی میز لرزان پژوهشگاه زلزله..... ۴۳
- شکل ۲-۲ ساختن سقف شناور با استفاده از ورق های به ضخامت ۰.۵ میلی متر ۴۴
- شکل ۲-۳ مخزن پر شده از آب پلاکسی گلاس همراه با سقف شناور ۴۴
- شکل ۲-۴ قرار گرفتن سقف شناور بر روی سیال در مخزن و موقعیت قرار گیری سنسورها جهت اندازه گیری جابه جایی سقف ۴۵
- شکل ۲-۵ تصویر مخزن از دید دوربین دید پرنده، شامل جانمایی چهار دوربین و چهار سنسور در آزمایش ۴۶
- شکل ۲-۶ نصب چهار سنسور جابه جایی سنج در چهار سمت اصلی مخزن ۴۶
- شکل ۲-۷ الحاق قلاب های در زیر سقف شناور جهت آویزان نمودن بافل حلقوی از سقف ۴۷
- شکل ۲-۸ آویختن بافل حلقوی به عرض ۱۱ سانتیمتر از سقف شناور بیرون از مخزن ۴۷
- شکل ۲-۹ مخزن پلاکسی گلاس حاوی سیال و سقف شناور همراه با بافل حلقوی ۱۱ سانتیمتری به صورت آویخته از سقف شناور .. ۴۸
- شکل ۲-۱۰ پلان میز لرزان پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله ۴۸
- شکل ۲-۱۱ جانمایی شماره دوربین ها نسبت به میز ۴۹
- شکل ۲-۱۲ نمای سه بعدی تنظیمات آزمایش و مقطع آن، آویزان شدن بافل مدور آویخته SAB از سقف شناور ۴۹
- شکل ۲-۱۳ اطلاعات هندسی بافل های با عرض ۷ و ۱۱ سانتیمتر ۵۰

- شکل ۱۴-۲ نمای آزمایش از دید دوربین یک در سه ارتفاع مختلف قرار گیری سقف شناور ۲۰، ۵۰ و ۷۰ سانتیمتر. جهت تشخیص بهتر، هر ۱۰ سانتیمتر رنگ متر چسبانده شده روی دیواره تغییر می کند ۵۱
- شکل ۱۵-۲ تاریخچه جابه جایی-زمان، تحریکات لرزه ای اعمال شده به میز لرزان ۵۳
- شکل ۱۶-۲ طیف فوریه زلزله های اعمال شده به میز لرزان در آزمایشگاه ۵۴
- شکل ۱-۳ معرفی پارامترهای معادلات مخزن استوانه ای همراه با سقف شناور [۴۵] ۶۴
- شکل ۱-۴ تصاویر پاسخ مخزن از نگاه دوربین شماره یک مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر با فرکانس ۰.۹۵ هرتز در دو حالت بدون بافل و با بافل ۷ سانتیمتری ۷۹
- شکل ۲-۴ پاسخ مخزن از نگاه دوربین دید پرند نظیر لحظه نشان داده شده در شکل ۱-۴ ۷۹
- شکل ۳-۴ تصاویر پاسخ مخزن از نگاه دوربین های یک، دو و چهار مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۷۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر با فرکانس ۰.۹۵ هرتز در دو حالت بدون بافل و با بافل ۷ سانتیمتری ۸۱
- شکل ۴-۴ تاریخچه جابه جایی قائم بر حسب زمان بدست آمده از سنسور، در دو حالت بدون بافل و با بافل ۷ سانتیمتری، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۵ هرتز در ارتفاع محتوی مخزن ۷۰ سانتیمتر ۸۲
- شکل ۵-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در آزمایش ارتفاع سیال ۷۰ سانتیمتر ۸۴
- شکل ۶-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در آزمایش ارتفاع سیال ۵۰ سانتیمتر ۸۶
- شکل ۷-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در آزمایش ارتفاع سیال ۲۰ سانتیمتر ۸۸
- شکل ۸-۴ تاریخچه ارتفاع تلاطم سقف شناور در حالت بدون بافل و با بافل به عرض ۷ سانتیمتر تحت اثر تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۵ هرتز در حالت ارتفاع سیال ۷۰ سانتیمتر ۹۱
- شکل ۹-۴ تابع نمایی روند کاهش دامنه تلاطم پس از شروع ارتعاش آزاد، بدست آمده از شکل ۸-۴ ۹۲
- شکل ۱۰-۴ تصویر لحظه شروع آزمایش از نگاه دوربین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۵۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز در حالت بدون بافل H50WOBHf093 ۹۴
- شکل ۱۱-۴ مقایسه تاریخچه پاسخ دامنه تلاطم بدست آمده از آزمایش و حل تحلیلی در آزمایش قرار گیری سقف شناور در ارتفاع ۵۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز در حالت بدون بافل H50WOBHf093 ۹۴
- شکل ۱۲-۴ تصویر لحظه حداکثر پاسخ از نگاه دوربین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز در حالت بدون بافل H50WOBHf093 ۹۵
- شکل ۱۳-۴ تاریخچه دامنه تلاطم در آزمایش قرار گیری سقف شناور در ارتفاع ۲۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۷۶ هرتز در حالت بافل با عرض ۷ سانتی متر H20WB07Hf076cdrop4cdrag40 ۹۸
- شکل ۱۴-۴ تصویر پاسخ مخزن از نگاه دوربین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۲۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر با فرکانس ۰.۷۶ هرتز در حالت بافل با عرض ۷ سانتی متر H20WB07Hf076cdrop4cdrag40 لحظه شروع آزمایش قبل از تحریک ۹۸
- شکل ۱۵-۴ تصویر پاسخ مخزن از نگاه دوربین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۲۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر با فرکانس ۰.۷۶ هرتز در حالت بافل با عرض ۷ سانتی متر H20WB07Hf076cdrop4cdrag40 لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم ۳.۵ سانتیمتر ۹۹

- شکل ۱۶-۴ تاریخچه دامنه تلاطم در آزمایش قرار گیری سقف شناور در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر تحت تحریک زلزله لوما در حالت بافل با عرض ۱۱ سانتی متر H70WB11Lomacdrop5cdrag75 ۱۰۲
- شکل ۱۷-۴ تصویر پاسخ مخزن از نگاه دورین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۷۰ تحت تحریک لرزه ای لوما، در حالت بافل با عرض ۱۱ سانتی متر H70WB11Lomacdrop5cdrag75 لحظه شروع آزمایش قبل از تحریک ۱۰۲
- شکل ۱۸-۴ تصویر پاسخ مخزن از نگاه دورین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۷۰ تحت تحریک لرزه ای لوما در حالت بافل با عرض ۱۱ سانتی متر H70WB11Lomacdrop5cdrag75، لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم ۱۰.۵ سانتیمتر ۱۰۳
- شکل ۱۹-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در حالت هارمونیک بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در ارتفاع ۷۰ سانتی متر ۱۰۵
- شکل ۲۰-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در حالت هارمونیک بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در ارتفاع ۵۰ سانتی متر ۱۰۶
- شکل ۲۱-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در حالت هارمونیک بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در ارتفاع ۲۰ سانتی متر ۱۰۶
- شکل ۲۲-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در حالت لرزه ای بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در ارتفاع ۷۰ سانتی متر ۱۰۷
- شکل ۲۳-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در حالت لرزه ای بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در ارتفاع ۵۰ سانتی متر ۱۰۷
- شکل ۲۴-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در حالت لرزه ای بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در ارتفاع ۲۰ سانتی متر ۱۰۸
- شکل ۱-۰ شروع آزمایش WR20WOBchichi ۱۱۷
- شکل ۲-۰ ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۱۹.۲۵ سانتیمتر از دیدگاه دورین دوم ۱۱۷
- شکل ۳-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار اول تحریک، ۲۷ سانتیمتر ۱۱۸
- شکل ۴-۰ ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۲۰ سانتیمتر از دیدگاه دورین چهارم ۱۱۸
- شکل ۵-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار اول تحریک، ۲۸ سانتیمتر ۱۱۸
- شکل ۶-۰ شروع آزمایش WR20WB7chichi ۱۱۹
- شکل ۷-۰ ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۲۰.۵ سانتیمتر از دیدگاه دورین دوم ۱۱۹
- شکل ۸-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار اول تحریک، ۲۶.۵ سانتیمتر ۱۱۹
- شکل ۹-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار دوم تحریک، ۲۶.۵ سانتیمتر ۱۲۰
- شکل ۱۰-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار سوم تحریک، ۲۶.۵ سانتیمتر ۱۲۰
- شکل ۱۱-۰ ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۲۰.۵ سانتیمتر از دیدگاه دورین چهارم ۱۲۰
- شکل ۱۲-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین چهارم، بار اول تحریک، ۲۷ سانتیمتر ۱۲۰
- شکل ۱۳-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین چهارم، بار دوم تحریک، ۲۷ سانتیمتر ۱۲۱
- شکل ۱۴-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین چهارم، بار سوم تحریک، ۲۷ سانتیمتر ۱۲۱
- شکل ۱۵-۰ شروع آزمایش WR20WB11chichi از دید دورین دوم ۱۲۱
- شکل ۱۶-۰ ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۱۹.۵ سانتیمتر از دید دورین دوم ۱۲۲
- شکل ۱۷-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار اول تحریک، ۲۴.۵ سانتیمتر ۱۲۲
- شکل ۱۸-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار دوم تحریک، ۲۵ سانتیمتر ۱۲۲
- شکل ۱۹-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار سوم تحریک، ۲۵ سانتیمتر ۱۲۲
- شکل ۲۰-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار اول تحریک، ۱۳.۵ سانتیمتر ۱۲۳

- شکل ۲۱-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، بار دوم تحریک، ۱۳.۵ سانتیمتر ۱۲۳.
- شکل ۲۲-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، بار سوم تحریک، ۱۳.۵ سانتیمتر ۱۲۳.
- شکل ۲۳-۰ شروع آزمایش WR20WB6R11chichi از دید دوربین چهارم ۱۲۴.
- شکل ۲۴-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، بار اول تحریک، ۲۵ سانتیمتر ۱۲۴.
- شکل ۲۵-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، بار دوم تحریک، ۲۵.۵ سانتیمتر ۱۲۴.
- شکل ۲۶-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، بار سوم تحریک، ۲۵ سانتیمتر ۱۲۴.
- شکل ۲۷-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، بار اول تحریک، ۱۴ سانتیمتر ۱۲۵.
- شکل ۲۸-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، بار دوم تحریک، ۱۳.۵ سانتیمتر ۱۲۵.
- شکل ۲۹-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، بار سوم تحریک، ۱۳.۵ سانتیمتر ۱۲۵.
- شکل ۳۰-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۶۰ سانتیمتر WR50WOBharmoonic ۱۲۶.
- شکل ۳۱-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۳۹.۵ سانتیمتر ۱۲۶.
- شکل ۳۲-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۶۵ سانتیمتر ۱۲۷.
- شکل ۳۳-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۳۴ سانتیمتر ۱۲۷.
- شکل ۳۴-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۶۹.۵ سانتیمتر ۱۲۷.
- شکل ۳۵-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۲۸.۵ سانتیمتر ۱۲۷.
- شکل ۳۶-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۶۰ سانتیمتر ۱۲۸.
- شکل ۳۷-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۳۹.۵ سانتیمتر ۱۲۸.
- شکل ۳۸-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۶۵ سانتیمتر ۱۲۸.
- شکل ۳۹-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۳۴ سانتیمتر ۱۲۸.
- شکل ۴۰-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۷۰ سانتیمتر ۱۲۹.

- شکل ۴۱- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۲۹ سانیتیمتر ۱۲۹.
- شکل ۴۲- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۱.۵ سانیتیمتر با بافل ۷ سانیتیمتری WR50WB7harmonic ۱۲۹.
- شکل ۴۳- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۸.۵ سانیتیمتر با بافل ۷ سانیتیمتری ۱۳۰.
- شکل ۴۴- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۲.۵ سانیتیمتر ۱۳۰.
- شکل ۴۵- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۷.۵ سانیتیمتر ۱۳۰.
- شکل ۴۶- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۴.۵ سانیتیمتر ۱۳۱.
- شکل ۴۷- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۵ سانیتیمتر ۱۳۱.
- شکل ۴۸- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۱.۵ سانیتیمتر ۱۳۱.
- شکل ۴۹- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۸.۵ سانیتیمتر ۱۳۱.
- شکل ۵۰- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۲.۵ سانیتیمتر ۱۳۲.
- شکل ۵۱- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۷.۵ سانیتیمتر ۱۳۲.
- شکل ۵۲- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۵ سانیتیمتر ۱۳۲.
- شکل ۵۳- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۵ سانیتیمتر ۱۳۲.
- شکل ۵۴- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۹ سانیتیمتر WR50WB11harmonic ۱۳۳.
- شکل ۵۵- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۸ سانیتیمتر ۱۳۳.
- شکل ۵۶- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۳۴ سانیتیمتر ۱۳۳.

- شکل ۵۷- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۸.۵ سانتیمتر ۱۳۴.
- شکل ۵۸- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۳ سانتیمتر ۱۳۴.
- شکل ۵۹- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۶.۵ سانتیمتر ۱۳۴.
- شکل ۶۰- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۱ سانتیمتر ۱۳۴.
- شکل ۶۱- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۹ سانتیمتر ۱۳۵.
- شکل ۶۲- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۲ سانتیمتر ۱۳۵.
- شکل ۶۳- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۸.۵ سانتیمتر ۱۳۵.
- شکل ۶۴- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۲ سانتیمتر ۱۳۶.
- شکل ۶۵- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۶ سانتیمتر ۱۳۶.
- شکل ۶۶- ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۷۰ سانتیمتر از دید دوربین دوم WR70WOBkocaeli ۱۳۶.
- شکل ۶۷- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، بار اول تحریک، ۸۲.۵ سانتیمتر ۱۳۷.
- شکل ۶۸- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، بار دوم تحریک، ۸۲.۵ سانتیمتر ۱۳۷.
- شکل ۶۹- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، بار سوم تحریک، ۸۲ سانتیمتر ۱۳۷.
- شکل ۷۰- ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۷۰ سانتیمتر از دید دوربین چهارم ۱۳۷.
- شکل ۷۱- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، بار اول تحریک، ۸۲ سانتیمتر ۱۳۸.
- شکل ۷۲- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، بار دوم تحریک، ۸۲.۵ سانتیمتر ۱۳۸.
- شکل ۷۳- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، بار سوم تحریک، ۸۱.۵ سانتیمتر ۱۳۸.
- شکل ۷۴- ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۷۰ سانتیمتر از دید دوربین دوم WR70WB7kocaeli ۱۳۹.
- شکل ۷۵- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، بار اول تحریک، ۷۶.۵ سانتیمتر ۱۳۹.
- شکل ۷۶- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، بار دوم تحریک، ۷۶ سانتیمتر ۱۳۹.
- شکل ۷۷- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، بار سوم تحریک، ۷۶ سانتیمتر ۱۴۰.
- شکل ۷۸- ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۷۰ سانتیمتر از دید دوربین دوم ۱۴۰.
- شکل ۷۹- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، بار اول تحریک، ۷۶ سانتیمتر ۱۴۰.

- شکل ۸۰-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، بار دوم تحریک، ۷۶.۵ سانتیمتر ۱۴۱
- شکل ۸۱-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، بار سوم تحریک، ۷۶ سانتیمتر ۱۴۱
- شکل ۸۲-۰ شروع آزمایش ارتعاش آزاد مربوط به ارتفاع ۷۰ سانتیمتر از دید دوربین دوم FVWR70WB7 ۱۴۲
- شکل ۸۳-۰ اعمال جابجایی اولیه ۲۵ سانتیمتر در آزمایش ارتعاش آزاد ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، از دید دوربین دوم ۱۴۲
- شکل ۸۴-۰ اعمال جابجایی اولیه ۲۵ سانتیمتر در آزمایش ارتعاش آزاد ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، از دید دوربین دوم ۱۴۲
- شکل ۱-۰ نمایشی از بازدید مخزن ۳۸ در جزیره خارگ و نشان دهنده ابعاد نسبی بزرگی مخزن ۱۴۴
- شکل ۲-۰ نمای داخلی از مخزن یک میلیون بشکه‌ای شماره ۳۸ در حال ساخت در بازدید از مخازن با سقف شناور جزیره خارگ ۱۴۵
- شکل ۳-۰ دریچه خروجی آب از جداره های مخزن ۱۴۶
- شکل ۴-۰ حوضچه های ورودی و خروجی لوله ها به مخازن ۱۴۶
- شکل ۵-۰ نمایی از پوسته مخزن که نشان دهنه ابعاد ورقهای مخزن میباشد ۱۴۷
- شکل ۶-۰ ورودی آدم رو MANHOLE در جداره مخزن ۱۴۷
- شکل ۷-۰ ضخامت جوش صفحات تقویت کننده به جداره مخزن جهت احداث MANHOLE ۱۴۸
- شکل ۸-۰ قرار گرفتن مخزن بر روی پایه هایی به نام درخت (عملیات مرسوم به درختکاری) ۱۴۹
- شکل ۹-۰ قرار گرفتن سقف تاج شکل مخزن بر روی پایه های سقف LEG ۱۴۹
- شکل ۱۰-۰ سوراخ های تعبیه شده در سقف جهت گذراندن پایه ها LEG ۱۴۹
- شکل ۱۱-۰ سقف شناور شامل جداکننده ها و سلول ها (خن) ۱۵۰
- شکل ۱۲-۰ فاصله بین دیواره خارجی سقف مخزن و جدار داخلی مخزن که با Tube seal پر میشود ۱۵۱
- شکل ۱۳-۰ میلههای نگهدارنده ضربه سقف در دو جهت دورانی و عمودی ۱۵۲
- شکل ۱۴-۰ استفاده از guide pole جهت بهره برداری و نجسبیدن سقف به جداره ها (محسن سلطانی، حسین زینلی، ساخت مخازن سقف شناور) ۱۵۲
- شکل ۱۵-۰ نمایی از سقف شناور مخزن ۳۰۰۰۰۰ بشکه ای همراه با نردبان دسترسی به سقف، واقع در پالایشگاه نفت تهران ۱۵۴
- شکل ۱۶-۰ تصاویری از مخازن ۳۰۰۰۰۰ بشکه ای همراه با نردبان دسترسی به سقف از نمای بیرونی، واقع در پالایشگاه نفت تهران ۱۵۵

فصل ۱ – مقدمه، معرفی سقف‌های شناور و بررسی ادبیات فنی

۱-۱- مقدمه

در شهرها و مجموعه های صنعتی، همواره مایعاتی از قبیل آب و مواد سوختی دائما در حال مصرف می‌باشند که این سیالات باید از محل تولید به محل مصرف حمل شوند. اما مشکل از آنجا ناشی می شود که مقدار تولید و مصرف، حتی در طی یک شبانه روز، تغییر قابل توجهی داشته و طراحی سیستم حمل و نقل برای اوج مصرف، بسیار هزینه بر، غیر اقتصادی و نامطمئن خواهد بود. از این رو مهندسان هیدرولیک، آب و نفت، سیستم انتقال سیالات را برای مقدار مصرف میانگین طراحی کرده و از مخازن ذخیره در محل مصرف بهره می برند. این مخازن در زمان‌هایی که مقدار مصرف پایین است، سیال را در خود ذخیره کرده و در زمان اوج مصرف، مقدار کمبود در سیستم انتقال را تامین می کنند.

می توان مخازن را از دیدگاه های زیر طبقه بندی نمود:

- نوع ماده‌ی درون مخزن مانند: مواد نفتی، مواد بسیار فرار و آتش زا، آب آشامیدنی، آب غیر آشامیدنی.
- اختلاف تراز کف مخزن از زمین که به سه نوع: مدفون، نیمه مدفون و هوایی تقسیم می شوند.
- جنس مواد تشکیل دهنده مانند: بتن، فولاد.
- شکل هندسی مخزن مانند: مستطیلی، استوانه، کره‌ای.
- نوع سقف مخزن مانند: سقف ثابت، سقف شناور.

آیین نامه های گوناگونی برای طراحی مخازن وجود دارند که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- BS 5337: The structural use of concrete for retaining aqueous liquids
- API 650
- ACI
- IITK-GSDMA: For seismic design of liquid storage tanks
- TM-5-809-10
- AWWA STANDARD
- ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخازن زمینی، نشریه شماره ۱۲۳

- بعضی از این آیین نامه ها تنها به تحلیل و طراحی مخازن بتنی و بعضی تنها به مخازن فولادی پرداخته اند. برای مثال: نشریه ۱۲۳ معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری ایران تنها مخازن بتنی را مورد نظر قرارداده و استاندارد API 650 آمریکا تنها مخازن فولادی را مورد بحث قرار داده است. نکته قابل تامل اینجاست که هیچکدام از این آیین نامه ها مخازن با سقف شناور را تحت پوشش خود قرار نداده اند و تنها

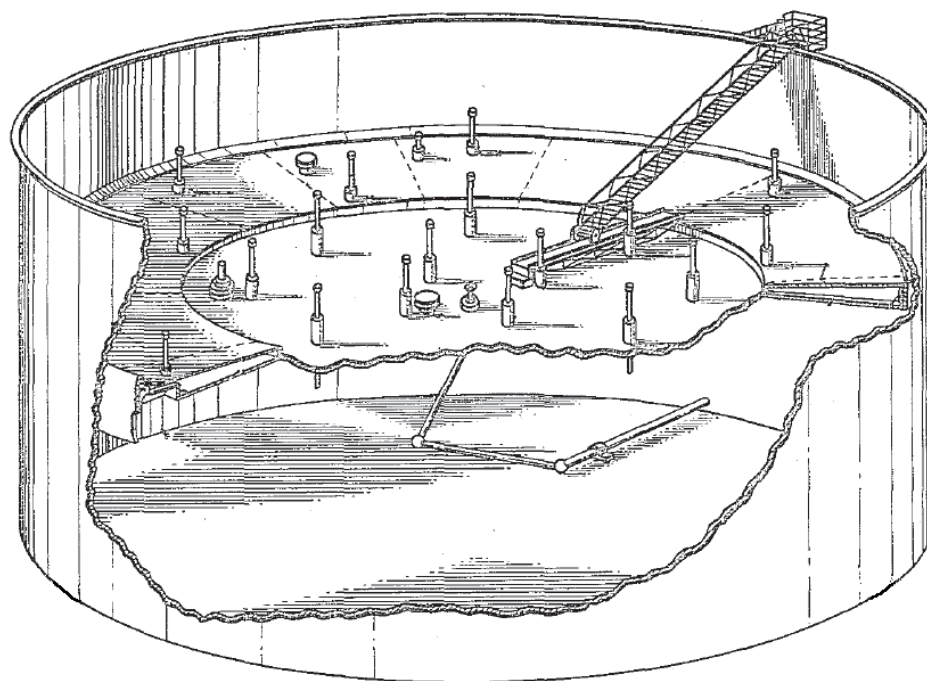
آیین نامه API 650 به ارائه نکات کلی در پیوست C برای مخازن با سقف شناور خارجی^۱ و در پیوست H برای مخازن با سقف شناور داخلی^۲ بسنده کرده است. بنابراین مشاهده می شود که این مخازن کاملاً مستعد تحقیق و مطالعه می باشند. در مرجع [۱] به طراحی، ساخت و بهره برداری از مخازن سقف شناور پرداخته شده است.

۱-۲- مخازن دارای سقف شناور

این مخازن بیشتر در صنعت نفت و پتروشیمی برای ذخیره مواد بسیار فرار و گران قیمت استفاده می شود. در این مخازن، سقف بر روی سیال شناور است و با پمپاژ سیال به داخل مخزن، به سمت بالا و با خروج سیال به سمت پایین حرکت می کند. این مخازن در کاهش تبخیر مواد از داخل مخزن و نیز کاهش خطر انفجار بسیار موثر عمل می کنند. در حالت کلی مخازن با سقف شناور به دو دسته تقسیم می شوند:

- مخازن با سقف شناور داخلی
- مخازن با سقف شناور خارجی

مخازن با سقف شناور داخلی دارای یک سقف ثابت در بالای مخزن می باشد ولی مخازن با سقف شناور خارجی تنها دارای یک سقف شناور بر روی سیال می باشند که در شکل ۱-۱ مشاهده می شوند.



شکل ۱-۱ مخزن با سقف شناور خارجی از نوع یک عرشه ای پانتون [۱]

¹ External floating roof tanks

² Internal floating roof tanks

۱-۳- انواع سقف های شناور

می دانیم که برای تامین شناوری هر جسمی باید نیرویی برابر ولی در خلاف جهت وزنش به آن وارد کنیم. برای ایجاد نیروی شناوری در سقف های شناور، باید قسمتی از سقف در سیال غوطه ور شود که مقدار حجم آن با توجه به قانون ارشمیدس از رابطه زیر بدست می آید:

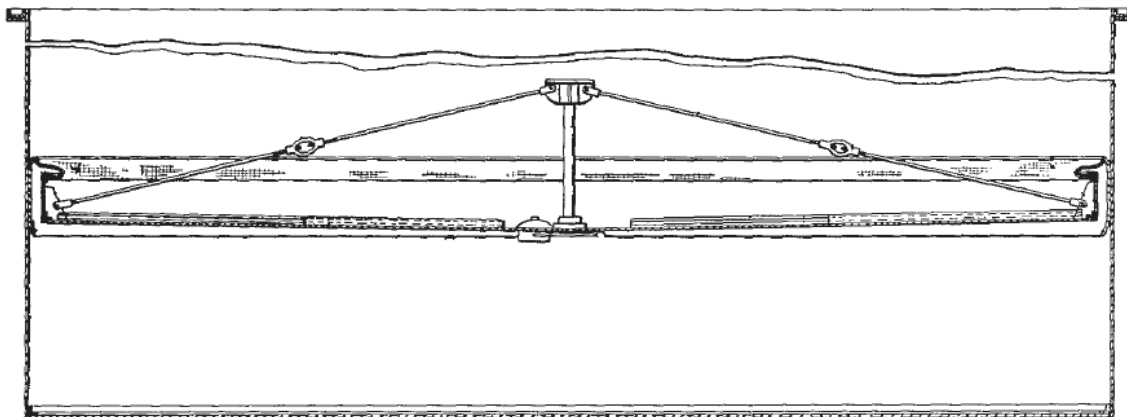
$$V = \frac{W}{\gamma}$$

که در آن: W وزن سقف، γ وزن واحد حجم سیال و V حجم فرو رفته از سقف در داخل سیال است. بنابراین سقف باید دارای اجزایی باشد که وزن مخصوص آنها نسبت به سیال درون مخزن بسیار کمتر است. در نتیجه با ورود این اجزا به داخل سیال، نیروی شناوری کافی برای خنثی کردن وزن سقف تامین می شود. سقف های شناور معمولاً از فولاد ساخته می شوند که دارای وزن مخصوصی در حدود ۸ تن بر متر مکعب می باشند، بنابراین باید با ایجاد محفظه هایی از هوا در قسمت هایی از سقف، وزن مخصوص آن کاهش یابد، به این محفظه ها پانتون (Pontoon) گفته می شود.

برحسب نوع تامین نیروی شناوری، این سقف ها را به سه دسته کلی تقسیم می کنند:

- با عرشه ی تشتکی (Pan type)
- با عرشه ی یک لایه (Annular pontoon type or Single deck type)
- با عرشه ی دو لایه (Double deck type)

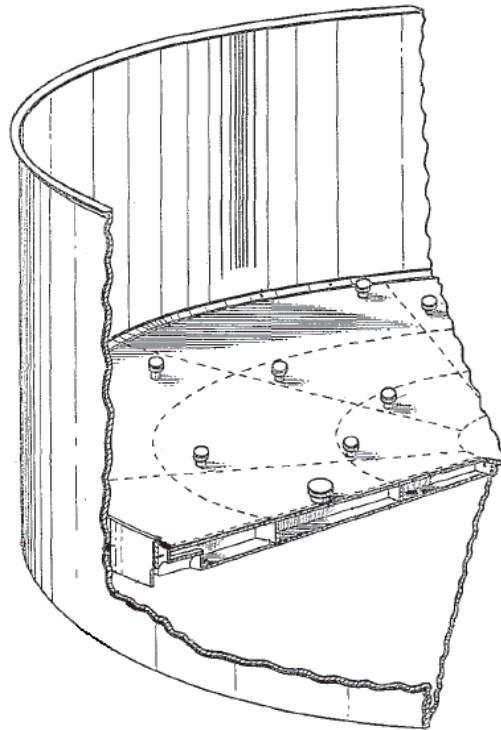
نوع تشتکی آن از دو قسمت تشکیل شده است: الف) صفحه مدوری از فولاد که قطر آن اندکی از قطر مخزن کمتر است. ب) ورقه ی از فولاد که در محیط صفحه فوق و بصورت عمود بر آن متصل شده است، در نتیجه این نوع سقف شناور شکلی شبیه تشت یا ماهی تابه خواهد داشت (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱ مخزن با سقف شناور خارجی با عرشه ی تشتکی [۱]

سقف ها از نوع یک عرشه ای از دو قسمت تشکیل شده اند: الف) قسمت مرکزی که در واقع یک صفحه مدور است. ب) قسمت محیطی که متشکل از دو صفحه با فاصله اندک در راستای قائم است که در واقع همان پانتون می باشد که برای تامین نیروی شناوری تعبیه شده است. (شکل ۱-۱)

نوع دو عرشه ای از دو صفحه با فاصله اندک در راستای قائم تشکیل شده است، بنابراین نیروی شناوری بر تمام سطح آن اثر می کند. (شکل ۱-۳)



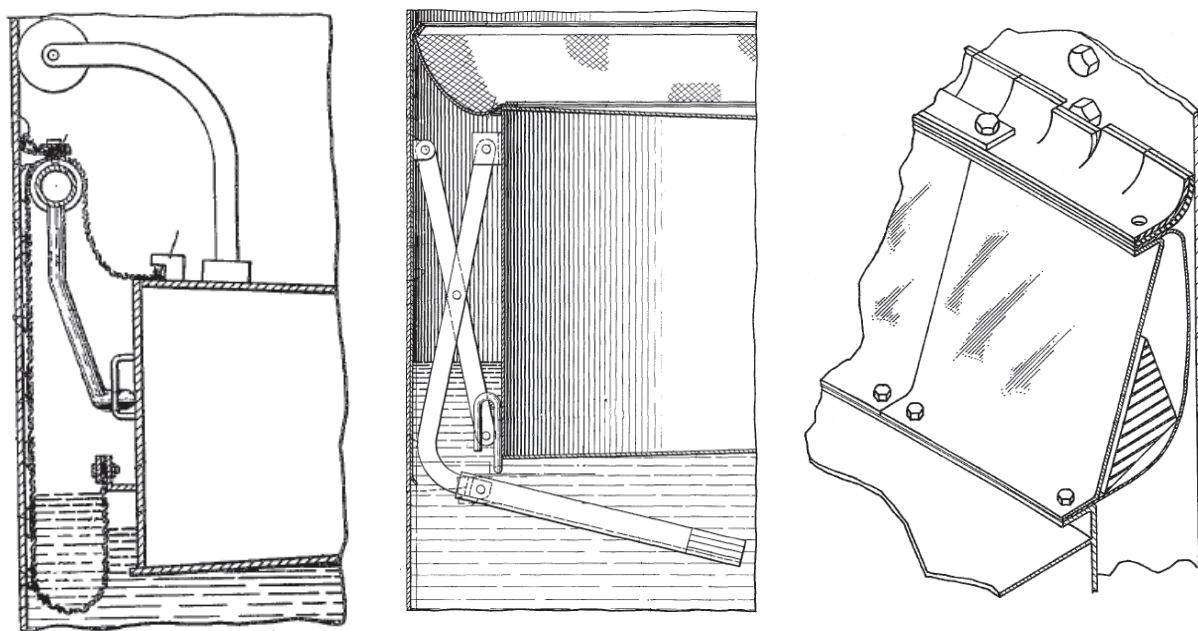
شکل ۱-۳ مقطعی از مخزن با سقف شناور خارجی با عرشه دو لایه [۱]

۱-۴- تجهیزات سقف های شناور

۱-۴-۱- تجهیزات لازم جهت آب بند نمودن سقف

قطر تمام سقف های شناور کوچک تر از قطر مخزن می باشد تا امکان حرکت در جهت قائم را فراهم آورد. از آنجا که مواد بسیار فرار و آتش زا در این مخازن ذخیره می شوند، نباید با هوای آزاد در تماس باشند، بنابراین باید این فضای آزاد با مواد و مصالح غیر قابل نفوذ پوشیده شوند. مکانیزمی که برای درزگیری این فضا و در عین حال فراهم نمودن آزادی برای حرکت قائم سقف استفاده می شود، عایق بندی^۱ نامیده می شود. چند نمونه از عایق بندی ها در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.

¹ Sealing



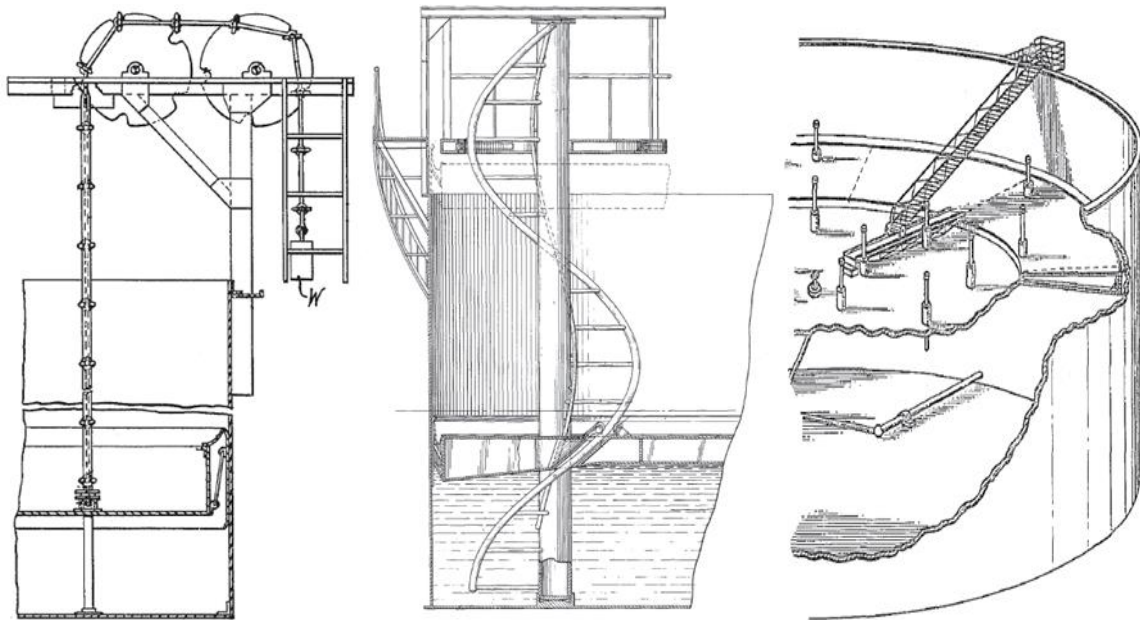
شکل ۴-۱ سه نوع سیستم عایق بندی ثبت شده در اداره ثبت اختراع آمریکا [۱]

بخش اصلی سیستم عایق بندی از منسوجات منعطف اشباع شده و غیرقابل نفوذ می باشد که به عنوان مثال می توان از نئوپرن (neoprene) نام برد. این منسوجات در یک انتها به قسمت فوقانی سقف شناور متصل هستند. اما مکانی برای اتصال انتهای دیگر به طوری که فضای باز پوشیده شود وجود ندارد. به همین دلیل از عضوی به نام کفش (shoe) استفاده می شود. این اعضا صفحات فولادی می باشند که با اعضای به دیواره مخزن فشرده می شوند. منسوجات به قسمت فوقانی کفش که دارای یک توآمدگی می باشد، متصل شده اند. ارتفاع کفش ها را به گونه ای انتخاب می کنند که لبه پایینی آن در سیال غرق شود و بدین ترتیب تبخیر سیال از فضای احتمالی بین جداره مخزن و کفش به حداقل برسد. البته گاهی برای کاهش تبخیر از فضای بین کفش و جداره از عایق بندی ثانویه (secondary sealing) بهره می برند. سیستم، بگونه ای طراحی می شود که حالت ارتجاعی داشته و در صورت جابجایی افقی سقف نسبت به مخزن، یک نیروی بازگرداننده سقف را به محل اولیه خود بازگرداند. (شایان ذکر است، در مراحل سرویس سقف بارهای جانبی به سقف وارد می شوند که سبب جابه جایی افقی آن می گردند).

۱-۴-۲- نردبان

از دیگر عناصر مخازن نردبان می باشد. در مخازن با سقف ثابت، تنها یک نردبان در قسمت پیرامونی مخزن کافی است اما در مخازن دارای سقف شناور باید نردبان دیگری در داخل مخزن برای انتقال نیروی انسانی به روی سقف فراهم شود. با توجه به حرکت قائم سقف، نمی توان از نردبان های معمول با ارتفاع ثابت استفاده کرد. بنابراین باید نردبانی طراحی گردد که

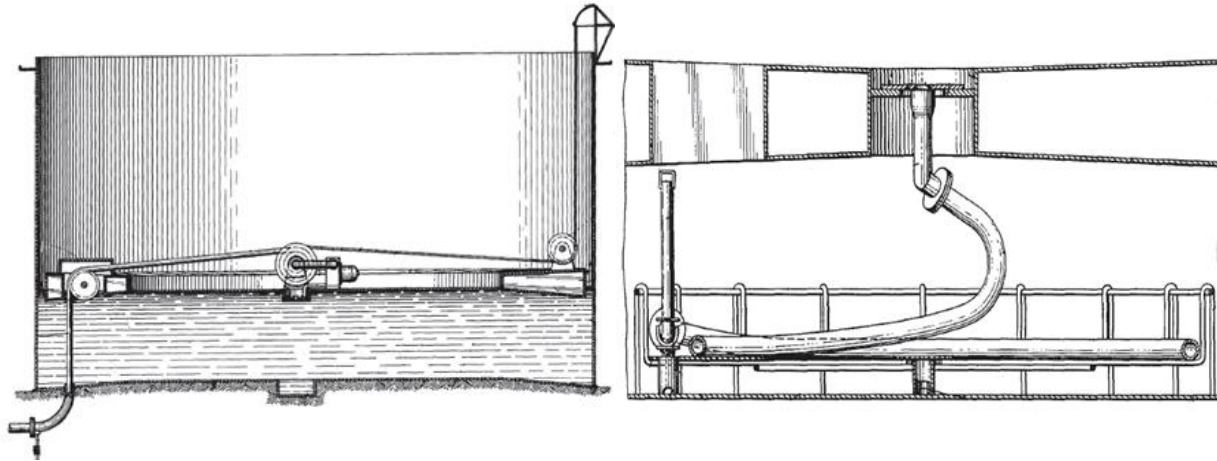
علاوه بر اینکه ارتفاع لازم برای حرکت از لبه فوقانی مخزن بر روی سقف را در تمامی حالات بهره برداری فراهم می آورد، دارای ارتفاع پله ثابت و مطلوب باشد. برای حل این موضوع اختراعات مختلفی در اداره ثبت اختراع آمریکا به ثبت رسیده است. (شکل ۵-۱)



شکل ۵-۱ سه نوع نردبان ثبت شده در اداره ثبت اختراع آمریکا [۱]

۱-۴-۳- تاسیسات زهکشی آب‌های ناشی از بارندگی روی سقف

سقف‌های مخازن سقف ثابت معمولاً به شکل گنبدی یا مخروطی طراحی و ساخته می شوند، در اینصورت برف و باران و گرد و غبار بر اثر مولفه وزن خود، از روی سقف به جداره خارجی مخزن حرکت کرده و دفع می شوند. در مخازن سقف شناور، به دلیل پایین تر بودن سطح سقف نسبت به لبه های مخزن، نمی توان برف و باران را به روش فوق زهکشی کرد. در این شرایط آب جمع شده بر روی سقف را باید از روی لبه های مخزن پمپاژ کرد و یا از زیر سقف و از داخل سیال به صورت ثقلی به خارج هدایت نمود. برای این امر اختراعات مختلفی در اداره ثبت اختراع آمریکا به ثبت رسیده است که چند نمونه از آن ها در شکل ۶-۱ نشان داده شده اند.



شکل ۱-۶ دو نوع زهکش ثابت شده در اداره ثبت اختراع آمریکا: زهکشی ثقیلی و زهکشی توسط پمپاژ [۱]

۱-۵- رویکرد آیین نامه API650 به طراحی مخازن نفتی با سقف شناور

آیین نامه API60 2016 [۲] در قسمت Annex E، بخش E.1 ینگونه بیان می نماید: طراحی لرزه ای سقف های شناور فراتر از اهداف این آیین نامه می باشد. این موضوع می تواند ضرورت تحقیق در مورد مخازن نفتی با سقف شناور را بهتر نشان دهد.

The design procedures contained in this Annex are based on a 5 % damped response spectra for the impulsive mode and 0.5 % damped spectra for the convective mode supported at grade with adjustments for site-specific soil characteristics. Application to tanks supported on a framework elevated above grade is beyond the scope of this Annex. **Seismic design of floating roofs is beyond the scope of this Annex.**

شکل ۱-۷ اشاره آیین نامه API650 به عدم شمول طراحی لرزه ای سقف مخازن شناور

۱-۶-۱- بررسی پژوهش های گذشته

۱-۶-۱-۱ آسیب های وارده به مخازن سقف شناور تحت اثر تحریکات لرزه ای

تعداد زیادی از مخازن موجود در جزیره خارگ مخازن دارای سقف شناور می باشند. همچنین در پالایشگاه نفت تهران نیز مخازن سقف شناور نقش مهمی را دارند. در پیوست الف، گزارش مختصری از بازدید از جزیره خارگ و پالایشگاه نفت تهران ارائه شده است. وقتی سیالی که باید درون مخزن ذخیره شود، بنزین سنگین^۱ یا نفت سفید باشد به دلیل اینکه درجه حرارت تبخیر سیال پایین می باشد، در اثر تبخیر گاز تولید می نماید، لذا برای اینکه این عمل باعث رخ دادن انفجار نگردد، از سقف شناور استفاده می شود. بدین صورت که در اثر تماس سقف مایع داخل مخزن حجم فضای خالی جهت ایجاد گاز در

¹ Naphtha

مخزن به صفر می‌رسد و از تجمع این گاز و در نهایت انفجار احتمالی جلوگیری می‌کند [۳]. مخازن با سقف شناور به صورت گسترده ای در صنعت نفت کشور استفاده می‌شوند. حضور سقف شناور سبب می‌شود تا بخار شدن سیال داخل مخزن کمتر صورت گرفته و محصول دارای کیفیت بالاتری باشد. از طرفی هنگام تخلیه این مخازن، وزن خود سقف جهت تخلیه سیال کمک می‌نماید.

کاربرد گسترده مخازن با سقف شناور به منظور ذخیره فرآورده های فرار و آتش‌زا به حدود سال‌های ۱۹۴۰ باز می‌گردد. جهت بیان اهمیت موضوع، به ذکر مواردی از آتش سوزی مخازن از سال ۱۹۵۰ تا کنون پرداخته شده است. در بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ آن دسته از آتش سوزی های مخازن نفتی که در رسانه‌ها مطرح شدند، سالانه بین ۱۵ تا ۲۰ مورد بوده‌اند. نکته‌ی قابل تامل آن است که بر اساس تحقیقات هنری پرسون و آندرز لورنمارک [۴] درصد موفقیت در خاموشی مخازن بالا نبوده و مخازنی که با موفقیت خاموش شدند حداکثر قطری برابر با ۴۰ تا ۵۰ متر داشتند و بزرگترین مخزنی که تاکنون با موفقیت خاموش شده‌است دارای قطری برابر با ۸۲ متر بوده است. این در حالی است که مخازن موجود در جزیره خارگ دارای قطری بیش از ۱۰۰ متر می‌باشند. به نظر می‌رسد استفاده از سیستم متحرک پاشش فوم، امری ضروری در خاموشی موفقیت آمیز مخازن است چراکه موردی یافت نشده که تنها با استفاده از سیستم ثابت پاشش فوم بتواند آتش را با موفقیت خاموش کند. در جدول ۱-۱ تعداد حوادث مخازن نفتی در بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۰ ارائه شده است [۵].

جدول ۱-۱ تعداد حوادث مخازن نفتی در بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۰ [۵]

دهه	۱۹۵۰	۱۹۶۰	۱۹۷۰	۱۹۸۰	۱۹۹۰
تعداد آتش سوزی	۱۳	۲۸	۸۰	۱۳۵	۱۶۱

بزرگی حوادث ذکر شده از آتش سوزی کناره سقف تا آتش سوزی تقریباً کل پایانه‌ی نفتی را شامل می‌شود. حوادث از نظر موضوعی و مقدار اطلاعات در دسترس به هفت دسته تقسیم می‌شوند:

- ۱) آتش سوزی کل سطح با اطلاعات کامل و زمان اطفاء حریق
- ۲) آتش سوزی کل سطح با اطلاعات کمتر از حالت قبل
- ۳) آتش سوزی کل سطح با کمبود شدید اطلاعات
- ۴) آتش سوزی عایق کناره‌ی سقف
- ۵) آتش سوزی چند مخزن. امکان ارزیابی نحوه‌ی اطفاء حریق امکان پذیر نمی‌باشد.
- ۶) اطلاعات بسیار محدود
- ۷) پاشش فوم برای پوشش خطر احتمالی، بدون آتش سوزی

تعداد حوادثی که در هر دسته قرار می‌گیرند بر اساس تحقیقات هنری پرسون و آندرز لورنمارک در جدول ۲-۱ نشان داده شده‌است [۴].

جدول ۱-۲ تعداد حوادث آتش‌سوزی در هریک از دسته‌ها [۴]

شماره دسته	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
تعداد آتش سوزی	۱۷	۱۴	۲۳	۷۹	۸۰	۲۵۲	۱۴

از آنجا که اطفاء حریق عایق کناره‌ی سقف (مورد ۴ در جدول ۱-۲) نسبتاً به آسانی صورت می‌گیرد، ممکن است آتش سوزی بسیاری از این قبیل در سرتاسر جهان صورت گرفته باشد اما خبر آن در رسانه‌ها و منابع دیگر منعکس نشده باشد. در ۲۰ آتش سوزی از این نوع، اطفاء حریق با سیستم‌های پاشش ثابت انجام گرفته است، در ۴۰ مورد نیز با سیستم‌های قابل انتقال. تنها در یک مورد سیستم ثابت نتوانسته است آتش را خاموش کند. گزارش LASTFIRE [۵] نشان می‌دهد که احتمال تبدیل شدن آتش کناره‌ی سقف شناور به آتش کل سطح مخزن بسیار ناچیز است. از آنجا که مخازن با سقف شناور معمولاً بسیار بزرگ می‌باشند، از مشکل سازترین مخازن نیز محسوب می‌شوند به طوری که بزرگترین مخازن موجود در گزارشات آتش سوزی دارای سقف شناور می‌باشند.

اهمیت تحقیق درباره‌ی مخازن با سقف شناور خارجی وقتی بیشتر آشکار می‌شود که طبق گزارش انجمن کنترل صدمات حداقل ۱۱۰ مورد از ۴۸۰ مورد مخازن دچار آتش سوزی شده در ۵۰ سال گذشته به مخازن دارای سقف شناور مربوط می‌شوند [۶]. نمونه‌هایی از این فاجعه‌ها که در ادبیات فنی ناتک^۱ نامیده می‌شود [۷]، در مرجع Cooper 1997 [۸] مربوط به زلزله انکوريج^۲، در مراجع Nishi, H., Yamada, M., Zama, Sh., Hatayama, Ken., Sekine, K, 2008 [۹]، Yamauchi, Y., Kamei, A., Zama, S., Uchida, Y., 2006 [۱۰] مربوط به زلزله نیگاتا^۳ ۱۹۶۴ و زلزله دریای ژاپن^۴ ۱۹۸۳، در مرجع Sezen, H., Elwood, K., Whittaker, A., Mosalam, Kh., Wallace, J., Stanton, J. 2000 [۱۱] مربوط به زلزله از میت ترکیه^۵ ۱۹۹۵، در مراجع Hatayama 2013 [12] Hatayama 2008 [۱۳] مربوط به زلزله توکاجی اوکی^۶ ۲۰۱۳ و زلزله توهو کو^۷ ۲۰۱۱ ارائه شده‌اند. خساراتی که بواسطه ایجاد تلاطم تحت اثر زلزله‌های ارائه شده ایجاد می‌شوند، شامل غرق شدن سقف، کمانش پانتون سقف و همچنین ایجاد آتش سوزی در مخازن می‌باشند. در تحقیقی دیگر Cacciatore و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۷ به بررسی خرابی‌های وارد به سقف شناور هنگام زلزله پرداختند. بر اساس آن مطالعه، از مهمترین زمین‌لرزه‌هایی که آسیب‌های جدی بر مخازن دارای سقف شناور وارد نموده‌اند، می‌توان به زلزله نیگاتای ژاپن (۱۹۶۴)، از میر ترکیه (۱۹۹۹) و توکاشی اوکی ژاپن (۲۰۰۳) اشاره نمود. در مخازن بزرگ زمینی، سقف‌های شناور جهت محافظت سیال در برابر اتمسفر، کاربرد زیادی دارد. نوسانات سقف شناور در اندرکنش با سیال در

¹ Natech² Anchorage earthquake 1964³ Niigata earthquake of 1964⁴ Nihonkai-chubu (Japan sea) Earthquake of 1983⁵ Izmit earthquake of 1999⁶ Tokachi-oki Earthquake of 2003⁷ Tohoku earthquake of 2011

پدیده تشدید، هنگام ایجاد شدن فرکانس های پایین زلزله، سبب خسارات مهمی از قبیل آتش سوزی، غرق شدن سقف و خرابی مخزن می شود. بنابراین مطالعه رفتار دینامیکی سقف شناور تحت اثر زلزله مهم می باشد [۱۵]. در این تحقیق به درگیری معادلات ارتعاش سقف و اثر غیرخطی تلاطم در تحلیل پرداخته شده است. نتیجه مطالعات عددی در این تحقیق نشان می دهد که: اول: صرف نظر از اثرات غیرخطی تلاطم، به صورت قابل ملاحظه ای سبب برآورد کم تنش ها در سقف شناور می شود، حتی در مواقعی که اثرات غیر خطی کم هستند. دوم: کم برآورد نمودن تنش ها بواسطه در نظر نگرفتن اثرات غیرخطی تلاطم در سقف شناور، با کاهش ارتفاع سیال در مخازن سقف شناور، بیشتر می شود.

در سحرگاه ۱۷ آگوست ۱۹۹۹ زمین لرزه ای به بزرگای ۷.۴ ریشتر در چند کیلومتری پالایشگاهی در ازمیت ترکیه به وقوع پیوست. طبق آمار رسمی این زمین لرزه فاجعه ای عظیم با بیش از ۱۸۰۰۰ نفر کشته بود. صدمات مالی نیز طبق تحقیقات لورا و همکاران در حدود ۱۶ میلیارد دلار آمریکا برآورد شده است [۱۶].

پالایشگاه مذکور که توسط شرکت های آمریکایی ساخته شده بود صدمات شدید سازه ای دید که موجب رها شدن نفت در آب های آزاد منطقه گردید. آتش سوزی به مدت سه روز خارج از کنترل بود که موجب تخلیه ی ساکنین منطقه شد. اهمیت دیگر این زمین لرزه از آن است که اولین زلزله در نزدیکی یک پالایشگاه بزرگ است. این پالایشگاه در سال ۱۹۶۱ ساخته شد و برای ۱۰ سال مالکیت و بهره برداری آن، از آن شرکت Caltex بود. بیشترین طرح های توسعه در دهه های ۱۹۷۰ و ۸۰ اجرا شدند. این پالایشگاه طبق استانداردهای جهانی و با کنترل کیفی شرکت های چندملیتی در این زمینه ساخته شده است. در شکل ۸-۱ آتش سوزی و آسیب های وارده بر مخازن با سقف شناور در زمین لرزه ی ازمیت ترکیه نشان داده شده است [۱۷].



شکل ۸-۱ آتش‌سوزی و آسیب‌های وارده بر مخازن با سقف شناور در زمین‌لرزه‌ی ازمیت ترکیه ۱۹۹۹ [۱۷]

آتش ابتدا در ۴ مخزن نفتا با سقف شناور آغاز شد. نفتا ماده‌ای فرار با دمای احتراق پایین است. تلاطم نفتا عایق سقف را شکسته و به روی سقف نشت کرد. آتش از جرقه‌های مالش فلز سقف و جداره‌ی مخزن آغاز شد. در عصر روز اول آتش به ۲ مخزن نفتای دیگر سرایت نمود. آتش به مخازن نفت خام و سایر فرآورده‌های نفتی نیز گسترش یافت. گفته می‌شود که در این منطقه ۴۵ مخزن با سقف شناور وجود داشته است. سقف ۵ عدد از آن‌ها غرق شده و نیازمند تعمیرات اساسی یا جایگزینی می‌باشند. به سایر این نوع مخازن نیز صدمات جدی وارد شد. صدمات وارد بر مخازن شامل کمانش پافیلی دیواره‌ی مخازن، اعوجاج سقف بواسطه تلاطم سیال، آسیب به عایق سقف و ترک خوردگی اتصال سقف و جداره در مخازن با سقف ثابت می‌باشد.



شکل ۹-۱ شناور شدن سقف مخزن و خرابی سقف (زلزله ازمیت ترکیه، ۱۹۹۹) [۱۷]

Yazici and Cili, 2008 [۱۸] در گزارشی از خسارات ناشی زلزله کوجایلی^۱ ۱۹۹۹ ترکیه، اعلام کردند که در پالایشگاه توپراس^۲ بیش از ۳۰ مخزن سقف شناور، آسیب دیدند. فردای روز زلزله، گروه تحقیقاتی سونامی، یک لایه ی ضخیم نفتی بین ۲ تا ۱۵ سانتی متر را در خط ساحلی جنوب ازمیر، بندر کوچک ماهیگیری گوزلیلی مشاهده نمودند که احتمالاً از تاسیسات پالایشگاه توپراس نشت کرده بودند.



شکل ۱۰-۱ پالایشگاه توپراس، مخازن دارای سقف شناور دچار حریق شدند [۱۷]

زلزله سال ۲۰۰۳ توکاچی اوکی ژاپن در جنوب شرقی هوکایدو رخ داد، در حوزه رسوبی یوفوتسو، منجر به زمین لرزه‌های با دامنه بزرگ و دوره تناوب بالا (۸-۴ ثانیه) گردید [۱۳]. این زمین لرزه موجب تلاطم مواد نفتی داخل مخازن شده و

^۱ Kocaeli earthquake 1999

^۲ Tüpras

آسیب‌های جدی به این مخان وارد آورد. بیشترین آسیب به پالایشگاهی در شهر توماکومی واقع در حوزه یوفوتسو، جنوب غرب هوکایدو، وارد آمد و به ۷ مخزن سقف شناور آسیب‌های جدی وارد شد. زمان تناوب مد اصلی تلاطم مواد داخل مخزن ۱۲-۵ ثانیه می‌باشد که در بازه زمان تناوب زلزله قرار داشت.

کوکسو و همکاران [۱۹] مدعی هستند که این اولین باری بود که شبکه‌های زلزله‌نگاری ژاپن، زلزله‌ای به بزرگی ۸ ریشتر، دامنه و زمان تناوب بالا و در منطقه‌ای با تعداد زیادی ایستگاه لرزه‌نگاری را ثبت کرده‌اند.

جدول ۱-۳ مخازن با سقف شناور که در شهر توماکومی به شدت آسیب دیدند [۱۹]

Table 1 Severely damaged floating-roof-type oil storage tanks in Tomakomai

Tank	Capacity (m ³)	Oil ^a	Diameter (m)	Liquid height ^b (%)	T_s^c (s)	Wh (observed) ^d (m)	Wh (calculated) ^e (m)	Damage
A	32,778	CR	42.7	89	7.0	~3	2.9	Ring fire
B	32,779	N	42.7	77	7.1	-	2.9	Roof sinking and open-top fire
C	43,872	K	49.4	91	7.6	>2.1	3.4	Roof sinking
D	43,872	K	49.4	91	7.6	>2.1	3.4	Roof sinking
E	43,872	S	49.4	64	8.1	-	2.9	Roof sinking
F	109,900	CR	78.2	59	12.0	-	1.3	Roof sinking
G	109,900	CR	78.2	58	12.1	~1.3	1.3	Roof sinking

^a CR Crude oil, N naphtha, K kerosene, S slop

^b Ratio of liquid height to tank height during the earthquake

^c Natural period of fundamental mode of sloshing

^d Observed maximum sloshing height

^e Maximum height of sloshed oil calculated from two horizontal components of observed ground motion by using a technique based on velocity potential theory (Zama 1985)

جزئیات ۷ مخزن آسیب دیده در شهر توماکومی در جدول ۱-۳ ارائه شده است. مخازن a و b دچار آتش سوزی شدند. مخزن a تنها در پیرامون سقف و به مدت ۷ ساعت دچار حریق شد که به اصطلاح به آن آتش حلقوی گفته می‌شود (شکل ۱-۱۱). سقف مخزن b غرق شده و در نتیجه تمام سطح بنزین سنگین موجود در آن با هوا در تماس بوده و دچار حریق در تمامی سطح خود شده است. آتش سوزی در این مخزن به مدت ۴۴ ساعت ادامه داشته است. خسارات وارده به مخزن b پس از ۴۴ ساعت آتش سوزی در شکل ۱-۱۳ نشان داده شده است. سقف مخازن c و d نیز غرق شده و نفت سفید داخل آن‌ها با هوا در تماس مستقیم قرار گرفت (شکل ۱-۱۳). تصور می‌شود که دلیل غرق شدن سقف‌ها، آسیب وارده به پانتون آن‌ها در اثر تلاطم زیاد سیال داخل آن می‌باشد.



ا) آتش‌سوزی حلقه‌ای مخزن نفت سفید (سمت چپ) [۱۹]

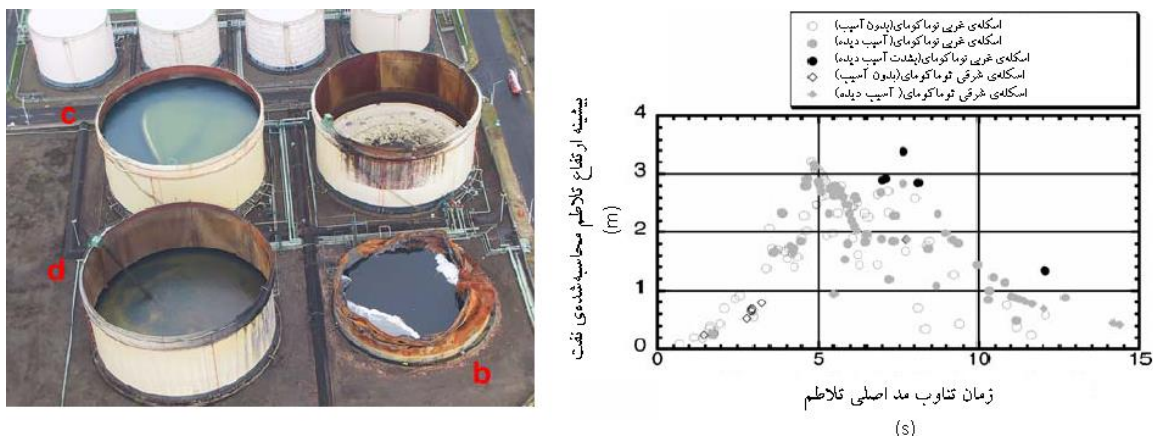


شکل ۱۱-۱۱) آتش‌سوزی کامل مخزن بنزین سنگین (سمت راست)



شکل ۱۲-۱۱ مخزن b در حال آتش‌سوزی. (زلزله‌ی توکاشی اوکی ژاپن ۲۰۰۳) [۱۹]

طبق محاسبات هاتایاما، بیشتر آسیب‌های وارده به مخازن ۴۰۰۰۰-۳۰۰۰۰ مترمکعبی بود که ارتفاع تلاطم آن‌ها به بیش از ۳ متر می‌رسید و منجر به آتش‌سوزی مخازن و غرق شدن سقف آن‌ها گردید. در مخازن با حجم ۴۰۰۰۰-۳۰۰۰۰ مترمکعب، مد اول ارتعاش حاکم بوده است اما در مخازن با حجم ۱۱۰۰۰۰ مترمکعب، ارتفاع حداکثر تلاطم ۱.۳ متر بوده و مد دوم ارتعاشی نیز ثبت شده است که نشان از آن دارد که در طراحی مخازن بزرگ و پیش‌بینی آسیب‌های وارده، باید مد دوم نیز مد نظر قرار گیرد [۱۳]. بیشینه ارتفاع تلاطم مخازن اسکله‌های غربی و شرقی توماکومای بر حسب زمان تناوب اصلی آن‌ها و میزان صدمات وارده در شکل ۱۳-۱ ارائه شده است [۱۹].



شکل ۱۳- ۱-۱۳ ارتفاع تلاطم و میزان آسیب دیدگی مخازن و غرق شدن سقف مخازن c و d [۱۹]

می‌توان شرایطی که مخازن را برای بروز آسیب‌های سنگین مستعد می‌سازند، با مقایسه ارتفاع تلاطم و آسیب‌های وارده به مخازن در زلزله توماکومی مشخص کرد. شکل ۱۳-۱ ارتفاع تلاطم را نسبت به زمان تناوب مخزن (T_s) نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که بیشترین آسیب به مخازن با $T_s = 7-8$ ثانیه با ارتفاع تلاطم بیش از ۳ متر وارد شده است. این T_s مربوط به مخازن پر با حجم ۳۰۰۰۰-۴۰۰۰۰ متر مکعب می‌باشد. باید توجه داشت که هیچ آسیب بسیار شدیدی به مخازن با حجم کمتر با وجود اینکه ارتفاع تلاطم بیش از ۳ متر نیز بوده است، وارد نشده است. دو مخزن با $T_s = 12$ ثانیه، با وجود ارتفاع تلاطم ۱.۳ متر غرق شده‌اند که در قسمت بعدی درباره آن‌ها بیشتر بحث خواهیم نمود.

با وجود اینکه حداکثر ارتفاع تلاطم در مخازن F و G ۱.۳ متر می‌باشد، سقف این دو مخزن غرق شده‌اند. ظرفیت هر دوی این مخازن ۱۱۰۰۰۰ متر مکعب می‌باشد. تاریخچه پاسخ مخزن نشان می‌دهد که مد دوم نوسان در این مخزن در مدت زمان مشخصی به شدت تحریک شده است.

با فرض اینکه سقف شکل سطح سیال را به خود بگیرد، مدهای بالاتر به این شکل، کرنش بیشتری در سقف ایجاد می‌کنند در حالی که تاثیر چندانی بر حداکثر ارتفاع تلاطم اندازه‌گیری شده در سطح داخلی جداره ندارند. بنابراین ممکن است صدمات مخازن F و G ناشی از حرکات مد دوم باشد. بنابراین مدهای بالاتر در صدمات وارده به مخازن با ظرفیت حدود ۱۰۰۰۰۰ متر مکعب حائز اهمیت می‌باشند.

زمان تناوب طبیعی محاسبه شده‌ی مد دوم مخازن F و G ۵.۶ برابر با ثانیه می‌باشد که در بازه‌ی بیشینه‌ی طیف پاسخ شبه سرعت لرزش زمین قرار می‌گیرد. این نتایج نشان می‌دهد که برای پیش‌بینی صدمات مخازن با ظرفیت‌های حدود صد هزار متر مکعب باید طیف وسیعی از زمین لرزه‌های با تناوب بالا که زمان تناوب‌های طبیعی اول و بالاتر را شامل می‌شود، مد نظر قرار داد.



شکل ۱۴-۱ خروج نفت در قسمت‌هایی که دچار کمانش شده‌اند در اثر پدیده تلاطم [۱۹]



شکل ۱۵-۱ آتش گرفتن مخازن نفت در زلزله توکاچی اکی-ژاپن (۲۰۰۳) [۱۹]



شکل ۱۶- ۱ سقف مخازن نفت خام ۴ روز پس از زلزله به طور کامل غرقاب شدند [۱۹]



شکل ۱۷- ۱ آتش گرفتن سقف مخزن در اثر پدیده تلاطم در زلزله توکاجی-اوی (۲۰۰۳) [۱۹]

۲-۶-۱- ارائه روش هایی جهت کاهش تلاطم در مخازن سقف شناور

ارائه روش هایی جهت کاهش تلاطم در مخازن سقف شناور، به دهه شصت میلادی برمی گردد، Yumoto, 1968 [۲۰]. Matsui 2005-2007 [۲۱] به مطالعه تلاطم و اندرکنش دینامیکی بین سیال و سقف شناور تحت اثر زلزله پرداخت، او پیشنهاد نمود جهت کاهش پاسخ های لرزه ای، سقف های شناور تک لایه، با سقف های شناور دو لایه جایگزین شوند. او به بررسی رفتار لرزه ای سه نوع سقف شناور به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی پرداخت. ۱- در حالت رینگ پانتون (سقف شناور تک لایه)، ۲- سقف شناور دو لایه ۳- ترکیب حالت یک و دو. او به بررسی صحت پاسخ روابط تحلیلی بر اساس نتایج آزمایشگاه پرداخت. مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه در این تحقیق یک مخزن به مقیاس یک صدم مخازن واقعی که به صورت معمول در صنعت نفت استفاده می شوند به حجم صد هزار مترمکعب بود. قطر مخزن آزمایشگاهی ۸۰ سانتیمتر بود. علت آزمایش آنها، صحت سنجی روابط موجود دینامیکی در برآورد رفتار لرزه ای سقف شناور هنگام زلزله بود.

Sakai and Inoue (2005) [۲۲] دو راهکار مخالف هم جهت کاهش آسیب های مرتبط با تلاطم در مخازن با سقف شناور ارائه دادند. راه حل اول: با افزایش سختی سقف با افزودن چند سخت کننده به آن، برای جلوگیری از کماتش و یا استفاده از سقف های شناور دو لایه^۱ به جای سقف های شناور تک لایه^۲. راه حل دوم: کاهش سختی کلی سقف با گذاشتن مصالحی لاستیک مانند با سختی بسیار پایین و قابلیت تغییر شکل بالا، در راستای شعاع و محیط سقف شناور، بین سقف دو لایه با المان های سخت کننده، به نحوی که سقف شناور بتواند همراه با موج های بوجود آمده از تلاطم، تغییر شکل داده اما از ایجاد تنش های بزرگ به دور باشد و به این نحو بتواند عملکرد خود را تا انتهای تلاطم ناشی از لرزش حفظ کند. البته در آن مقاله به صورت مبسوط این دو ایده ارائه نشده است.

Sakai and Inoue (2008) [۲۳] استفاده از میراگر ستون مایع تنظیم شده^۳ را به عنوان یک روش کنترل کننده ارتعاشی سقف شناور پیشنهاد نموده اند، آنها نشان داده اند در صورت استفاده مناسب از این میراگرها می توان، حداکثر ارتفاع تلاطم را تحت تحریکی که مخزن را مورد تشدید قرار داده است به نصف کاهش داد، هرچند که در تحقیق خود گفته اند که واقعی کردن این نظریه احتیاج به تحقیقات بیشتر دارد. این محققین پس از زلزله ۲۰۰۳ توکاجی اوکی ژاپن با بزرگای ۸ که تعداد زیادی از مخازن نفتی با سقف شناور را در توماکومی به خاطر تلاطم ایجاد شده در اثر زلزله با زمان تناوب (۴ تا ۸ ثانیه) بالا دچار آسیب نمود، چند روش مختلف شامل استفاده از جداسازها، میراگر ستون مایع تنظیم شونده را ارائه نمودند.

جداسازی لرزه ای نیز به عنوان یک راهکار جهت کاهش تلاطم مخازن سقف شناور ارائه شده است، De Angelis, M., Giannini, R and Paolacci, F (2010) [۲۴]. در این تحقیق آنها ابتدا رفتار لرزه ای یک مخزن فولادی سقف شناور را با استفاده از جداساز لرزه ای به صورت عددی بررسی کردند و پس از آن نتایج را با آزمایش میر لرزان بررسی کردند. ابعاد مخزن مدلسازی آنها، یک چهاردهم مخازن با ابعاد واقعی بود و آزمایشات را در دو حالت پایه ثابت و پایه جداسازی شده تنظیم نمودند. در حالت جداسازی شده دو نوع جداساز مورد استفاده قرار گرفت. مورد اول جداساز لاستیکی با میرایی

¹ Double deck floating roof

² Single deck floating roof

³ Tuned liquid column damper (TLCD)

بالا^۱، مورد دوم جداساز لغزشی همراه با میراکننده الاستو-پلاستیک^۲. نتایج حاکی از آن بوده است که استفاده از هر دو نوع جداساز، فشار ایجاد شده روی دیواره مخزن را هنگام زلزله، کاهش می دهد اما از سوی مقابل، با استفاده از این جداسازها، اثر کمی در کاهش ارتفاع تلاطم و در پی آن کاهش جابه جایی سقف شناور، مشاهده شده است.

راهکاری دیگر مانند راهکار Sakai and Inoue (2005) [۲۲] توسط محمود حسینی و فرشید جعفریه جهت کاهش تنش و در پی آن کاهش آسیب به سقف های شناور هنگام تلاطم ارائه شد [۲۵]. اساس این روش تقسیم کلی سقف شناور به چند قطعه شعاعی و محیطی بود به نحوی که در میان قطعات از مصالح نرم با ظرفیت تغییر شکل بالا استفاده شود، چنانکه هنگام تلاطم سقف بتواند به راحتی بدون آنکه در آن تنش های مخرب ایجاد شود، تغییر شکل دهند. شایان ذکر است که هرچند این روش برای کاهش مقادیر تنش در سقف شناور بسیار موثر بود اما در کاهش ارتفاع تلاطم تاثیری قابل توجهی نداشت.

به عنوان راهکاری دیگر Haiyan and Yuezhou, 2013 [۲۶] جهت کاهش ارتفاع تلاطم در مخازن سقف شناور، نصب دمپ‌های ویسکوز^۳ یا اصطکاکی^۴ را بین دیواره صلب مخزن و کناره سقف شناور، به عنوان یک سیستم کنترلی غیرفعال^۵، پیشنهاد نمودند. مطالعات آنها نشان داد، دامنه ارتفاع تلاطم، تنش های فشاری قائم، تنش های کششی حلقوی^۶ و ارتفاع برکنندگی پایه مخزن همگی با تعبیه این دمپ‌ها کاهش یافتند. نتایج آن ها همچنین حاکی از آن بود که مقادیر مختلف پاسخ های لرزه ای در مخازن بزرگ هوایی نیز با استفاده از انواع مختلف دمپ‌ها به صورت موثری، کاهش می یابد، هر چند از ویژگی های این دمپ‌ها و جزئیات نحوه نصب آن ها در تحقیق آنها ارائه نشده است [۲۶].

در مطالعات گذشته، تلاش هایی برای تشکیل معادلات تحلیلی مربوط به زوایای مختلف رفتار دینامیکی سقف شناور، انجام شده است. این مطالعات بیشتر بر روی تعیین تنش های لرزه ای در قسمت های مختلف سقف شناور تمرکز کرده اند. ارزیابی این تنش ها کلید اصلی جهت تقویت لرزه ای و مقاوم سازی سقف های شناور می باشد. در این راستا تحقیقات جامعی توسط محمد علی گودرزی از سال ۲۰۱۳ تاکنون انجام شده است [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰] که در ادامه به این مقالات پرداخته شده است. مود دوم حرکت سقف های شناور تک لایه سبب تغییر شکل های عمود بر صفحه در سقف شناور تک لایه می شود که در نهایت خرابی این سقف ها را در پیش دارد. گودرزی و همکاران در این تحقیق به ارائه روشی ساده جهت بدست آوردن جمع شدگی سقف شناور تک لایه تحت اثر مود دوم پرداختند. آنها در این راستا پنج مخزن سقف شناور را بررسی کردند و نتیجه معادلات ارائه شده آنها تطابق خوبی با نتایج آنالیز اجزاء محدود و آزمایشهای که در این زمینه سایر محققین انجام داده اند داشت [۲۷]. گودرزی در مقاله ای دیگر به ارائه یک روش تحلیلی جهت بدست آوردن میزان تنش های ایجاد شده در سقف شناور تک لایه، هنگام تحریکات لرزه ای و اثرات کاهنده سقف های شناور تک لایه در کاهش تلاطم پرداخته و فلوچارتی جهت طراحی سقف های شناور تک لایه ارائه کرده است [۲۸] [۲۹]. گودرزی در مقاله [۳۰] به بررسی

¹ High-damping rubber bearings devices

² Sliding isolators with elasto-plastic dampers

³ Viscous

⁴ Frictional

⁵ Passive control

⁶ Hoop tensile stress

پارامترهای مهم در طراحی لرزه مخازن سقف شناور دو لایه تحت اثر زلزله و ارائه یک روش کاربردی جهت ارزیابی تنش‌های ایجاد شده در سقف شناور پرداخته است. نتایج عددی او نشان می‌دهد اثرات غیر خطی هندسی می‌تواند به صورت قابل توجهی تنش‌ها را در سقف شناور کاهش دهد، اما تاثیر قابل توجهی بر روی کاهش دامنه تلاطم و فشارهای ایجاد شده زیر سقف ندارد. او همچنین نشان داد که جابجایی سقف شناور و فشار هیدرواستاتیک ایجاد شده روی صفحه پایینی سقف شناور باید در طراحی سقف لرزه ای سقف شناور در نظر گرفته شوند. گودرزی، صباغ یزدی و Marx [۳۱] به بررسی اثر دیواره‌های میراکننده، در مخازن مستطیلی تحت تحریکات دینامیکی پرداخته‌اند. تیغه دیوارها به طولی تقریباً یک‌دهم قطر مخزن، به صورت افقی و قائم در حالات مختلف از کف و دیوار مخزن به داخل سیال وارد می‌شد. در این تحقیق آن‌ها با استفاده از آزمایش و مفاهیم موجود، روشی تحلیلی جهت بدست آوردن درصد میرایی هیدرولیکی ارائه نموده‌اند. با توجه به نتایج آن‌ها این مقدار میرایی به صورت قابل توجهی تابع محل و بزرگی تیغه‌های میراکننده می‌باشد. در تلاشی دیگر گودرزی و صباغ یزدی [۳۲] به ارزیابی اثربخشی دیواره‌های فوقانی میراکننده در مقایسه با دیواره‌های میراکننده متداول در مخازن مستطیلی پرداخته‌اند. در این تحقیق آن‌ها با استفاده از آزمایشات انجام شده درصد میرایی هیدرودینامیکی را در دو حالت استفاده از تیغه‌های بالایی و پایینی و استفاده از آرایش تیغه‌های افقی، مقایسه نموده‌اند، همچنین روابط تحلیلی موجود را بسط داده و صحت روابط پیشنهادیشان را با آزمایش‌های که انجام داده‌اند، سنجیده‌اند. در فعالیتی دیگر گودرزی [۳۳] به بسط روشی تحلیلی جهت ارزیابی اندرکنش‌های دینامیکی پرداخته است.

حسینی و فرشاد منش [۳۴] در مقاله‌ای با عنوان "ارزیابی تأثیر تیغه‌های میراکننده چندگانه قائم در پدیده تلاطم مخازن مستطیلی تحت تحریکات سه مولفه ای زلزله" به بررسی کارایی حضور دیواره‌های موازی و در راستای موج (عمود بر هم) در مقایسه با دیواره‌های یک جهته پرداختند. نتایج تحلیل‌های عددی آن‌ها تحت تحریکات زلزله‌های مختلف حاکی از آن است که تنها استفاده از ۲ تیغه عمود بر هم ۴۰ درصد حداکثر ارتفاع سیال را کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که مولفه قائم زلزله تأثیر قابل توجهی در ارتفاع تلاطم ندارد. با توجه به آنکه تحلیل‌های غیر خطی تاریخچه زمانی بسیار وقت گیر هستند، حسینی، شادروان و فرشاد منش [۳۵] به ارائه روند ساده جهت ارزیابی تأثیر آرایش تیغه‌های میراکننده بر روی پدیده تلاطم در مخازن مستطیلی تحت تحریکات سه مولفه ای زلزله با استفاده از روش حجم محدود^۱ و شبکه عصبی مصنوعی^۲ پرداختند. نتایج مطالعات ایشان نشان می‌دهد، تطابق خوبی بین نتایج روش پیشنهادی آن‌ها در برآورد پارامترهای تلاطم در مقایسه با روش‌های زمان بر موجود است. در تلاشی دیگر حسینی، وثوقی فر و فرشاد منش [Hosseini; Vosoughifar and Farshadmanesh; 2013] [۳۶] به ارائه یک روش تحلیلی دینامیکی ساده جهت مدلسازی رفتار تلاطم در مخازن مستطیلی همراه با دیواره‌های قائم چندگانه پرداخته‌اند.

یکی دیگر از روشهای بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها، جداسازی لرزه‌ای می‌باشد. این روش عبارت است از نصب مکانیزم‌هایی که سازه یا اجزای آن را از حرکات زمین یا تکیه‌گاه تا حدی جدا می‌نمایند. در این روش با نرم نمودن مد اصلی سیستم، انرژی ورودی و نیروهای وارد به سازه کاهش یافته، ولی تغییر مکانهای آن افزایش می‌یابد. افزایش میرایی سیستم، علاوه بر

¹ Finite volume

² Artificial Neural Netwrok

کنترل این تغییر مکانها، می‌تواند موجب کاهش مضاعف نیروهای وارد بر سازه گردد. ملکی و ضیایی فر [۳۷] در مورد امکان استفاده از تیغه های میراکننده در مخازن استوانه ای ذخیره مایعات جداسازی شده تحت تحریک زلزله جهت کاهش پاسخ های لرزه ای به تحقیق پرداخته اند. نتایج تحلیل های انجام شده حاکی از آن است که تیغه‌ها در مخازن ذخیره استوانه‌ای تأثیر قابل توجهی بر کاهش دامنه تلاطم دارند که تأثیر آنها در مخازن جداسازی لرزه‌ای شده بیشتر می‌باشد. همچنین تیغه ها باعث کاهش تغییر مکان پایه در مخازن جداسازی لرزه‌ای شده میگردند. با تحلیل‌هایی که بر مخازن مختلف تحت اثر زلزله‌های متفاوت و با فرضهای منطقی در مورد تیغه‌های رینگی انجام شدند، نشان داده شد در حالیکه استفاده از تیغه ها در مخازن با پایه ثابت تأثیر زیادی بر برش پایه ندارد، در مخازن جداسازی شده استفاده از تیغه های رینگی می‌تواند باعث کاهش آن تا بیش از ۶٪ بطور متوسط گردد. همچنین می‌توان دید که جداسازی لرزه ای باعث کاهش برش پایه تا ۷۰٪ نسبت به مخازن با پایه ثابت می‌گردد.

مسئله مهم دیگر در بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن نفتی با سقف شناور، ایجاد فاصله بین سقف مخزن و دیواره هنگام وقوع زلزله می‌باشد. حسینی، سرور، سردار و جعفری [۳۸] به ارائه روشی ساده جهت بررسی حداکثر فاصله‌ی میان سقف و دیواره، پرداخته اند. در این فعالیت مخازن نفتی با سقف شناور واقع در جزیره خارگ به صورت موردی با استفاد از تکنیک اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته اند. در این تلاش جهت ارائه روشی ساده فرض شده است سقف شناور اثر تلاطم سیال را گرفته و المان های بین سقف و دیواره با استفاده از فرهایی که تنها فشار را تحمل می کنند پر شده اند. سقف صلب و دیواره با استفاده از المان های پوسته ای^۱ به صورت سه بعدی در نرم افزار آباکوس^۲ مدل شده‌اند. اثر ضربه‌ای قسمت پایین سیال در مخزن به صورت جرم اضافه بر روی دیواره در نظر گرفته شده است. در روش پیشنهادی فرض شده است در صورتیکه فاصله بین سقف و دیواره از حداکثر جابه جایی مجاز فرهای مدل شده بیشتر باشد، مخزن آسیب پذیر می باشد. حسینی، جعفریه، [۳۹] در راستای بهبود عملکرد لرزه ای سقف های شناور، با تقسیم سقف به چند قسمت انعطاف پذیر، به ارائه روشی جهت شکسته نشدن و آتش نگرفتن مخازن همراه با سقف شناور هنگام زلزله پرداخته اند. از معایب این روش مشکلات موجود در عملی ساختن آن در مقیاس واقعی می باشد. این تحقیق به صورت تحلیلی و با استفاده از نرم افزار اجزا محدود ANSYS انجام شده است و راستی آزمایی آن با آزمایش انجام نشده است.

موضوع مهم دیگر در مخازن دارای سقف شناور بدست آوردن تنش های لرزه ای و انجام فعالیت های تحلیلی جهت تشخیص مکانیسم خرابی مخازن با سقف شناور می باشد. گودرزی [۲۷] به بررسی پاسخ لرزه ای سقف های شناور تک لایه ناشی از مد دوم تلاطم پرداخته است. مد دوم تلاطم، سقف را دچار تغییر شکل های عمود بر صفحه می نماید. این تغییر شکل ها سبب جمع شدگی سقف و تغییر شکل بیضوی پانتون^۳ می شوند. در این تلاش روشی تحلیلی جهت بدست آوردن جمع شدگی پانتون ارائه شده است و با تحلیل عددی ۵ مخزن به صحت سنجی روابط پرداخته شده است.

¹ Shell² ABAQUS³ Pantoon

در راستای تشکیل معادلات حاکم بر پدیده تلاطم، معادلات باید به نحوی باشند که نیرو و لنگرهای وارد شده بر دیواره مخزن را هنگام تحریک در آزمایشات به درستی برآورد کنند. ابراهیم [۴۰] تا سال ۲۰۰۵ ادبیات مربوط به این موضوع را به خوبی در کتاب خود ارائه کرده است.

استفاده از بافل مدور ثابت به دیواره جهت کاهش ارتفاع تلاطم به سال ۱۹۶۳ میلادی برمی گردد، گارزا و آبرامسون [۴۱] تعدادی آزمایش در مخازن استوانه با حضور بافل ثابت در دیواره انجام دادند و متوجه شدند که زمان تناوب ارتعاش آزاد سطح، وابسته به مساحت بافل و ارتفاع آن از کف مخزن، می باشد. ماتسویی در سال ۲۰۰۷ میلادی [۴۲] به ارائه روشی تحلیلی جهت بدست آوردن تاریخچه پاسخ تلاطم سقف شناور تحت اثر زلزله در مخزن استوانه ای ذخیره سیال با سقف شناور، با استفاده از معادلات لاگرانژ پرداخته است. در روش او سیال غیرلزج، غیرچرخشی و تراکم ناپذیر فرض شده است و سقف شناور را به صورت صفحه الاستیک و ایزوتروپیک فرض شده است. او اندرکنش سقف و سیال را با استفاده از تابع پتانسیل سرعت در نظر گرفته است و در نهایت با تعداد حل عددی به صحت سنجی روابط خود پرداخته است، این مقاله یکی از مراجع اصلی معادلات تشکیل شده در این پایان نامه می باشد. او در ادامه مطالعات خود [۴۳] به ارائه یک روش تحلیلی صریح برای حل مسئله تلاطم^۱ در مخازن استوانه ای با سقف شناور ساده تک لایه همراه با پانتون، تحت تحریک لرزه ای، پرداخته است. سقف شناور تک لایه پانتونی، از یک عرشه داخلی (که در مدل ها به صورت یک صفحه الاستیک ایزوتروپیک با ضخامت و جرم یکنواخت در نظر گرفته شده است) و یک پانتون خارجی (که در مدل ها به صورت یک تیر منحنی الاستیک در نظر گرفته شده است) تشکیل شده است. محتویات مخزن غیر لزج^۲، غیر چرخشی^۳ و تراکم ناپذیر^۴ در نظر گرفته شده است. با بسط پاسخ سقف شناور به مدهای ارتعاش آزاد در هوا و استفاده از تکنیک بسط بسط - فوریه^۵ در مختصات استوانه ای پاسخ در قالب صریح، بدست آمده است که در تطابق کامل با چهارچوب تئوری پتانسیل خطی می باشد. جهت بررسی تاثیر نوع سقف (ساده تک لایه یا دولایه) و سختی سقف شناور بر روی پاسخ تلاطم نتایج عددی او ارائه شده اند [۴۳]. در سال ۱۹۸۴ میلادی، ساکای و همکاران [۴۴] به تحقیق در راستای بدست آوردن معادلات حاکم بر تاریخچه تلاطم مخازن با سقف شناور به صورت تئوری و آزمایشگاهی پرداختند. آنالیز آنها از تئوری تابع پتانسیل سرعت بهره برده است تا بتوانند اندرکنش بین سیال و سقف شناور را در نظر بگیرند. قسمت اصلی از معادلات آنها با معادلات ماتسویی (در قسمت قبل به آن اشاره شد) و گلزار (که در قسمت بعدی به آن می پردازیم) یکسان است. تئوری پیشنهادی آنها با آزمایش میز لرزان راستی آزمایی شده است. نتایج اصلی آن ها را می توان در سه مورد ارائه نمود. اول: عدم تغییر قابل توجه زمان تناوب مود اول حرکت مخزن حاوی سیال با سقف شناور در مقایسه با مخازن بدون سقف می باشد. دوم: مودهای بالاتر حرکت سقف شناور باید در تعیین نمودن تنش های ایجاد شده در سقف شناور دولایه در نظر گرفته شود. سوم: تغییر شکل های محلی صفحه زیر سقف شناور دو لایه، نقش مهمی در رفتار تلاطمی دارد.

¹ Sloshing

² Inviscid

³ Irrotational

⁴ Incompressible

⁵ Fourier-Bessel expansion technique

گلزار و همکاران [۴۵، ۴۶] با استفاده از بسط اصل تغییرات همپلتون به تشکیل معادلات حاکم بر رفتار تلاطمی سقف شناور مخازن با سقف شناور، تحت تحریکات لرزه ای پرداختند. آنها پاسخ رفتار لرزه ای سقف شناور را تحت تحریکات لرزه‌ای مختلف شامل زلزله‌های حوزه نزدیک و دور مورد ارزیابی قرار دادند. آنها علاوه بر مقایسه تاریخیچه تلاطمی مخازن در دو حالت با سقف شناور و بدون آن، به بررسی دامنه ارتفاع تلاطم، نیروهای جانبی و لنگرهای واژگونی ایجاد شده هنگام تلاطم پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که ارتفاع دامنه تلاطم سقف مخازن سقف شناور، تنهای تابع زمان تناوب مود اول ارتعاش سقف شناور مخزن می باشد. نتیجه دیگر آنها آن است که، با وجود آنکه زلزله‌های با دامنه بلند و حوزه دور، در محاسبه ارتفاع دامنه تلاطم کنترل کننده است، اما در مورد نیروهای ایجاد شده در دیواره و لنگر واژگونی زلزله‌های حوزه نزدیک کنترل کننده هستند. این موضوع بدان معناست که نمی توان از یک طیف زلزله جهت برآورد حداکثر دامنه تلاطم و برآورد نیروهای جانبی روی دیواره استفاده نمود.

غلامحسین برادران و محمدعلی فروغان گرانشی در رشته مهندسی مکانیک در دانشگاه شهید باهنر کرمان [۴۷]، به تحلیل سقف‌های شناور با روش خطی سازی مجازی پرداخته اند. در مقاله آنها اینگونه آمده است: "با توجه به اینکه جابجایی سقف در برابر ضخامت آن زیاد است، تئوری غشایی بر رفتار سقف شناور حاکم می باشد. بر مبنای این تئوری معادلات حاکم بر سقف بصورت دو معادله دیفرانسیل غیر خطی که به یکدیگر کوپل هستند در می آید. تغییر شکلهای بزرگ، بارگذاری پیچیده و شرایط مرزی غیر معمول باعث شده که حل معادله حاکم بر سقف شناور مشکل باشد. در این مقاله نوعی روش خطی سازی مجازی برای حل این معادلات ارائه گردیده است. در این روش ابتدا با تعریف چند تابع معادلات را به صورت مناسب خطی می کنیم. سپس معادلات خطی مقدار مرزی را به چند معادله مقدار اولیه تبدیل کرده و حل می کنیم. جواب نهایی از ترکیب خطی این جوابها بدست می آید. افزایش سرعت حل معادلات و عدم نیاز به سعی و خطا و حذف فرضهای ساده کننده از مزایای این روش می باشد. تطابق خوبی بین نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با جوابهای به دست آمده از روشهای قبلی که بر پایه سعی و خطا هستند وجود دارد. علاوه بر این با توجه به سریع بودن روش پیشنهادی تاثیر بعضی از پارامترها بر روی رفتار سقف شناور به کمک آن مورد بررسی قرار گرفته است." گاریس و همکاران [۴۸] به ارائه رابطه ای بین میزان نیروی مستهلک کنند تیغه های بافل استوانه ای و خطی واقع در سیال و خصوصیات مکانیکی تیغه های بافل تحت جریان سینوسی پرداختند. آنها نیروی وارد بر تیغه بافل را به صورت تابعی از شدت جریان سینوسی با یک زمان تناوب و دامنه مشخص، زمان تناوب ارتعاش سیال و عرض بافل ارائه نموده اند. تیغه های مذکور به صورت ثابت در زیر سیال قرار داشتند. با توجه به آنکه بافل مورد نظر در این رساله به صورت شناور و در حالت کل تحت اثر تحریکات لرزه ای است، از روابط موجود در این مقاله استفاده قابل توجهی نشده است.

۷-۱- چالش مورد نظر و ارائه راهکار برای رفع آن

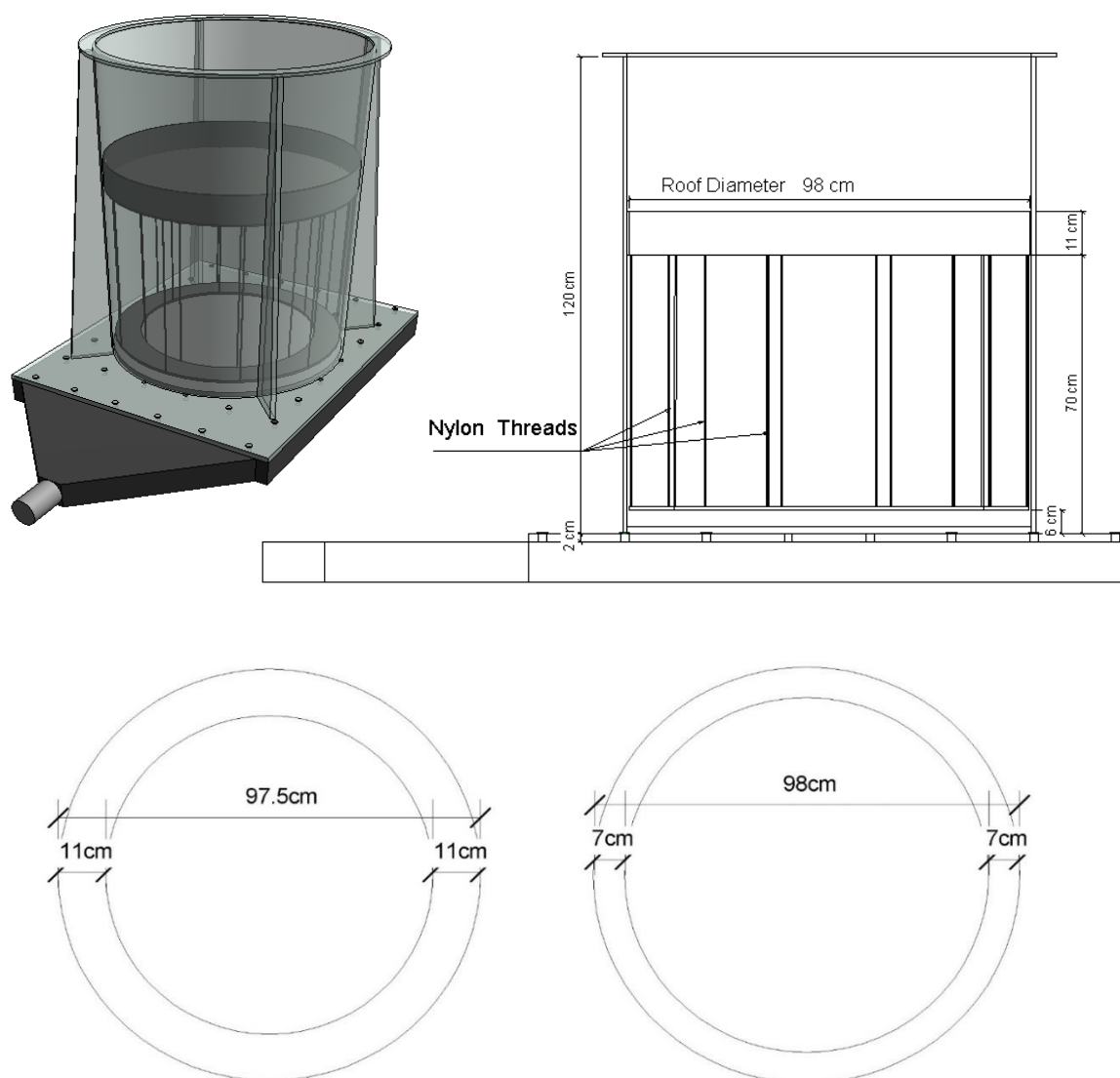
با توجه به مطالب ارائه شده، چالش اصلی مورد نظر این رساله غرق شدن سقف یا آتش سوزی مخازن با سقف شناور حین زلزله می باشد. در تحریک مد اول ارتعاش سقف هنگام تلاطم^۱، از آنجا که قطر مخزن در حالت مورب قرار می گیرد، فاصله زیادی بین دیواره و سقف مخزن ایجاد می شود، در این حالت، سیال می تواند از این فاصله به روی سقف آمده و سبب غرق شدن سقف شود و یا با بروز جرقه ای بواسطه ضربات ایجاد شده و حضور ماده آتش زا، آتش سوزی رخ دهد. هدف اصلی این پروژه ارائه روشی نوین جهت کنترل رفتار لرزه ای سقف شناور و جلوگیری از غرق شدن و آتش سوزی آن هنگام زلزله می باشد.

در راستای یافتن راه حل، پس از بررسی چندین راهکار، روشی مبتنی بر استفاده از میرایی خود سیال انتخاب شد. در این روش با استفاده از میرایی ذاتی سیال و به کارگیری یک بافل مدور افقی و آویخته از سقف شناور مخزن که در بخش ثابت^۲ سیال قرار می گیرد، سعی بر آن است که بتوان حرکت سقف شناور را در سیال با استفاده از میرایی ایجاد شده، کنترل نمود. به بیان دیگر با استفاده از یک حلقه بزرگ در نزدیکی کف مخزن که با استفاده از زنجیر و یا کابل از زیر سقف شناور آویخته شده و در بخش ثابت سیال (که حرکات کمی نسبت به قسمت های دیگر سیال هنگام تحریک لرزه ای مخزن دارند) حرکت می کنند، حرکات تلاطمی سقف شناور را کاهش داد. در شکل هایی که در ادامه ارائه شده اند، مخزن پلاکسی گلاس مورد آزمایش، بافل مدور آویخته^۳ و غوطه ور در سیال که بصورت یک رینگ افقی در قسمت ثابت سیال قرار می گیرند نشان داده شده اند.

¹ Sloshing

² Impulsive

³ Suspended Annular Baffle (SAB)



شکل ۱۸-۱ نمای سه بعدی و مقطع سیستم پیشنهادی به همراه بافل های مدور آویخته SAB از سقف شناور

فصل ۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- علت انجام آزمایش

ایده استفاده از بافل های مدور آویخته از سقف شناور، جهت کاهش دامنه تلاطم سقف شناور هنگام زلزله که در آخرین قسمت فصل قبل ارائه شد، ایده ای جدید است. ابتدا سعی شد تا با نرم افزارهای تحلیلی و اجزا محدود به مدلسازی این ایده پرداخته شود، در این راستا از نرم افزار های ABAQUS, ANSYS, XFLOW, LS-DYNA, FLOW-3D مورد بررسی قرار گرفتند. هر یک از این نرم افزارها توانایی قابل توجهی در قسمتی از مدل مورد نظر ایده پیشنهادی را دارند اما مواردی از جمله در نظر گرفتن انعطاف بافل آویخته هنگام تلاطم، شل و سفت شدن کابل های واسط میان سقف شناور و بافل، مدلسازی حرکت آزادانه یک جسم انعطاف پذیر (بافل) در داخل سیال و متصل به سقف شناور، زمان بسیار بالای آنالیز برای همگرا کردن جواب ها در یک بازه زمانی کم (برای مثال جهت آنالیز یک ثانیه ارتعاش واقعی سیستم پیشنهادی احتیاج به ۱۵ ساعت زمان آنالیز با استفاده از نرم افزار LS-DYNA و سیستم های سخت افزاری به روز بود)، تصمیم گرفته شد تا با ساخت یک مخزن مقیاس شده با توجه به در نظر گرفتن محدودیت های موجود در آزمایش های میز لرزان پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (عرض میز لرزان یک متر، ارتعاش یکطرفه)، کارایی سیستم پیشنهادی که هدف آن کاهش تلاطم به کمک بافل مدور آویخته می باشد، بررسی شود. شایان ذکر است که نمونه مشابه انجام شده در تحقیقات قبلی مشاهده نشده بود که بتوان با استناد به نتایج آنها کارایی ایده پیشنهادی را نشان داد و انجام آزمایش ها می توانست کارایی ایده پیشنهادی را متقن تر نشان دهد.

۲-۲- شرح آزمایش ها

جهت بررسی کارکرد ایده پیشنهادی که شامل آویختن یک بافل مدور از سقف شناور در سیال می باشد، ۶۰ دسته آزمایش در سه ارتفاع مختلف ۲۰، ۵۰ و ۷۰ سانتیمتری سیال انجام شد (در هر ارتفاع سیال ۲۰ دسته آزمایش). این ۲۰ دسته آزمایش شامل چهار گروه (بدون سقف شناور، با سقف شناور و بدون بافل^۱، با سقف شناور و بافل به عرض ۷ سانتیمتر^۲، با سقف شناور و بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر^۳) و هر گروه شامل ۵ نوع تحریک (ارتعاش آزاد^۴، تحریک هارمونیک^۵ (از دامنه ۲ تا ۱۵ میلی متر در صورت امکان آزمایش و سر ریز نشدن سیال از مخزن) و تحریک لرزه ای تحت اثر سه زلزله با نام های:

^۱ NB (None-Baffled)

^۲ Baffled Width 7 cm (BW7)

^۳ Baffled Width 11 cm (BW11)

^۴ Free vibration

^۵ Harmonic

چی چی^۱، لوما پریتا^۲ و کوجاییلی^۳ می باشد. هر دسته از آزمایشات با تحریک هارمونیک وابسته به شرایط عملی شدن آزمایش با دامنه های ۲، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۵ میلی متر تحریک شدند، به بیان دیگر هر آزمایش هارمونیک با فرکانس یکسان، خود شامل سه تا ۵ آزمایش بود (بسته به تعداد دامنه های تحریکی). هر دسته از آزمایشات لرزه ای نیز خود سه بار انجام شدند، برای مثال در شرایط کاملاً یکسان سه بار زلزله چی-چی به میز اعمال شد. هدف از این سه بار آن بود که بررسی شود که رندم بودن جابه جایی اولیه و سایر شرایط چقدر در تفاوت حداکثر دامنه تاثیر گذار است. آزمایشات بر روی میز لرزان آزمایشگاه پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله با مدیریت مهندس جبارزاده انجام شدند.

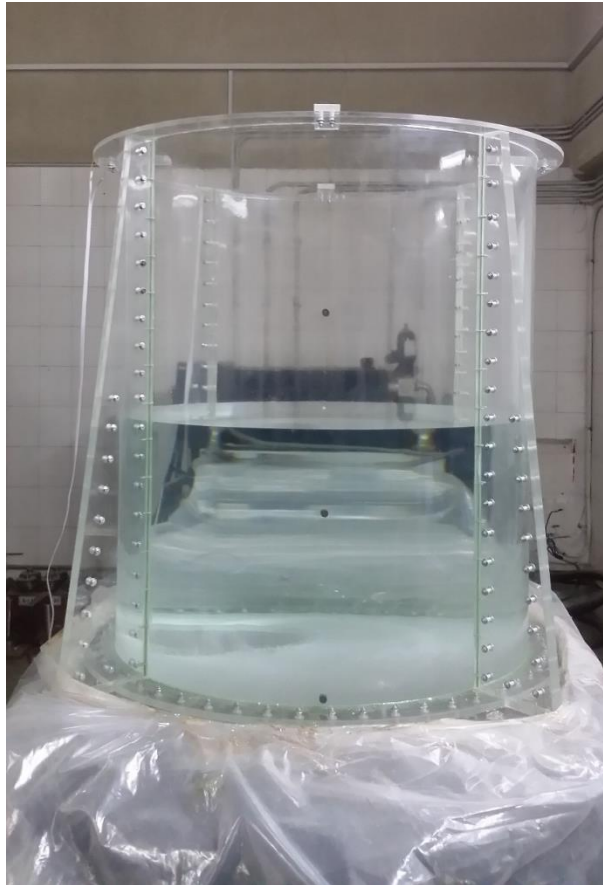
۲-۳- تنظیمات آزمایش

در آزمایش ها از یک مخزن به قطر داخلی ۹۹ سانتیمتر و قطر خارجی ۱۰۱ سانتیمتر با جنس پلاکسی گلاس، به ضخامت ۲ سانتیمتر چنانچه در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، استفاده شد. علت استفاده از جنس پلکسی گلاس، آن است که بتوان هنگام تحریک در آزمایش، داخل مخزن را مشاهده نمود. این مخزن در موسسه تحقیقات آب واقع در محله حکیمه تهران، به سفارش پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ساخته شد.

¹ Chi-Chi

² Loma Prieta

³ Kocaeli



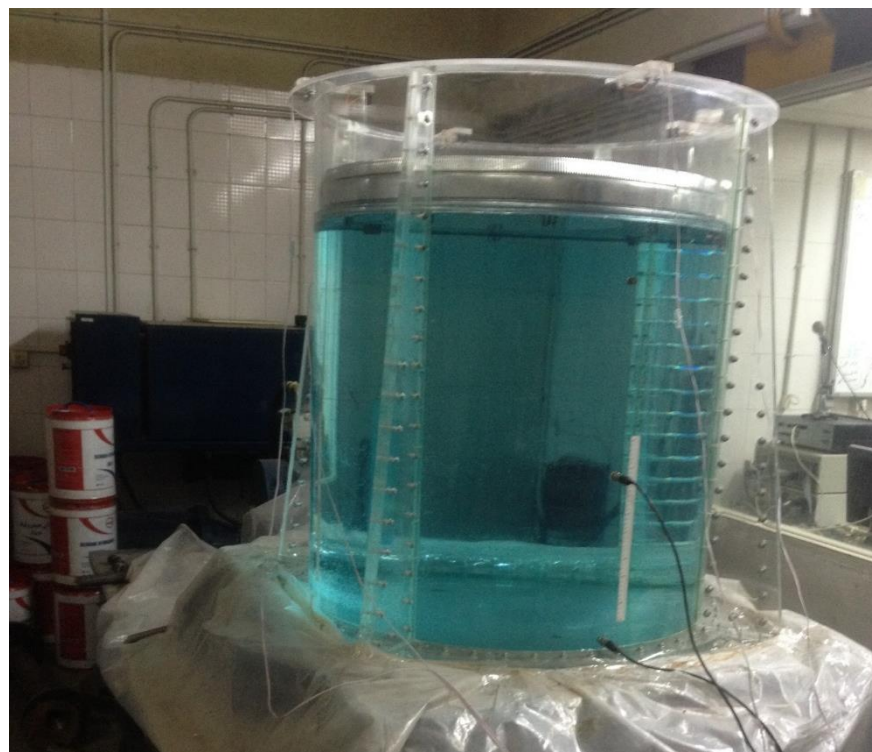
شکل ۱-۲ مخزن پلاکسی گلاس حاوی سیال، قرار گرفته بر روی میز لرزان پژوهشگاه زلزله

مخزن پلاکسی گلاس مورد آزمایش، شامل چهار قطاع ربع دایره ای است که ابتدا قالب آن با استفاده از چوب ساخته شده و سپس مایع پلاکسی گلاس در قالب ریخته و پخته شده است. پس از ساخته شدن چهار قطاع، بر روی آنها پرداخت صورت گرفته و با استفاده از پیچ و چسب کلروفرم، به یکدیگر چسبیده شده اند و بعد از تست آب بندی، از موسسه تحقیقات آب به پژوهشگاه منتقل شد.

سقف شناور مدل آزمایشگاهی با ورق گالوانیزه ۵۰ (ورق به قطر ۰.۵ میل متر) با قطر خارجی ۹۸ سانتیمتر ساخته شد. در تحریکات لرزه ای اگر قرار بود به صورت هندسی لبه این سقف با مقیاس یک صدم، کوچک شود، می بایست لبه آن یک سانتیمتر ساخته می شد که در اینصورت با کوچکترین تحریک مخزن غرق می شد، بنابراین به جهت آنکه بتوان در تغییر شکل های بزرگ رفتار سقف را مورد بررسی قرار داد، لبه آن با ۱۱ سانتیمتر ارتفاع ساخته شد. وزن سقف شناور مدل آزمایشگاه ۵.۰۵ کیلوگرم می باشد. رفتار این سقف در مطالعات تحلیلی (فصل چهارم) به صورت صلب در نظر گرفته شد.



شکل ۲-۲ ساختن سقف شناور با استفاده از ورق های به ضخامت ۰.۵ میلی متر



شکل ۲-۳ مخزن پلاستیکی گلاس پر شده از آب همراه با سقف شناور

جهت ثبت حرکات سقف شناور هنگام تحریک، چهار سنسور جابه جایی سنج و چهار دوربین در چهار سمت مخزن قرار گرفتند، یک دوربین نیز به صورت دید پرنده^۱ ناظر بر کل فرایند آزمایش در آزمایشگاه تعبیه شد (شکل ۵-۲). بازه دید سنسور جابه جایی سنج انتخابی با نام تجاری GP2Y0A02YK از ۱۰ تا ۱۵۰ سانتیمتر بود. نحوه عملکرد سنسور مذکور چنان بود که با فرستادن یک سیگنال به سقف شناور و برگشت آن به سنسور، یک ولتاژ گزارش می نمود. ولتاژ دریافتی در یک رابطه تقریباً خطی قرار می گرفت، به نحوی که هر ولتاژ نشان دهنده یک فاصله مشخص از سنسور بود. بنابراین با برداشت ولتاژهای مربوطه و استفاده از یک برنامه درونیابی در نرم افزار متلب فاصله سقف شناور از سنسور در زمان های مختلف ثبت شد.

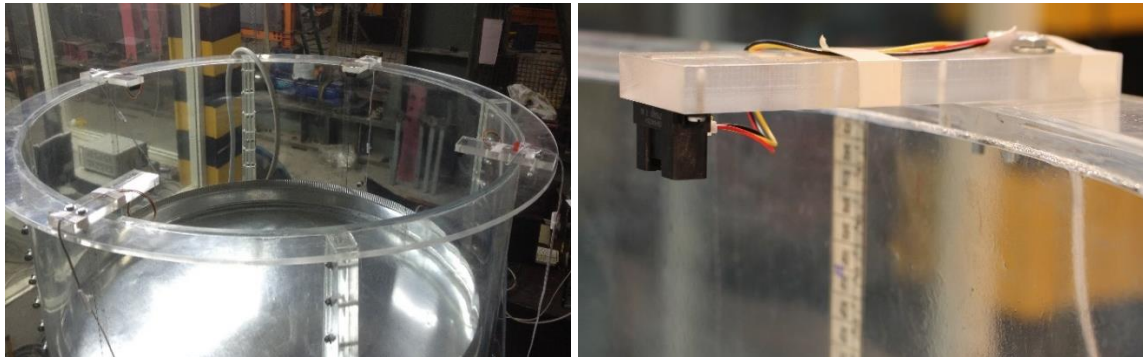


شکل ۴-۲ قرار گرفتن سقف شناور بر روی سیال در مخزن و موقعیت قرار گیری سنسورها جهت اندازه گیری جابه جایی سقف

¹ Bird view

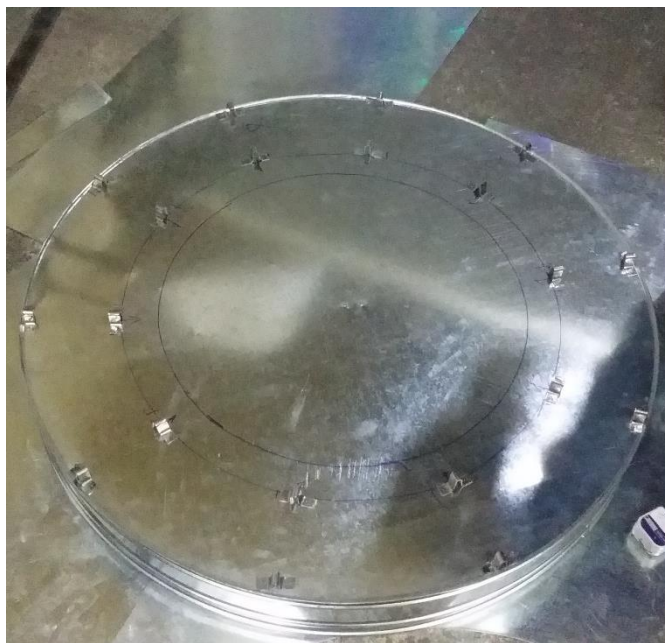


شکل ۲-۵ تصویر مخزن از دید دوربین دید پرنده، شامل جانمایی چهار دوربین و چهار سنسور در آزمایش



شکل ۲-۶ نصب چهار سنسور جابه جایی سنج در چهار سمت اصلی مخزن

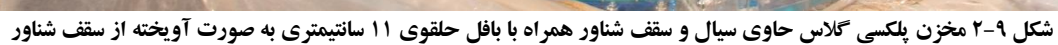
جهت آویختن بافل مدور به صورت غرق شده در سیال، نخ هایی از جنس پلاستیکی از قلاب هایی تعبیه شده در زیر سقف (شکل ۲-۷)، سقف شناور را به بافل مدور متصل کردند (شکل ۲-۷، شکل ۲-۸ و شکل ۲-۹). برای آنکه بافل به صورت متعادل و پایدار در ارتفاعی مشخص باقی بماند، قلاب ها در دو ردیف دایره ای به زیر سقف شناور با اتصال نقطه جوش متصل شدند. از سوی مقابل در لبه بافل مدور آویخته نیز سوراخ هایی ایجاد شدند، به نحوی که یک سوی نخ های پلاستیکی به حلقه های زیر سقف و سوی دیگر آن ها به سوراخ های قرار گرفته در لبه بافل گره زده شدند.

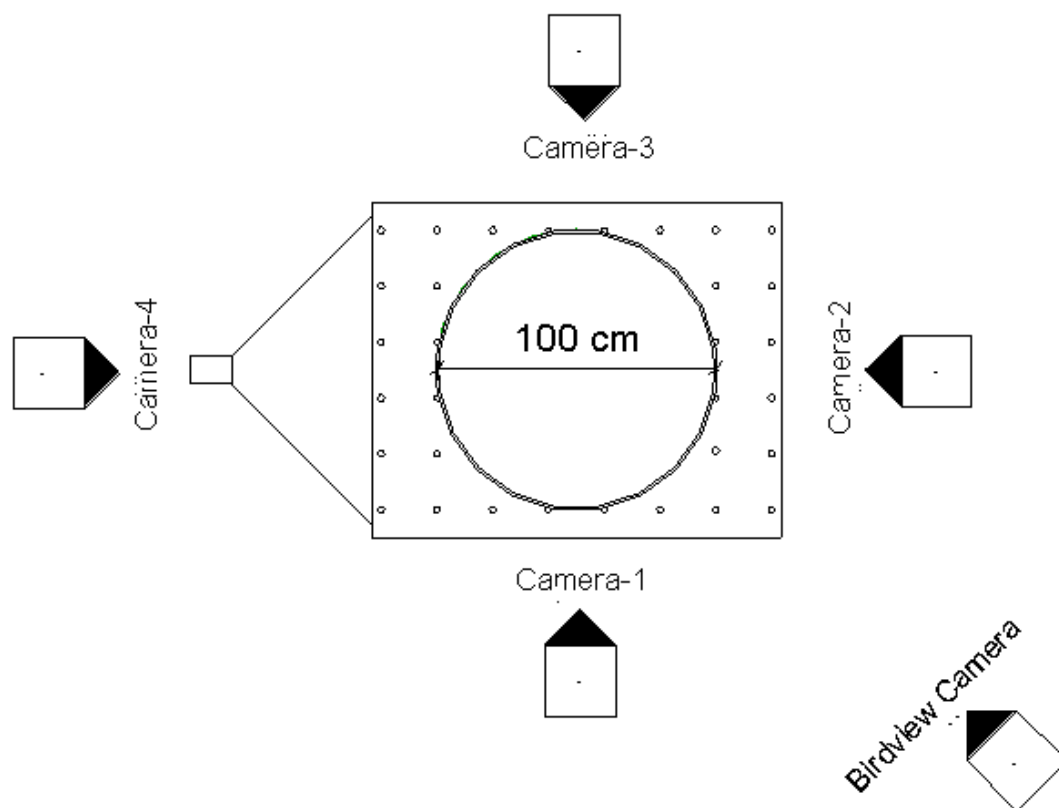


شکل ۲-۷ الحاق قلاب‌های در زیر سقف شناور جهت آویزان نمودن بافل حلقوی از سقف

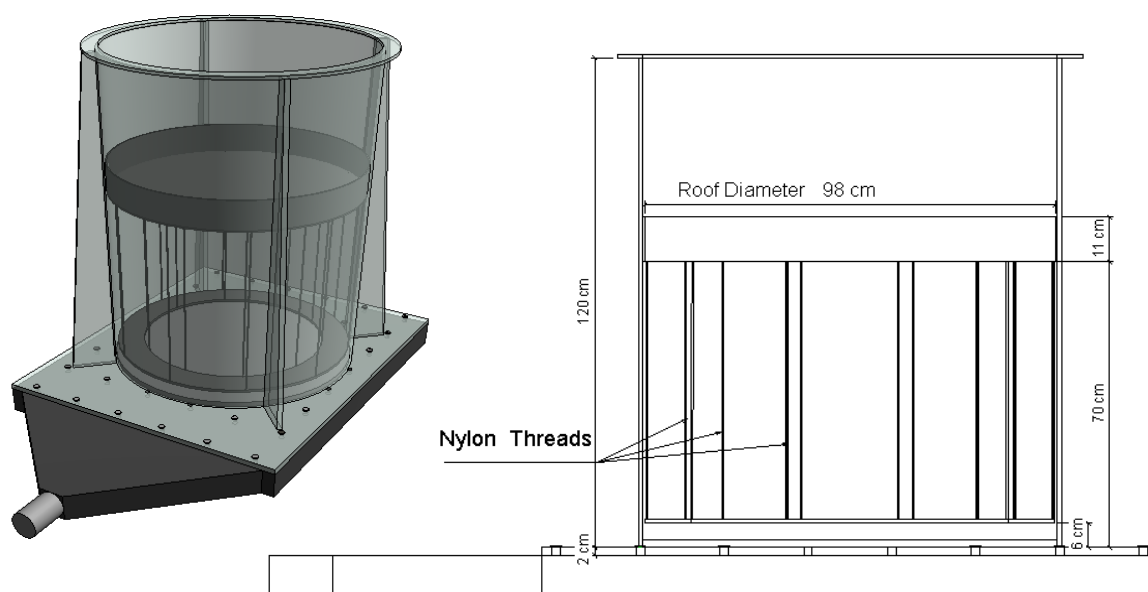


شکل ۲-۸ آویختن بافل حلقوی به عرض ۱۱ سانتیمتر از سقف شناور بیرون از مخزن

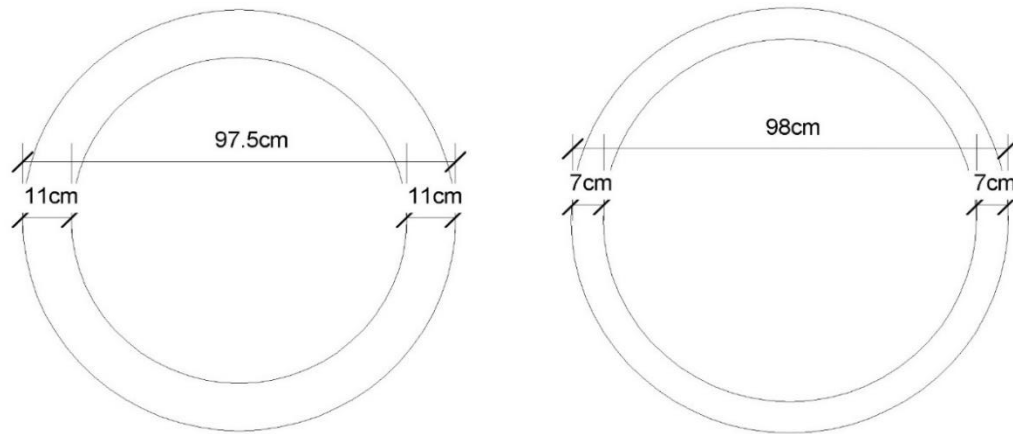




شکل ۱۱-۲ جانمایی شماره دوربین ها نسبت به میز

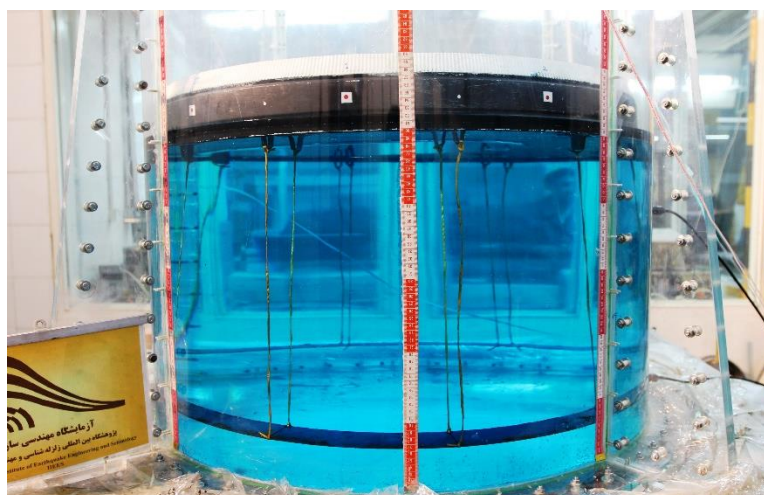


شکل ۱۲-۲ نمای سه بعدی تنظیمات آزمایش و مقطع آن، آویزان شدن بافل مدور آویخته SAB از سقف شناور



شکل ۱۳-۲ اطلاعات هندسی بافل های با عرض ۱۱ و ۷ سانتیمتر

وزن بافل ۷ سانتیمتری، ۳.۰۳ کیلوگرم و وزن بافل ۱۱ سانتیمتری ۳.۳۳ کیلوگرم بود. ضخامت بافل ۷ سانتیمتری ۲ میلی متر و ضخامت بافل ۱۱ سانتی، ۱.۵ میلی متر بود. ارتفاع نخ های نایلونی متصل کننده سقف به بافل به نحوی بودند که در سه حالت آزمایش که سقف شناور در ارتفاعات ۲۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی قرار میگرفت، بافل مدور آویخته در ارتفاع ۶ سانتی از کف قرار گیرند. محل وصل نخ ها زیر سقف شناور به نحوی بودند که محیط سقف به ۱۰ قسمت مساوی تقسیم شده و در هر قطاع دو نخ به صورت موازی دو لبه بافل مدور آویخته شده در سیال را به قلاب های روبرویشان که زیر سقف شناور قرار داشت، وصل می نمودند.



شکل ۱۴-۲ نمای آزمایش از دید دوربین یک در سه ارتفاع مختلف قرار گیری سقف شناور ۲۰، ۵۰ و ۷۰ سانتیمتر. جهت تشخیص بهتر، هر ۱۰ سانتیمتر رنگ متر چسبانده شده روی دیواره تغییر می کند

۲-۴- تحریکات اعمال شده

تحریکات اعمال شده به میز لرزان، شامل دو دسته تحریکات هارمونیک و تحریکات لرزه ای بودند.

۲-۴-۱- تحریکات هارمونیک

در تحریکات هارمونیک ابتدا زمان تناوب مود اول مخزن در ارتفاع های مختلف طبق معادله ۲-۱ بدست آمد [۴۹] سپس با این فرکانس از دامنه ۲ میلی متر جابه جایی تحریک میز آغاز شد و به مدت زمان ۳۰ ثانیه این تحریک ادامه یافت. پس از آن با همان فرکانس، دامنه تحریک به ۴ میلی متر به همان مدت زمان تحریک به میز اعمال شد و این فرایند در صورتیکه شرایط آزمایش اجازه می داد تا ۱۵ میلی متر جابه جایی می توانست ادامه پیدا کند. در آزمایشاتی که سقف در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر قرار داشت، بیش از دامنه ۸ میلی متر، دیگر آزمایش نمی توانست ادامه پیدا کند، زیرا که سیال از مخزن به بیرون می ریخت. این حالت به خصوص در آزمایش هایی که بافل مدور آویخته به سقف شناور متصل نبودند، اتفاق می افتاد، این موضوع خود نشان از کارایی سیستم پیشنهادی داشت.

معادله ۲-۱

$$F_c = \frac{\sqrt{3.68 g \tanh \left[3.68 \left(\frac{H_L}{D} \right) \right]}}{2\pi\sqrt{D}}$$

در رابطه فوق g شتاب ثقل معادل با (32.17 ft/s^2) ، H_L ارتفاع سیال بر حسب فوت و D قطر مخزن بر حسب فوت می باشد. مطالعات Sakai و همکاران طبق مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی [۴۴] نشان می دهد که حضور سقف شناور زمان تناوب مدل اول را تغییر چندانی نمی دهد.

بر اساس معادله ۲-۱، در جدول ۲-۱ فرکانس مخزن مورد آزمایش در ارتفاع های تعریف شده آزمایش، ارائه شده است.

جدول ۲-۱ فرکانس مد اول مخزن حاوی سایل در ارتفاعات مورد نظر آزمایش

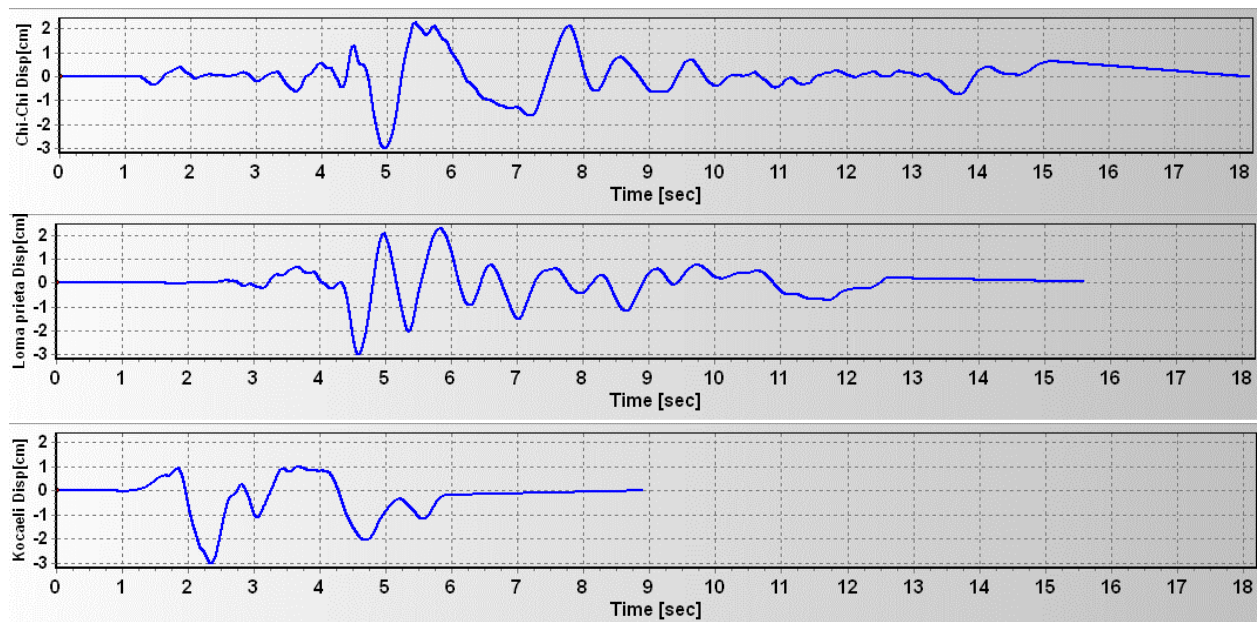
H_L (cm)	ω_c (rad/sec)	$F_c = \omega_c / (2\pi)$ (Hz)	$T_c = 1 / F_c$ (Sec)
20	4.8	0.76	۱/۳۲
50	5.9	0.93	۱,۰۷
70	6.0	0.95	۱,۰۵

در آزمایشات پی در پی هامورنیک که با فرکانس یکسان، دامنه تحریک افزایش می یافت، ابتدا سقف را به حالت سکون در آورده و بعد تحریک با دامنه بیشتر اعمال می شد به نحوی که سقف با شرایط اولیه صفر، شروع به ارتعاش نماید. در حالتی که بافل به سقف شناور آویخته بود، احتیاجی به ساکن کردن سقف و توقف کامل میز قبل از آغاز تحریک مجدد با دامنه بیشتر نبود، زیرا با انتهای تحریک، با توجه به حضور بافل، سقف در زمان کوتاهی ساکن می شد و شرایط برای اعمال دامنه

بیشتر به مخزن، به سرعت محیا می شد و لازم نبود با یک نیروی خارجی (مثلاً با استفاده از دست) شرایط سکون حین آزمایش برای اعمال تحریک بعدی با دامنه بیشتر، محیا شود. اما در حالتی که به سقف شناور بافل متصل نبود، باید ابتدا میز کامل متوقف می شد و سقف به حالت سکون می رسید و پس از آن مجدد تحریک با دامنه بیشتر به میز لرزان اعمال می شد.

۲-۴-۲- تحریکات لرزه ای

تحریکات لرزه ای به نحوی انتخاب شدند که فرکانس غالب آنها نزدیک به فرکانس های ارائه شده در جدول ۱-۲ باشد. حداکثر دامنه حرکت مثبت و منفی میز لرزان آزمایشگاه، سه سانتیمتر می باشد، بنابراین گام زمانی این زلزله ها تقسیم بر جذر نسب جابه جایی واقعی میز به حداکثر دامنه حرکت میز لرزان شده است و حداکثر جابه جایی زلزله نیز با حداکثر بازه جابه جایی میز یکسان شده است. اطلاعات زلزله های اعمال شده به میز لرزان در شکل ۱۵-۲ و شکل ۱۶-۲ نشان داده شده است. نام زلزله های انتخابی چی چی ۱، لوما پریتا ۲ و کوچایلی ۳ می باشد.

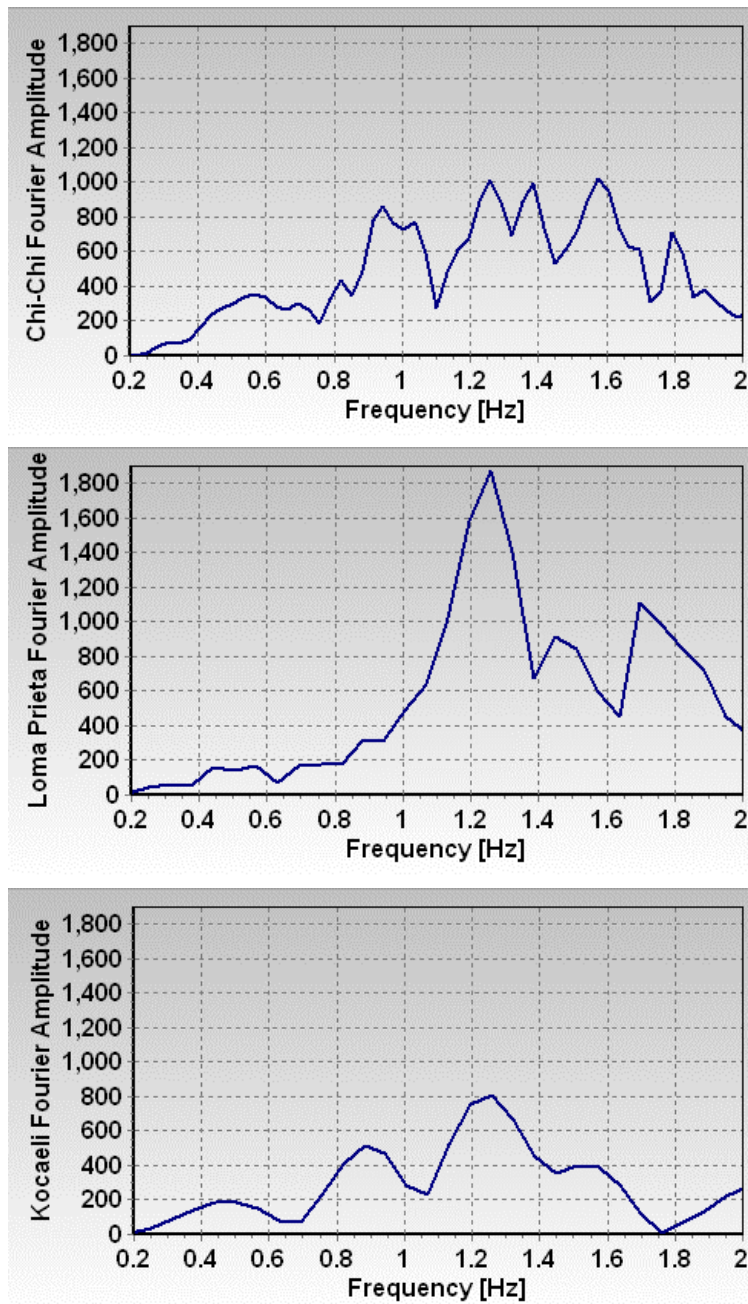


شکل ۱۵-۲ تاریخچه جابه جایی-زمان، تحریکات لرزه ای اعمال شده به میز لرزان

¹ Chi-Chi

² Loma Prieta

³ Kocaeli



شکل ۱۶-۲ طیف فوری زلزله های اعمال شده به میز لرزان در آزمایشگاه

طبق میانگین نتایج برداشت شده از شتاب بدست آمده از میز لرزان که آن ها به عنوان ورودی حل مسائل تحلیلی نیز استفاده شده است، حداکثر شتاب زلزله چی چی ۱.۵ متربرمجدور ثانیه، حداکثر شتاب زلزله لوماپریتا ۱.۷ متر بر مجدور ثانیه و حداکثر شتاب زلزله کوجاییلی ۱.۱ متربر مجدور ثانیه می باشد.

۵-۲- نامگذاری آزمایش‌ها

در جدول ۲-۲، جدول ۳-۲ و جدول ۴-۲، نام مدل‌های آزمایشگاهی و در کنار آن نام مدل تحلیلی مربوط به آن آزمایش (که در فصل چهارم نتایج آنها ارائه شده اند) ارائه شده اند.

جدول ۲-۲ نامگذاری مدل‌های آزمایشگاهی و تحلیلی نظیر یکدیگر، ارتفاع سیال ۷۰ سانتیمتر

H (cm)	Excitation	Model name	
		Experimental	Analytical
70	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm (NB)	317-10	h70WOBHf095
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm (NB)	317-10	h70WOBHf095
	Kocaeli (NB)	317-09	h70WOBKoca
	Loma Prieta (NB)	317-08	h70WOBLoma
	Chi-Chi (NB)	317-07	h70WOBChichi
	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm (WB7)	318-19	h70WB07Hf095
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm (WB7)	318-19	h70WB07Hf095
	Kocaeli (WB7)	317-18	h70WB07Koca
	Loma Prieta (WB7)	317-17	h70WB07Loma
	Chi-Chi (WB7)	317-16	h70WB07Chichi
	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm (WB11)	317-05	h70WB11Hf095
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm (WB11)	317-05	h70WB11Hf095
	Kocaeli (WB11)	317-04	h70WB11Koca
	Loma Prieta (WB11)	317-03	h70WB11Loma
	Chi-Chi (WB11)	317-02	h70WB11Chichi

جدول ۳-۲ نامگذاری مدل‌های آزمایشگاهی و تحلیلی نظیر یکدیگر، ارتفاع سیال ۵۰ سانتیمتر

H (cm)	Excitation	Model name	
		Experimental	Analytical
50	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm (NB)	312-10	h50WOBHf093
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm (NB)	312-10	h50WOBHf093
	Kocaeli (NB)	312-9	h50WOBKoca
	Loma Prieta (NB)	312-8	h50WOBLoma
	Chi-Chi (NB)	312-7	h50WOBChichi
	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm (WB7)	0312-05	h50WB07Hf093
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm (WB7)	0312-05	h50WB07Hf093
	Kocaeli (WB7)	0312-04	h50WB07Koca
	Loma Prieta (WB7)	0312-03	h50WB07Loma
	Chi-Chi (WB7)	0312-02	h50WB07Chichi
	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm (WB11)	0312-19	h50WB11Hf093
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm (WB11)	0312-19	h50WB11Hf093
	Kocaeli (WB11)	0312-18	h50WB11Koca
	Loma Prieta (WB11)	0312-17	h50WB11Loma
	Chi-Chi (WB11)	0312-16	h50WB11Chichi

جدول ۴-۲ نامگذاری مدل های آزمایشگاهی و تحلیلی نظیر یکدیگر، ارتفاع سیال ۲۰ سانتیمتر

H (cm)	Excitation	Model name	
		Experimental	Analytical
20	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm (NB)	318-24	h20WOBHf076
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm (NB)	318-24	h20WOBHf076
	Kocaeli (NB)	318-231	h20WOBKoca
	Loma Prieta (NB)	318-221	h20WOBLoma
	Chi-Chi (NB)	318-211	h20WOBChichi
	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm (WB7)	318-32	h20WB07Hf076
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm (WB7)	318-32	h20WB07Hf076
	Kocaeli (WB7)	318-31	h20WB07Koca
	Loma Prieta (WB7)	318-30	h20WB07Loma
	Chi-Chi (WB7)	318-29	h20WB07Chichi
	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm (WB11)	318-192	h20WB11Hf076
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm (WB11)	318-192	h20WB11Hf076
	Kocaeli (WB11)	318-18	h20WB11Koca
	Loma Prieta (WB11)	318-17	h20WB11Loma
	Chi-Chi (WB11)	318-16	h20WB11Chichi

در پیوست الف، منتخبی از نتایج تصویری آزمایش ها شامل موارد ذیل ارائه شده است:

- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، بدون بافل، تحت تحریک زلزله چی چی
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۷ سانتیمتر، تحت تحریک زلزله چی چی
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر، تحت تحریک زلزله چی چی
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، بدون بافل، تحت تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۳ هرتز
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۷ سانتیمتر، تحت تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۳ هرتز
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر، تحت تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۳ هرتز
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، بدون بافل، تحت تحریک زلزله، تحت تحریک زلزله کوجایی^۱
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۷ سانتیمتر، تحت تحریک زلزله کوجایی
- آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، با جابه جایی اولیه ۲۵ سانتیمتر جهت برداشت زمان تناوب

¹ Kocaeli

فصل ۳ – معادلات تحلیلی حرکت سقف و بافل

۳-۱- علائم اختصاری

- φ : تابع پتانسیل سرعت
 r : شعاع مخزن
 $\dot{x}_g$: سرعت تحریک زمین
 θ : زاویه دوران از محور اصلی عمود بر سقف شناور
 Z : ارتفاع سیال
 η : جابجایی قائم لبه سقف شناور در حالت که زاویه دوران θ صفر می باشد
 ξ_n : جابجایی مودی
 J_1 : تابع بسل مرتبه یک
 ε_i : ریشه i ام معادله بسل
 Ω_i : فرکانس مود تلاطم سیال
 g : شتاب ثقل زمین
 W_{nc} : کار نیروهای ناپایستار
 $T(t)$: انرژی جنبشی در معادله لاگرانژ
 $V(t)$: انرژی پتانسیل در معادله لاگرانژ
 q_i : مختصه تعمیم یافته
 Q_i : نیروی تعمیم یافته
 L_{Roof} : لاگرانژ سقف شناور
 L_{SAB} : لاگرانژ بافل مدور آویخته
 ρ : چگالی سیال
 M_R : جرم واحد سطح سقف شناور
 R_{roof} : شعاع سقف شناور
 K_{NB}^* : سختی معادل در معادله ارتعاش سقف شناور بدون بافل مدور آویخته
 M_{NB}^* : جرم معادل در معادله ارتعاش سقف شناور بدون بافل مدور آویخته
 ω_{nNB} : فرکانس ارتعاش سقف شناور بدون بافل مدور آویخته

C_{NB}^* : میرایی ویسکوز معادل در معادله ارتعاش سقف شناور بدون بافل مدور آویخته

M_{SAB} : جرم خطی بافل مدور آویخته

F_d : نیروی درگ وارد بر بافل مدور آویخته

W_{SAB} : عرض بافل مدور آویخته

$V_{H-SAB}(t)$: مابه التفاوت سرعت قائم حرکت سقف شناور و سرعت قائم سیال در محل بافل مدور آویخته

C_{Drag} : ضریب نیروی درگ در حرکت به سمت بالای بافل مدور آویخته

C_{Drop} : ضریب نیروی درگ در سقوط آزاد بالای بافل مدور آویخته در سیال

J_1 تابع بسل مرتبه یک

ε_i ریشه i ام، مشتق تابع بسل مرتبه یک $J_1(\varepsilon_i) = 0$

۲-۳- مقدمه

در این فصل روند تشکیل معادلات تحلیلی حاکم بر حرکت سیال و سقف شناور هنگام تلاطم، با استفاده از معادلات لاگرانژ، ارائه شده اند.

۳-۳- مدل مکانیکی معادل

به صورت کلی، فشار هیدرودینامیکی سیال در مخازن صلب، دو مولفه شاخص دارد، قسمت اول به صورت مستقیم با شتاب مخزن متناسب است و بواسطه قسمتی از سیال که همراه با مخزن جابه جا می شود، ایجاد می شود که به فشار ضربه ای^۱ موسوم است، قسمت دوم که به فشار متلاطم یا کانوکتیو^۲ موسوم است، سبب تلاطم در سطح آزاد سیال می باشد. دینامیک سیال داخل یک مخزن بسته، می تواند با یک مدل مکانیکی معادل تقریب زده شود. معادلات باید به نحوی باشند که نیروها و لنگرهای وارد شده بر دیواره مخزن را هنگام تحریک در آزمایشات به درستی برآورد کنند [۴۰] (فصل پنجم).

مفاهیم ساخت یک مدل دینامیکی معادل باید بر اساس شرایط زیر استوار باشد:

۱- اینرسی انتقالی و دورانی معادل جرم سیال باید به درستی برآورد شوند.

۲- مرکز ثقل در نوسانات کوچک باید ثابت باقی بماند.

۳- مدل دینامیکی باید مدهای ارتعاشی و نیروهای دمپینگ^۳ یکسان با واقعیت پدیده نشان دهد.

۴- نیروها و لنگرهای در یک تحریک مشخص باید با مقادیر واقعی معادل باشند.

یک مدل مکانیکی معادل باید رفتار دینامیکی سطح آزاد سیال را به خوبی نشان دهد (به خصوص هنگامی که مدل تحت اثر فرکانس هایی قرار دارد که با فرکانس تشدید فاصله دارند). در تحریکات نزدیک به تشدید، روابط مدل های خطی دیگر معتبر نیستند و باید رفتارهای غیر خطی مورد مطالعه قرار گیرند. با حضور سقف شناور صلب در مدل آزمایشگاهی این رساله، می توان جابه جایی های سقف را بر مبنای روابط خطی بدست آورد.

۳-۴- تابع پتانسیل سرعت

یکی از رویکردهای مطالعه حرکت سیال تابع پتانسیل سرعت می باشد. این تابع، یک تابع ۴ متغیره شامل یک بعد زمان و سه بعد مکانی می باشد. از مشتق این تابع نسبت به هر یک از جهت های دستگاه مختصات سرعت در آن راستا به دست می آید. مسئله مقدار مرزی تابع پتانسیل سرعت، که بر پاسخ تلاطم سقف شناور در مخازن استوانه ای حاکم می باشد، در ادامه ارائه شده است [۴۲]:

¹ Impulsive

² Convective

³ Damping

معادله لاپلاس در محیط سیال:

معادله ۳-۱

$$\nabla^2 \varphi = 0$$

در دیواره مخزن به شعاع $r=R$:

معادله ۳-۲

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \dot{x}_g(t) \cos \theta$$

در کف مخزن $z=0$:

معادله ۳-۳

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$$

در سطح سیال $z=H$:

معادله ۳-۴

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \dot{\eta}(t)$$

$\eta(t)$ تاریخچه جابه جایی قائم لبه سقف شناور (در زاویه دوران صفر)، $\dot{x}_g(t)$ سرعت تحریک زمین و g شتاب ثقل

زمین می باشد.

جابه جایی قائم سقف شناور را می توان به صورت یک ترکیب خطی با استفاده از اصل جمع آثار قوا فرض کرد و آن را

بر اساس ترکیب اثر مودها بصورت معادله ۳-۵ نوشت:

معادله ۳-۵

$$\eta(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \xi_n(t) Z_n(r) \cos \theta$$

در این حالت جابه جایی سقف شامل حرکت صلب سقف به ازای $n=0$ و جابه جایی الاستیک سقف به ازای مقادیر $n=1, 2, 3, \dots, \infty$ می باشد.

در این تحقیق تنها حرکت صلب سقف $\xi_0(t) Z_0 \cos \theta$ مورد مطالعه قرار می گیرد که در آن مولفه

$\xi_0(t)$ مربوط به جابه جایی مودی، Z_0 مربوط به مختصات شعاعی و $\cos \theta$ مربوط به مختصات زاویه دوران از محور اصلی

مورد مطالعه است، که در آن:

معادله ۳-۶

$$Z_0 = \frac{r}{R}$$

با حل مسئله مقدار مرزی مربوط به معادلات تلاطم در مخازن استوانه ای سقف شناور ارائه شده [۴۲]، تابع پتانسیل سرعت به صورت زیر بدست می آید:

معادله ۳-۷

$$\varphi_{(r, z, \theta)} = \left\{ \dot{x}_g(t)r + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{g}{\Omega_i^2} \frac{\cosh\left[\varepsilon_i \left(\frac{z}{R}\right)\right] J_1\left[\varepsilon_i \left(\frac{r}{R}\right)\right]}{\cosh\left[\varepsilon_i \left(\frac{H}{R}\right)\right] J_1(\varepsilon_i)} \sum_{n=0}^{\infty} a_{in} \xi_n(t) \right\} \cos \theta$$

که در آن J_1 تابع بسل مرتبه یک و ε_i ریشه i ام، معادله $J_1(\varepsilon_i) = 0$ می باشند. با توجه به آنکه در مطالعات مذکور حرکت سقف به صورت صلب در نظر گرفته می شود و از آنجا که $a_{in} = 1$ می باشد، [۴۲]، خواهیم داشت:

معادله ۳-۸

$$\varphi_{(t, r, z, \theta)} = \dot{x}_g(t)r \cos \theta + \varphi_0$$

که در آن:

معادله ۳-۹

$$\varphi_0 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{g}{\Omega_i^2} \frac{\cosh\left[\varepsilon_i \left(\frac{z}{R}\right)\right] J_1\left[\varepsilon_i \left(\frac{r}{R}\right)\right]}{\cosh\left[\varepsilon_i \left(\frac{H}{R}\right)\right] J_1(\varepsilon_i)} \xi_0(t) \cos \theta$$

معادله ۳-۱۰

$$\Omega_i = \sqrt{\frac{g}{R} \varepsilon_i \tanh\left(\varepsilon_i \frac{H}{R}\right)}$$

با جایگذاری معادله ۳-۱۰ در معادله ۳-۸، تابع پتانسیل سرعت به ازای $z = H$ به قرار زیر خواهد بود:

معادله ۳-۱۱

$$\varphi_{(r, \theta, z=H)} = \left\{ \dot{x}_g(t)r + \xi_0(t) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2R J_1\left[\varepsilon_i \left(\frac{r}{R}\right)\right]}{\varepsilon_i (\varepsilon_i^2 - 1) \tanh\left[\varepsilon_i \left(\frac{H}{R}\right)\right] J_1(\varepsilon_i)} \right\} \cos \theta$$

در حل معادلات در این تحقیق، از ۵ ریشه اول معادله $\dot{f}_1(\varepsilon_i) = 0$ استفاده شده است. به عبارت دیگر پنج ریشه اول حاصل از برابر با صفر قراردادن مشتق معادله مرتبه اول بسط با مقادیر عددی زیر در حل معادلات استفاده شده اند. این پنج ریشه عبارتند از:

معادله ۳-۱۲

$$\varepsilon_1 = 1.84 \quad \varepsilon_2 = 5.33 \quad \varepsilon_3 = 8.54 \quad \varepsilon_4 = 11.71 \quad \varepsilon_5 = 14.86$$

۳-۵- اصل همیلتون

در مرجع [۵۰] اصل همیلتون به صورت زیر ارائه شده است:

معادله ۳-۱۳

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta[T(t) - V(t)] dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc}(t) dt = 0$$

در این رساله جهت سادگی ارائه معادلات، عبارت $T(t) - V(t)$ لاگرانژ نامیده شده و با عبارت $L(t)$ نشان داده می شود. بنابراین می توان رابطه فوق را چنین نوشت:

معادله ۳-۱۴

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta L(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc}(t) dt = 0$$

جهت تشکیل معادلات دینامیکی حرکت یک سیستم با تفکر لاگرانژ یا همیلتون، انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل و کار نیروهای ناپایستار را بر حسب جابه جایی و سرعت درجات آزادی در ساختار معادلات فوق قرار می دهند.

معادله ۳-۱۵

$$T = T(q_1, q_2, \dots, q_N, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_N)$$

معادله ۳-۱۶

$$V = V(q_1, q_2, \dots, q_N)$$

معادله ۳-۱۷

$$\delta W_{nc} = Q_1 \delta q_1 + Q_2 \delta q_2 + \dots + Q_N \delta q_N$$

با جایگذاری معادلات معادله ۳-۱۵ الی معادله ۳-۱۷ در معادله ۳-۱۳ معادله زیر بدست می آید:

معادله ۳-۱۸

$$\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial T}{\partial q_1} \delta q_1 + \frac{\partial T}{\partial q_2} \delta q_2 + \dots + \frac{\partial T}{\partial q_N} \delta q_N + \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \delta \dot{q}_1 + \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} \delta \dot{q}_2 + \dots + \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_N} \delta \dot{q}_N - \frac{\partial V}{\partial q_1} \delta q_1 - \frac{\partial V}{\partial q_2} \delta q_2 \dots - \frac{\partial V}{\partial q_N} \delta q_N + Q_1 \delta q_1 + Q_2 \delta q_2 + \dots + Q_N \delta q_N \right) dt = 0$$

با استفاده از تکنیک انتگرال جزء به جزء ترم های وابسته به سرعت به صورت زیر ساده سازی می شوند:

معادله ۳-۱۹

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \delta \dot{q}_i dt = \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \delta q_i \right]_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) \delta q_i dt$$

ترم اول عبارت سمت راست معادله فوق صفر می باشد، زیرا برای هر دستگاه مختصاتی معادله زیر برقرار است:

معادله ۳-۲۰

$$\delta q_i(t_1) = \delta q_i(t_2) = 0$$

با جایگذاری معادله ۳-۲۰ در معادله ۳-۱۹ معادله زیر بدست می آید:

معادله ۳-۲۱

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \delta \dot{q}_i dt = - \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) \delta q_i dt$$

[۵۰]

۳-۶- استفاده از اصل همیلتون جهت تشکیل معادله حرکت سقف شناور با حضور بافل

برای تشکیل معادله حرکت کل سیستم با استفاده از اصل همیلتون، می توان حرکت سیستم در حالت حرکت سقف شناور با حضور بافل را به سه قسمت اصلی معادلات حرکت سقف، سیال و بافل مدور آویخته، تقسیم نمود و در نهایت آنها را در ساختار معادله ۳-۱۴ قرار داد.

معادله ۳-۲۲

$$L_{Total} = L_{liquid} + L_{Roof} + L_{SAB}$$

معادله ۳-۲۳

$$W_{nc}(t)_{Total} = W_{nc}(t)_{liquid} + W_{nc}(t)_{Roof} + W_{nc}(t)_{SAB}$$

معادله ۳-۲۴

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta L_{Total} dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc}(t)_{Total} dt = 0$$

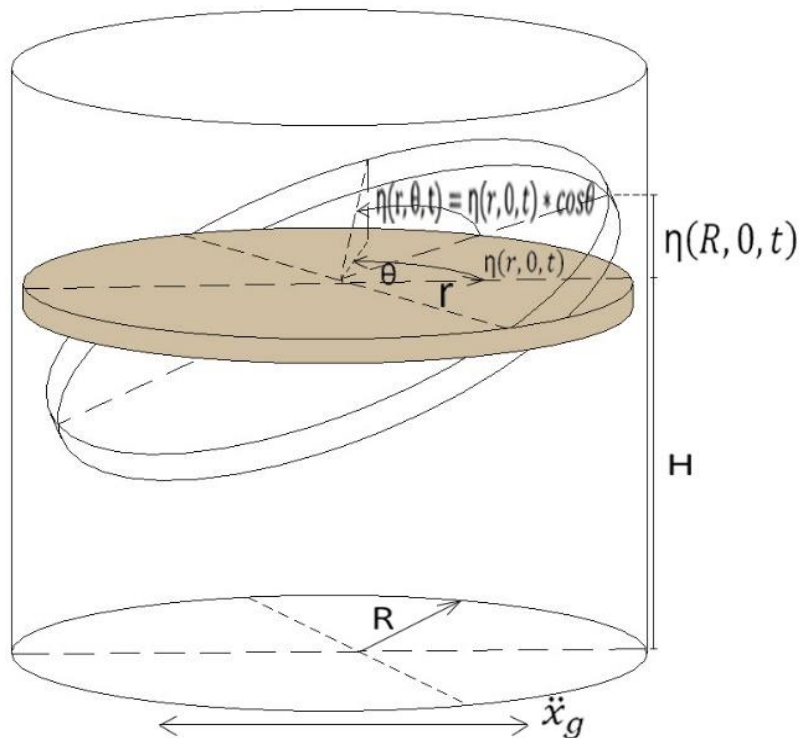
۳-۷- لاگرانژ بخش سیال

معادله لاگرانژ ناشی از حرکت سیال بر اساس مرجع [۴۵] به قرار زیر می باشد:

معادله ۳-۲۵

$$L_{liquid} = \left(\int_{r=0}^R \int_{\theta=0}^{2\pi} \rho \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial z} \right) \varphi_0 + \frac{\partial \eta}{\partial t} \varphi - \frac{1}{2} g \eta^2 \right] r dr d\theta \right)_{z=H}$$

پارامترهای مربوط به هندسه مخزن که در معادله فوق و معادلات بعدی بکار رفته در شکل ۱-۳ نشان داده شده اند.



شکل ۳-۱ معرفی پارامترهای معادلات مخزن استوانه ای همراه با سقف شناور [۴۵]

جهت ساده سازی ادامه محاسبات، معادله ۳-۲۵ فوق را می توان به جمع سه ترم جبری تبدیل نمود.

معادله ۳-۲۶

$$L_{liquid} = L_{liquid}(1) + L_{liquid}(2) + L_{liquid}(3)$$

که در آن:

معادله ۳-۲۷

$$L_{liquid}(1) = \left(\int_{r=0}^R \int_{\theta=0}^{2\pi} \rho \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial z} \right) \varphi_0 \right] r dr d\theta \right)_{z=H}$$

معادله ۳-۲۸

$$L_{liquid}(2) = \left(\int_{r=0}^R \int_{\theta=0}^{2\pi} \rho \left[\frac{\partial \eta}{\partial t} \varphi \right] r dr d\theta \right)_{z=H}$$

معادله ۳-۲۹

$$L_{liquid}(3) = \left(\int_{r=0}^R \int_{\theta=0}^{2\pi} \rho \left[-\frac{1}{2} g \eta^2 \right] r dr d\theta \right)_{z=H}$$

حال با جایگذاری معادلات معرفی شده در سه معادله فوق معادلات زیر بدست می آیند:

معادله ۳-۳۰

$$L_{liquid}(1) = -2\rho R \dot{\xi}_0^2(t) \int_{r=0}^R \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_1\left(\frac{\varepsilon_k r}{R}\right)}{(\varepsilon_k^2 - 1)J_1(\varepsilon_k)} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{J_1\left(\frac{\varepsilon_l r}{R}\right)}{\varepsilon_l(\varepsilon_l^2 - 1)\tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right)J_1(\varepsilon_l)} r dr \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta$$

معادله ۳-۳۱

$$L_{liquid}(2) = \rho \dot{\xi}_0(t) \int_{r=0}^R \left(\frac{\dot{x}_g(t)r^3}{R} + \dot{\xi}_0(t) \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2r^2 J_1\left(\frac{\varepsilon_l r}{R}\right)}{\varepsilon_l(\varepsilon_l^2 - 1)\tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right)J_1(\varepsilon_l)} \right) dr \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta$$

معادله ۳-۳۲

$$L_{liquid}(3) = -\frac{1}{2}\rho \dot{\xi}_0^2(t)g \frac{1}{R^2} \int_{r=0}^R r^3 dr \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta$$

بنابر مطالب ارائه شده در بخش اصل همیلتون، حال باید به محاسبه δL_{liquid} پرداخته شود:

معادله ۳-۳۳

$$\delta L_{liquid}(1) = -4\rho R \dot{\xi}_0(t) \int_{r=0}^R \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_1\left(\frac{\varepsilon_k r}{R}\right)}{(\varepsilon_k^2 - 1)J_1(\varepsilon_k)} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{J_1\left(\frac{\varepsilon_l r}{R}\right)}{\varepsilon_l(\varepsilon_l^2 - 1)\tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right)J_1(\varepsilon_l)} r dr \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \dot{\xi}_0$$

معادله ۳-۳۴

$$\begin{aligned} \delta L_{liquid}(2) = & \rho \frac{\dot{x}_g(t)R^3}{4} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \dot{\xi}_0 \\ & + 4\rho \dot{\xi}_0(t) \int_{r=0}^R \sum_{l=1}^{\infty} \frac{r^2 J_1\left(\frac{\varepsilon_l r}{R}\right)}{\varepsilon_l(\varepsilon_l^2 - 1)\tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right)J_1(\varepsilon_l)} dr \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \dot{\xi}_0 \end{aligned}$$

معادله ۳-۳۵

$$\delta L_{liquid}(3) = -\rho \dot{\xi}_0(t)g \frac{R^2}{4} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \dot{\xi}_0$$

حال با توجه به معادله ۳-۲۴ به محاسبه ترم $\int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid} dt$ پرداخته می شود.

معادله ۳-۳۶

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid} dt = \int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid}(1) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid}(2) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid}(3) dt$$

در ریاضیات مهندسی و مبحث توابع بسل مرتبه یک J_1 اثبات می شود که [۴۲]:

معادله ۳-۳۷

$$\int_0^1 u J_1(\varepsilon_i u) J_1(\varepsilon_j u) du = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_i^2}\right) [J_1(\varepsilon_i)]^2 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

معادله ۳-۳۸

$$\int_0^1 u^2 J_1(\varepsilon_i u) du = \frac{1}{\varepsilon_i^2} J_1(\varepsilon_i)$$

جهت ساده سازی عبارات $\int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid}(1) dt$ و $\int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid}(2) dt$ با تغییر متغیر $u = \frac{r}{R}$ می توان از مزایای

معادله ۳-۳۷ و معادله ۳-۳۸ جهت ساده سازی روابط استفاده نمود.

معادله ۳-۳۹

$$\begin{aligned} \delta L_{liquid}(1) &= -4\rho R^3 \dot{\xi}_0(t) \int_{u=0}^1 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_1(\varepsilon_k u)}{(\varepsilon_k^2 - 1) J_1(\varepsilon_k)} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{J_1(\varepsilon_l u)}{\varepsilon_l (\varepsilon_l^2 - 1) \tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right) J_1(\varepsilon_l)} u du \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \dot{\xi}_0 \\ &= -2\rho R^3 \dot{\xi}_0(t) \sum_{i=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_i^2}\right) \frac{1}{\varepsilon_i (\varepsilon_i^2 - 1)^2} \frac{1}{\tanh\left(\frac{\varepsilon_i H}{R}\right)} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \dot{\xi}_0 \end{aligned}$$

معادله ۳-۴۰

$$\begin{aligned} \delta L_{liquid}(2) &= \rho \frac{\dot{x}_g(t) R^3}{4} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \dot{\xi}_0 \\ &\quad + 4\rho R^3 \dot{\xi}_0(t) \int_{u=0}^1 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{u^2 J_1(\varepsilon_l u)}{\varepsilon_l (\varepsilon_l^2 - 1) \tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right) J_1(\varepsilon_l)} du \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \dot{\xi}_0 \\ &= \rho \frac{\dot{x}_g(t) R^3}{4} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \dot{\xi}_0 \\ &\quad + 4\rho R^3 \dot{\xi}_0(t) \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{\varepsilon_l^3 (\varepsilon_l^2 - 1) \tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right)} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \dot{\xi}_0 \end{aligned}$$

از سوی دیگر در عبارات $\int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid}(1) dt$ و $\int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid}(2) dt$ که در آن‌ها ترم سرعت درجه آزادی، وجود دارد، می‌توان از تکنیک انتگرال جزء به جزء استفاده شده در معادله ۳-۲۱ جهت ساده سازی استفاده نمود، بنابراین معادله زیر بدست می‌آید:

معادله ۳-۴۱

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid}(1) dt \\ = 2\rho R^3 \ddot{\xi}_0(t) \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_i^2}\right) \frac{1}{\varepsilon_i(\varepsilon_i^2 - 1)^2} \frac{1}{\tanh\left(\frac{\varepsilon_i H}{R}\right)} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \xi_0 dt \end{aligned}$$

معادله ۳-۴۲

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid}(2) dt \\ = -\rho \frac{\ddot{x}_g(t) R^3}{4} \int_{t_1}^{t_2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \xi_0 dt \\ - 4\rho R^3 \ddot{\xi}_0(t) \int_{t_1}^{t_2} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{\varepsilon_l^3(\varepsilon_l^2 - 1) \tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right)} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \xi_0 dt \end{aligned}$$

هنگام حل معادلات فوق در برنامه متلب MATLAB، از پنج ریشه اول حاصل از برابر با صفر قراردادن مشتق معادله مرتبه اول بسل، استفاده شده‌اند. با توجه به معادله ۳-۳۵، معادله ۳-۳۶، معادله ۳-۴۱ و معادله ۳-۴۲ معادله زیر برای لاگرانژ بخش سیال بدست می‌آید:

معادله ۳-۴۳

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid} dt = 2\rho R^3 \ddot{\xi}_0(t) \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_i^2}\right) \frac{1}{\varepsilon_i(\varepsilon_i^2 - 1)^2} \frac{1}{\tanh\left(\frac{\varepsilon_i H}{R}\right)} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \xi_0 dt \\ - \rho \frac{R^3}{4} \ddot{x}_g(t) \int_{t_1}^{t_2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \xi_0 dt \\ - 4\rho R^3 \ddot{\xi}_0(t) \int_{t_1}^{t_2} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{\varepsilon_l^3(\varepsilon_l^2 - 1) \tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right)} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \xi_0 dt \\ - \rho g \frac{R^2}{4} \xi_0(t) \int_{t_1}^{t_2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \xi_0 dt \end{aligned}$$

۳-۸- لاگرانژ بخش سقف شناور

در معادلات لاگرانژ حرکت سقف شناور فرض بر آن است که میزان انرژی پتانسیل سقف صلب در اثر تلاطم سیال، با توجه به اینکه نیمی از آن به سمت بالا و همزمان نیم دیگر به سمت پایین حرکت می‌نماید تغییر نمی‌کند. بنابراین ترم پتانسیل در معادلات این قسمت ظاهر نشده است. با توجه به معادله ۳-۵ و معادله ۳-۶ و با توجه به آنکه در معادلات تنها مود حرکت صلب سقف در نظر گرفته شده است معادلات زیر بدست می‌آیند:

معادله ۳-۴۴

$$\begin{aligned} L_{Roof} &= (T - V)_{Roof} = T_{Roof} = \int_{r=0}^{R_{Roof}} \int_{\theta=0}^{2\pi} \frac{1}{2} M_R \dot{\xi}_0(t)^2 \left(\frac{r}{R_{Roof}} \right)^2 \cos^2 \theta dA \\ &= \int_{r=0}^{R_{Roof}} \int_{\theta=0}^{2\pi} \frac{1}{2} M_R \dot{\xi}_0(t)^2 \left(\frac{r}{R_{Roof}} \right)^2 \cos^2 \theta r dr d\theta \end{aligned}$$

معادله ۳-۴۵

$$\delta L_{Roof} = M_R \dot{\xi}_0 \int_{r=0}^{R_{Roof}} \int_{\theta=0}^{2\pi} \left(\frac{r}{R_{Roof}} \right)^2 \cos^2 \theta r dr d\theta \delta \xi_0$$

معادله ۳-۴۶

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \delta L_{Roof} dt &= \int_{t_1}^{t_2} M_{Roof} \dot{\xi}_0 \int_{r=0}^{R_{Roof}} \int_{\theta=0}^{2\pi} \left(\frac{r}{R_{Roof}} \right)^2 \cos^2 \theta r dr d\theta \delta \xi_0 dt \\ &= -M_R \frac{R_{Roof}^2}{4} \dot{\xi}_0(t) \int_{t_1}^{t_2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \xi_0 dt \end{aligned}$$

در معادلات فوق M_R جرم واحد سطح سقف است، یعنی $M_R = \frac{M_{Roof}}{\pi R_{Roof}^2}$. در این معادلات، از همان تکنیک انتگرال جز به جز ارائه شده در بخش قبل استفاده شده است.

۳-۹- معادله حرکت سقف بدون بافل مدور آویخته

۳-۹-۱- بدون در نظر گرفتن میرایی ناشی از سقف و سیال

جهت تشکیل معادله دیفرانسیل این قسمت با توجه به آنکه ابتدا هیچ میرایی بواسطه حرکت سقف و سیال برای سیستم در نظر نگرفته شده است، با توجه به معادله ۳-۲۴، معادله ۳-۴۳ و معادله ۳-۴۶، معادله ۳-۴۷ در ادامه بدست می‌آید:

معادله ۳-۴۷

$$\begin{aligned}
& \int_{t_1}^{t_2} \delta L_{liquid} dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta L_{Roof} dt \\
&= \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \int_{t_1}^{t_2} \left[2\rho R^3 \ddot{\xi}_0(t) \sum_{i=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_i^2}\right) \frac{1}{\varepsilon_i(\varepsilon_i^2 - 1)^2} \frac{1}{\tanh\left(\frac{\varepsilon_i H}{R}\right)} \right. \\
&\quad - \rho \frac{R^3}{4} \ddot{x}_g(t) - 4\rho R^3 \ddot{\xi}_0(t) \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{\varepsilon_l^3(\varepsilon_l^2 - 1) \tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right)} - \rho g \frac{R^2}{4} \xi_0(t) \\
&\quad \left. - M_R \frac{R_{roof}^2}{4} \ddot{\xi}_0(t) \right] \delta \xi_0 dt = 0
\end{aligned}$$

در صورت ساده سازی معادله فوق نتیجه خواهد شد:

معادله ۳-۴۸

$$\begin{aligned}
& \left(M_R \frac{R_{roof}^2}{4} + 4\rho R^3 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{\varepsilon_l^3(\varepsilon_l^2 - 1) \tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right)} \right. \\
&\quad \left. - 2\rho R^3 \sum_{i=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_i^2}\right) \frac{1}{\varepsilon_i(\varepsilon_i^2 - 1)^2} \frac{1}{\tanh\left(\frac{\varepsilon_i H}{R}\right)} \right) \ddot{\xi}_0(t) + \rho g \frac{R^2}{4} \xi_0(t) \\
&= -\rho \frac{R^3}{4} \ddot{x}_g(t)
\end{aligned}$$

معادله ۳-۴۸ فوق، همانند یک معادله یک درجه آزاد دینامیک سازه است که در واقع ضریب شتاب برابر با جرم معادل

یک سیستم یک درجه آزاد و ضریب سرعت معادل سختی آن می باشد، شتاب تحریک نیز در سمت راست معادله ظاهر شده

است. معادله فوق را می توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

معادله ۳-۴۹

$$\begin{aligned}
M_{NB}^* &= M_R \frac{R_{roof}^2}{4} + 4\rho R^3 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{\varepsilon_l^3(\varepsilon_l^2 - 1) \tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right)} \\
&\quad - 2\rho R^3 \sum_{i=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_i^2}\right) \frac{1}{\varepsilon_i(\varepsilon_i^2 - 1)^2} \frac{1}{\tanh\left(\frac{\varepsilon_i H}{R}\right)}
\end{aligned}$$

معادله ۳-۵۰

$$K_{NB}^* = \rho g \frac{R^2}{4} \xi_0(t)$$

معادله ۳-۵۱

$$M_{NB}^* \ddot{\xi}_0(t) + K_{NB}^* \xi_0(t) = -\rho \frac{R^3}{4} \ddot{x}_g(t)$$

فرکانس حرکت تلاطمی سیال و سقف صلب بر اساس معادله ۳-۵۲ بدست می آید.

معادله ۳-۵۲

$$\omega_{nNB} = \sqrt{\frac{K_{NB}^*}{M_{NB}^*}}$$

۳-۹-۲- با در نظر گرفتن میرایی ناشی از سقف و سیال

میرایی ناشی از سقف و سیال به صورت درصد معادل میرایی ویسکوز ζ طبق معادله ۳-۵۳ در نظر گرفته شده است. درصد میرایی مناسب بر اساس نتایج آزمایش ها از یکسو و مقالات مطالعه شده از سوی دیگر بین ۲ تا ۴ درصد می باشد.

معادله ۳-۵۳

$$C_{NB}^* = 2M_{NB}^* \omega_{nNB} \zeta_{NB}$$

در نتیجه معادله حرکت سقف شناور با در نظر گرفتن میرایی ناشی از حرکت سقف روی سیال، به صورت زیر ارائه می

شود:

معادله ۳-۵۴

$$M_{NB}^* \ddot{\xi}_0(t) + C_{NB}^* \dot{\xi}_0(t) + K_{NB}^* \xi_0(t) = -\rho \frac{R^3}{4} \ddot{x}_g(t)$$

۳-۱۰- معادله حرکت سقف همراه با بافل مدور آویخته

اساس انجام معادلات در این قسمت مانند مراحل استخراج معادله حرکت سقف بدون بافل مدور آویخته است، اما در این بخش جرم بافل مدور آویخته و کار نیروی ناپایستار ناشی از نیروی درگ آن، در معادلات ظاهر می شوند.

۳-۱۰-۱- لاگرانژ بخش بافل مدور آویخته در سیال

در معادلات لاگرانژ حرکت بافل، فرض شده هنگامی که بافل مدور آویخته در سیال فعال است و بواسطه نیروهای درگ سبب کاهش دامنه حرکت سقف شناور می شود، سرعت آن با سرعت سقف که با المان کششی آویخته به یکدیگر متصل شده اند، یکی است. روند تشکیل معادلات در این قسمت نیز مانند تشکیل معادلات سقف شناور می باشد.

معادله ۳-۵۵

$$L_{SAB} = \int_{\theta=0}^{2\pi} \frac{1}{2} M_{SAB} \dot{\xi}_0(t)^2 \left(\frac{R_{SAB}}{R} \right)^2 \cos^2 \theta R_{SAB} d\theta = \frac{1}{2} M_{SAB} \dot{\xi}_0(t)^2 \frac{R_{SAB}^3}{R^2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta$$

معادله ۳-۵۶

$$\delta L_{SAB} = M_{SAB} \dot{\xi}_0(t) \frac{R_{SAB}^3}{R^2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \dot{\xi}_0$$

معادله ۳-۵۷

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \delta L_{SAB} dt &= \int_{t_1}^{t_2} M_{SAB} \dot{\xi}_0(t) \frac{R_{SAB}^3}{R^2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \dot{\xi}_0 dt \\ &= -M_{SAB} \frac{R_{SAB}^3}{R^2} \dot{\xi}_0(t) \int_{t_1}^{t_2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \delta \xi_0 dt \end{aligned}$$

در معادلات فوق M_{SAB} جرم خطی بافل است و یا به عبارت دیگر $M_{SAB} = \frac{M_{total SAB}}{2\pi R_{SAB}}$ ، یعنی جرم کل بافل آویخته مدور، بخش بر محیط قطر میانی آن. (حلقه بافل دارای یک قطر خارجی و یک قطر داخلی است که قطر میانی، میانگین این دو قطر می باشد). در معادله فوق نیز از تکنیک انتگرال گیری جز به جز، استفاده شده است.

۳-۱۰-۲- کار نیروهای ناپایستار در بافل مدور آویخته در سیال

کار نیروهای ناپایستار ناشی از سقف و سیال به صورت درصد میرایی در قسمت حرکت سقف شناور بدون حضور بافل در نظر گرفته شد. در این قسمت به محاسبه کار نیروهای ناپایستار ناشی از حرکت بافل می پردازیم. هنگام حرکت بافل مدور آویخته که به سقف شناور دوخته شده است، این نیرو ناشی از نیروی درگ در نصف محیط بافل مدور آویخته می باشد.

معادله ۳-۵۸

$$\delta W_{nc}(t)_{SAB} = - \int_{\theta=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} F_d(\theta, t) \delta \eta(R_{SAB}, \theta, t) R_{SAB} d\theta$$

با در نظر گرفتن معادله ۳-۵ و حرکت مود اول صلب سقف که با آویزها به بافل متصل است نتیجه خواهد شد:

معادله ۳-۵۹

$$\delta W_{nc}(t)_{SAB} = - \int_{\theta=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} F_d(\theta, t) \frac{R_{SAB}}{R} \cos \theta \delta \xi_0(t) R_{SAB} d\theta$$

با توجه به معادله ۳-۵، معادله ۳-۵۹ و مقاله دکتر ضیافی فر و همکاران [۵۱] جهت محاسبه نیروی در گک F_d نتیجه خواهد

شد:

معادله ۳-۶۰

$$F_d(\theta, t) = \frac{1}{2} \rho C_{Drag} (V_{H-SAB}(t)) |V_{H-SAB}(t)| W_{SAB}$$

در معادلات فوق W_{SAB} عرض بافل و $V_{H-SAB}(t)$ مابه التفاوت سرعت قائم حرکت سقف و سرعت قائم سیال در محل

بافل مدور آویخته می‌باشد. برای نشان دادن جهت حرکت بافل از عبارت قدر مطلق استفاده شده است.

میرایی ناشی از حرکت به سمت بالای بافل که از نیروی مقاومت سیال (درگ) بر بافل حاصل می‌شود تابعی از ضریب نیروی درگ است. این ضریب عمدتاً به هندسه بافل و سرعت نسبی حرکت بافل در سیال بستگی دارد که در معادله فوق با C_{Drag} ارائه شده است. در تشکیل معادلات فرض بر آن است که نیمی از محیط سیال عمود بر سیال حرکت کرده و در ایجاد میرایی و در پی آن کاهش جابه جایی سقف شناور اثر دارد. با توجه به معادله ۳-۴ و معادله ۳-۸ نتیجه خواهد شد:

معادله ۳-۶۱

$$\dot{\eta}_z(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{z}{R} \right) \right] J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{r}{R} \right) \right]}{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H}{R} \right) \right] J_1(\varepsilon_i)} \dot{\xi}_0(t) \cos \theta$$

معادله ۳-۶۱ نشان دهنده سرعت قائم سیال در ارتفاع z از کف مخزن می‌باشد.

معادله ۳-۶۲

$$\begin{aligned} F_d(\theta, t) &= \frac{1}{2} \rho C_{Drag} \left(\dot{\eta}_H(t) - \dot{\eta}_{H_{SAB}}(t) \right) \left| \dot{\eta}_H(t) - \dot{\eta}_{H_{SAB}}(t) \right| W_{SAB} \\ &= \frac{1}{2} \rho C_{Drag} W_{SAB} \left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{R_{SAB}}{R} \right) \right]}{J_1(\varepsilon_i)} \dot{\xi}_0(t) \cos \theta \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H_{SAB}}{R} \right) \right] J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{r}{R} \right) \right]}{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H}{R} \right) \right] J_1(\varepsilon_i)} \dot{\xi}_0(t) \cos \theta \right) \left| \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{R_{SAB}}{R} \right) \right]}{J_1(\varepsilon_i)} \dot{\xi}_0(t) \cos \theta \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H_{SAB}}{R} \right) \right] J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{r}{R} \right) \right]}{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H}{R} \right) \right] J_1(\varepsilon_i)} \dot{\xi}_0(t) \cos \theta \right| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc}(t)_{SAB} dt \\
&= -\frac{1}{2} \rho C_{Drag} \frac{R_{SAB}^2}{R} \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_{\theta=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{R_{SAB}}{R} \right) \right]}{J_1(\varepsilon_i)} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H_{SAB}}{R} \right) \right]}{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H}{R} \right) \right]} \frac{J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{r}{R} \right) \right]}{J_1(\varepsilon_i)} \right) \left| \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{R_{SAB}}{R} \right) \right]}{J_1(\varepsilon_i)} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H_{SAB}}{R} \right) \right]}{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H}{R} \right) \right]} \frac{J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{r}{R} \right) \right]}{J_1(\varepsilon_i)} \right| \dot{\xi}_0(t) |\dot{\xi}_0(t)| \cos^3 \theta \delta \xi_0(t) d\theta \right) dt
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc}(t)_{SAB} dt \\
&= -\frac{1}{2} \rho C_{Drag} \frac{R_{SAB}^2}{R} W_{SAB} \int_{t_1}^{t_2} \left(\left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{R_{SAB}}{R} \right) \right]}{J_1(\varepsilon_i)} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H_{SAB}}{R} \right) \right]}{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H}{R} \right) \right]} \frac{J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{r}{R} \right) \right]}{J_1(\varepsilon_i)} \right)^2 \dot{\xi}_0(t) |\dot{\xi}_0(t)| \int_{\theta=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^3 \theta d\theta \right) \delta \xi_0(t) dt
\end{aligned}$$

$$\delta W_{nc} = \sum Q_i \delta q_i$$

$$\begin{aligned}
Q &= -\frac{1}{2} \rho C_{Drag} \frac{R_{SAB}^2}{R} W_{SAB} \left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{R_{SAB}}{R} \right) \right]}{J_1(\varepsilon_i)} \right. \\
&\quad \left. - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H_{SAB}}{R} \right) \right]}{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H}{R} \right) \right]} \frac{J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{r}{R} \right) \right]}{J_1(\varepsilon_i)} \right)^2 \left(\int_{\theta=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^3 \theta d\theta \right) \dot{\xi}_0(t) |\dot{\xi}_0(t)|
\end{aligned}$$

$$\int_{\theta=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^3 \theta d\theta = 4/3$$

$$\int_{\theta=0}^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta = \pi$$

$$Q = -\frac{1}{2} \frac{4}{3\pi} \rho C_{Drag} W_{SAB} \frac{R_{SAB}^2}{R} \left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{R_{SAB}}{R} \right) \right]}{J_1(\varepsilon_i)} \right. \\ \left. - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H_{SAB}}{R} \right) \right]}{\sinh \left[\varepsilon_i \left(\frac{H}{R} \right) \right]} \frac{J_1 \left[\varepsilon_i \left(\frac{r}{R} \right) \right]}{J_1(\varepsilon_i)} \right)^2 \dot{\xi}_0(t) |\dot{\xi}_0(t)|$$

۳-۱۰-۳- معادله حرکت سقف همراه با بافل مدور آویخته

با توجه به معادله ۳-۲۳، معادله ۳-۲۴، معادله ۳-۴۳، معادله ۳-۴۶، معادله ۳-۵۴، معادله ۳-۵۳، معادله ۳-۵۷، معادله ۳-۶۳ و این موضوع که معادله حرکت سقف شناور همراه با بافل مدور آویخته با اضافه نمودن ترم‌های کار نیروهای ناشی از حضور بافل و جرم آن به معادله ۳-۵۴ (معادله حرکت بدون حضور بافل) بدست می‌آید، معادله ۳-۶۴ جهت بدست آورد پاسخ تاریخیچه زمانی حرکت قائم سقف شناور ارائه شده است.

معادله ۳-۶۴

$$M_{BW}^* \ddot{\xi}_0(t) + C_{NB}^* \dot{\xi}_0(t) + C_{SAB}^* \xi_0 |\dot{\xi}_0(t)| + K_{NB}^* \xi_0(t) = -\rho \frac{R^3}{4} \ddot{x}_g(t)$$

معادله ۳-۶۵

$$M_{BW}^* = M_{NB}^* + \frac{M_{SAB} R_{SAB}^3}{R^2} = M_R \frac{R_{roof}^2}{4} + 4\rho R^3 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{\varepsilon_l^3 (\varepsilon_l^2 - 1) \tanh \left(\frac{\varepsilon_l H}{R} \right)} \\ - 2\rho R^3 \sum_{i=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_i^2} \right) \frac{1}{\varepsilon_i (\varepsilon_i^2 - 1)^2} \frac{1}{\tanh \left(\frac{\varepsilon_i H}{R} \right)} + \frac{M_{SAB} R_{SAB}^3}{R^2}$$

$$C_{SAB}^* = \frac{1}{2} \frac{4}{3\pi} \rho C_{Drag} W_{SAB} \frac{R_{SAB}^2}{R} \left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{J_1\left[\varepsilon_i \left(\frac{R_{SAB}}{R}\right)\right]}{J_1(\varepsilon_i)} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{\sinh\left[\varepsilon_i \left(\frac{H_{SAB}}{R}\right)\right]}{\sinh\left[\varepsilon_i \left(\frac{H}{R}\right)\right]} \frac{J_1\left[\varepsilon_i \left(\frac{r}{R}\right)\right]}{J_1(\varepsilon_i)} \right)^2$$

با مقایسه معادله ۶۴-۳ و معادله ۵۴-۳ مشاهده می شود که تغییر زمان تناوب سیستم با بافل مدور آویخته و بدون آن کم می‌باشد. علت آن است که جرم کم بافل در مقایسه با مجموع جرم سیال و سقف می باشد. (تاثیر بکارگیری مقادیر متفاوت برای جرم بافل می‌تواند عنوان مناسبی برای کارهای تحقیقاتی آینده باشد). از دیگر نتایج مقایسه این دو معادله آن است که، سختی در سیستم با بافل مدور آویخته و بدون آن یکی است. مانند بخش معادلات بدون بافل مدور آویخته، در این قسمت نیز مانند حل معادلات دینامیکی حرکت سقف شناور بدون بافل، جهت حل معادلات در برنامه متلب، از پنج ریشه اول حاصل از برابر با صفر قراردادن مشتق معادله مرتبه اول بسل، استفاده شده است.

در محاسبه تاریخچه تلاطم هرچند که از لحاظ هندسه سطح مایع، مود یک اسلاشینگ سقف غالب می باشد، اما تاثیر مدهای بالاتر در تابع پتانسیل سرعت باید منظور شود. در مطالعات گلزار و همکاران [۴۵، ۴۶] که یکی از مراجع اصلی این رساله بوده است تعداد مودهای سیال بیش از ۵ برابر مودهای حرکت سقف در نظر گرفته شده است. از آنجا که تابع پتانسیل سرعت به فشار نیز بستگی دارد و مودهای بالاتر می توانند میدان های فشار متفاوتی در سیال ایجاد کنند، مود های بالاتر برای در نظر گرفتن این میدان های فشار ملحوظ گردیده اند. شایان ذکر است تفاوت پاسخ های تاریخچه زمانی، حتی در صورتیکه یک مود سقف شناور و دو مود حرکت سیال یا به عبارت دیگر دو ریشه معادله بسل در نظر گرفته شود، تاثیر قابل توجهی در نتایج نخواهد داشت.

۳-۱۰-۴- اعمال تاثیر لحظات فعال نبودن و مجدداً فعال شدن بافل مدور آویخته در معادلات حرکت

با مشاهده فیلم های آزمایش متوجه می شویم، هنگامی که سقف به اوج حرکت خود می رسد، در لحظات برگشت، بافل مدور آویخته حالت کاملاً معلق دارد و در سیال رها است و سبب کاهش جابه جایی سقف در این لحظات نمی شود. به بیان دیگر از آنجا که این کابل ها فقط در کشش کار می کنند، از لحظه برگشت سقف از اوج خود، تمامی کابل ها دیگر در کشش نیستند تا زمانی که حرکت سقف دوباره کم کم در سمت مخالف رو به افزایش بگذارد که در آن لحظات مجدداً میرایی بافل وارد عمل می شود.

برای اعمال نمودن این موضوع در برنامه نوشته شده در نرم افزار متلب، لحظات از کار افتادگی کابل ها، زمانی است که حرکت قائم سقف تغییر جهت می دهد، بنابراین در برنامه متلب چنین الگوریتمی وارد شده است: هنگامی که ضرب دو سرعت قائم متوالی لبه سقف یک عدد منفی شود (به معنای برگشت سقف از نقطه اوج خود) معادلات به حالت بدون استفاده از میرایی بافل مدور آویخته سویچ^۱ شوند.

¹ Switch

از لحظه ای که حرکت بافل بواسطه فشرده نشدن کابل ها، از سقف جدا می شود، تاریخچه حرکت سقف به صورت مستقل با معادلات بدون بافل و تاریخچه حرکت بافل به صورت مستقل با استفاده از معادلات سقوط آزاد در سیال، در برنامه متلب نوشته شده، جداگانه ذخیره می شود تا لحظه ای که فاصله بین سقف شناور جدا شده از بافل و بافل مدور آویخته مجدد بیش از طول نخ وصل کننده این دو بشود. هنگامی که فاصله بین سقف و بافل مدور آویخته بیش از طول نخ موجود شود، این بدان معناست که مجدداً بافل آویخته مدور فعال شده و دوباره حرکت آنها با هم در برنامه متلب نوشته شده، ذخیره می شوند. در معادله ۶۷-۳ رابطه سقوط آزاد بافل ارائه شده است. این معادله بر مبنای روش نیوتنی، استخراج شده است.

$$M_{SAB} g - \frac{1}{2} \rho C_{Drop} A_{SAB} \dot{u}_{SAB}^2(t) = -M_{SAB} \ddot{u}_{SAB}(t) \quad \text{معادله ۶۸-۳}$$

در معادله فوق M_{SAB} جرم کل بافل آویخته مدور، g شتاب ثقل زمین، C_{Drop} ضریب نیروی درگ مربوط به مقاومت سیال در برابر سقوط آزادانه بافل مستقل از حرکت سقف شناور که به هندسه بافل بستگی دارد، A_{SAB} مساحت بافل مدور آویخته، $\dot{u}$ سرعت سقوط آزاد بافل مدور آویخته در سیال و $\ddot{u}_{SAB}(t)$ شتاب حرکت آزادانه بافل مدور آویخته در سیال می‌باشد. جهت بدست آوردن مقدار C_{Drop} در معادله ۶۸-۳، چند بار آزمایش سقوط آزاد بافل در محیط سیال انجام شد، بازه بین ۴ تا ۷، عددی مناسب برای این مقدار با توجه به معادله فوق، می باشد. شایان ذکر است زاویه دار حرکت کردن بافل و نحوه حرکت آن بر میزان این عدد تاثیر گذار است. این مقدار، در شرایط سقوط تقریباً افقی گزارش شده است. علامت های جبری در معادله فوق به نحوی است که جابه جایی بافل به سمت پایین با علامت منفی می باشد. با توجه به آنکه ضریب C_{Drop} در سقوط آزاد بافل ظاهر می شود و ضریب C_{Drag} در حرکت بافل به سمت بالا، انتظار می رود ضریب C_{Drop} از ضریب C_{Drag} کوچکتر باشد، پاسخ مطالعات تحلیلی نیز این مطلب را نشان می دهد.

در واقع در حالت با بافل علاوه بر میرایی عمومی سقف و مایع که در حالت بدون بافل مقدار آن بدست آمد، سه پارامتر دیگر نیز برای اعمال اثر حضور بافل در میرایی کل سیستم به کار گرفته شده است. اول میرایی ناشی از حرکت به سمت بالای بافل که از نیروی مقاومت سیال (درگ) بر بافل حاصل می شود و عمدتاً به هندسه بافل و سرعت نسبی حرکت بافل در سیال بستگی دارد که با C_{Drag} در معادلات ظاهر شده است، دوم پارامتر مربوط به مقاومت سیال در برابر سقوط آزادانه بافل مستقل از حرکت سقف شناور که آنهم به هندسه بافل بستگی دارد و در معادلات به صورت C_{Drop} ظاهر شده است و سوم ضریب اصلاح طول نخ های آویز^۱ است. این ضریب در طول نخ ضرب می شود و هنگامی که فاصله بین جایه جایی سقف شناور و حرکت مستقل بافل با طول نخ واصل این دو مقایسه می شود، تأثیر خود را در محاسبات نشان می دهد.

¹ Cable length modification

۵-۱۰-۳- نتایج محاسبات تحلیلی

نتایج محاسبات تحلیلی حاصل از معادلات ارائه شده در این فصل همراه با مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی، در فصل چهارم ارائه شده اند.

فصل ۴- نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی و مقایسه آنها

۴-۱- مقدمه

در این فصل، در قسمت اول، به ارائه نتایج آزمایش های انجام شده بر روی ایده پیشنهادی پرداخته شده و کارایی این ایده مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت دوم، نتایج تحلیلی معادلات استخراج شده در فصل دوم که با برنامه نویسی در نرم افزار متلب بدست آمده اند همراه با مقایسه درصد تفاوت این پاسخ ها با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده اند. در انتهای فصل نیز پاسخ های تحلیلی و آزمایشگاهی مربوط به هر دسته از آزمایش ها، جهت تشخیص بهتر در یک نمودار نشان داده شده اند.

۴-۲- نتایج آزمایشگاهی

در فصل دوم نامگذاری آزمایش های انجام شده، معرفی شدند. به عنوان مثال در شکل ۴-۱ تصویری از مخزن حاوی سیال به ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، قبل و پس از تحریک در لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم، از دید دوربین شماره یک، تحت تحریک هارمونیک به دامنه ۴ میلی متر با فرکانس ۰.۹۵ هرتز در دو حالت بدون بافل و با بافل ۷ سانتیمتری، نشان داده شده است. این دو آزمایش در جدول ۲-۲ با نام های H70WOBHf095 و H70WB07Hf095 نشان داده شده اند.

در شکل ۴-۲ پاسخ مخزن از نگاه دوربین دید پرنده نظیر لحظه نشان داده شده در شکل ۴-۱ آزمایش تحت تحریک هارمونیک به دامنه ۴ میلی متر با فرکانس ۰.۹۵ هرتز در دو حالت بدون بافل و با بافل ۷ سانتیمتری از دید دوربین پرنده نشان داده شده است که شکل سمت راست قبل از تحریک و شکل سمت چپ حداکثر ارتفاع تلاطم را نشان می دهد.



قبل از تحریک، بدون بافل بافل

بعد از تحریک، در لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم ۱۴.۵ سانتیمتر بدون بافل



قبل از تحریک، با بافل به عرض ۷ سانتیمتر



بعد از تحریک در لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم ۲.۲۵ سانتیمتر با بافل به عرض ۷ سانتیمتر

شکل ۱-۴ تصاویر پاسخ مخزن از نگاه دورین شماره یک مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر با فرکانس ۰.۹۵ هرتز در دو حالت بدون بافل و با بافل ۷ سانتیمتری



نمای دید پرنده نشان داده شده نظیر لحظه حداکثر جابه جایی در شکل ۱-۴

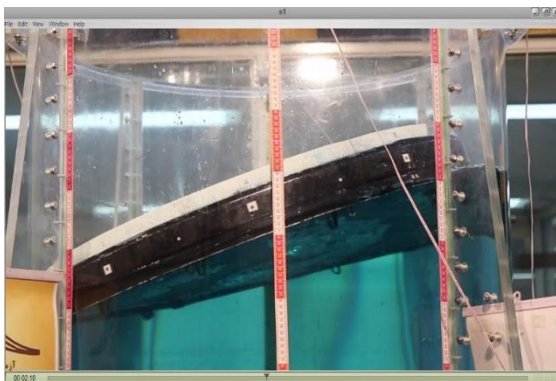


نمای دید پرنده نشان داده شده قبل از تحریک در شکل ۱-۴

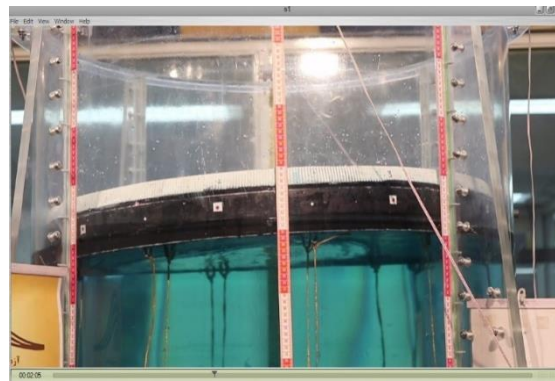
شکل ۲-۴ پاسخ مخزن از نگاه دورین دید پرنده نظیر لحظه نشان داده شده در شکل ۱-۴

در شکل ۳-۴ رفتار لرزه ای سقف شناور در دو حالت با استفاده از بافل به عرض ۷ سانتیمتر و بدون استفاده از بافل، تحت اثر تحریک هارمونیک نشان داده شده است. چنانچه در این شکل مشاهده می شود، حداکثر جابه جایی قائم سقف شناور بدون استفاده از بافل، تحت تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۵ هرتز و دامنه جابه جایی ۴ میلی متر، ۱۴.۵ سانتیمتر است. در صورتیکه در همین شرایط از بافل مدور آویخته به عرض ۷ سانتیمتر استفاده شود، این دامنه به ۲.۲۵ سانتیمتر کاهش می یابد که این موضوع حاکی از کارایی ایده پیشنهادی است. چنانچه در شکل ۵-۲ نشان داده شده است، دوربین شماره دو و دوربین شماره چهار در دو سمت مخالف مخزن قرار گرفته اند، بنابراین در لحظه ای که سقف شناور از نگاه یکی از این دوربین ها در اوج است از دیدگاه دوربین دیگر، دارای حداقل ارتفاع می باشد.

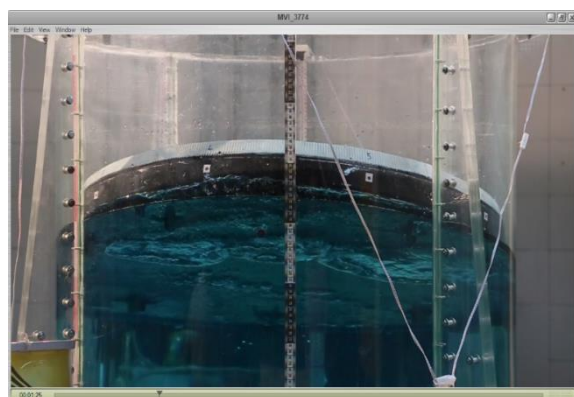
در هر آزمایش هنگام تحریک، سنسورهای یک تا چهار، نظیر محل دوربین های یک تا چهار، در اطراف مخزن جابه جایی سقف را در طول تحریک ثبت می نمایند. این سنسورهای جابه جایی سنج با ارسال یک سیگنال به سقف و دریافت بازتاب آن ولتاژی را به ازای هر فاصله ثبت می کنند. هر ولتاژ بر اساس کاتالوگ این سنسورها، معادل یک جابه جایی نظیر می باشد. رابطه مذکور در برنامه نوشته شده در نرم افزار متلب اعمال شده است و تاریخچه ولتاژ برداشتی در نهایت به تاریخچه جابه جایی قائم لبه سقف شناور تبدیل می شود. در شکل ۴-۴ تاریخچه جابه جایی قائم بر حسب زمان بدست آمده از سنسور قرار گرفته در محل دوربین دوم، در دو حالت آزمایش بدون بافل و با بافل ۷ سانتیمتری، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۵ هرتز در حالتی که ارتفاع سطح سیال درون مخزن ۷۰ سانتیمتر می باشد، ارائه شده است.



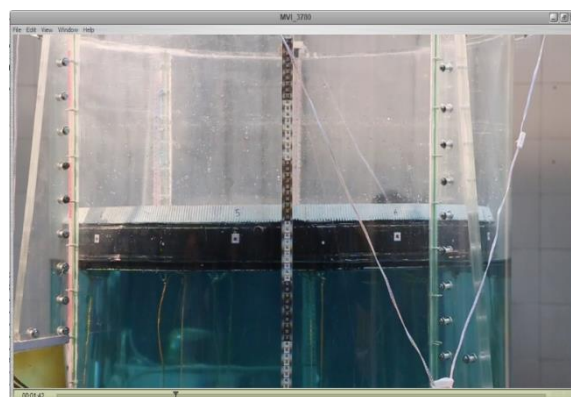
در لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم ۱۴.۵ سانتیمتر بدون بافل، از نگاه دوربین یک



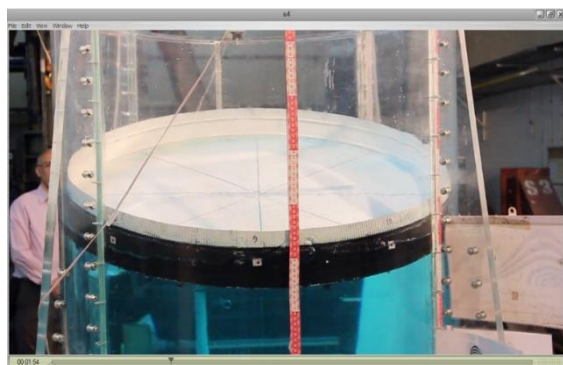
در لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم ۲.۲۵ سانتیمتر با بافل ۷ سانتیمتری، از نگاه دوربین یک



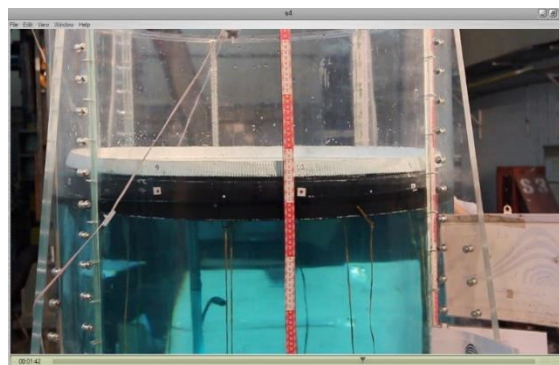
در لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم ۱۴.۵+ سانتیمتر بدون بافل، از نگاه دوربین دو



در لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم ۲.۲۵+ سانتیمتر با بافل ۷ سانتیمتری، از نگاه دوربین دو

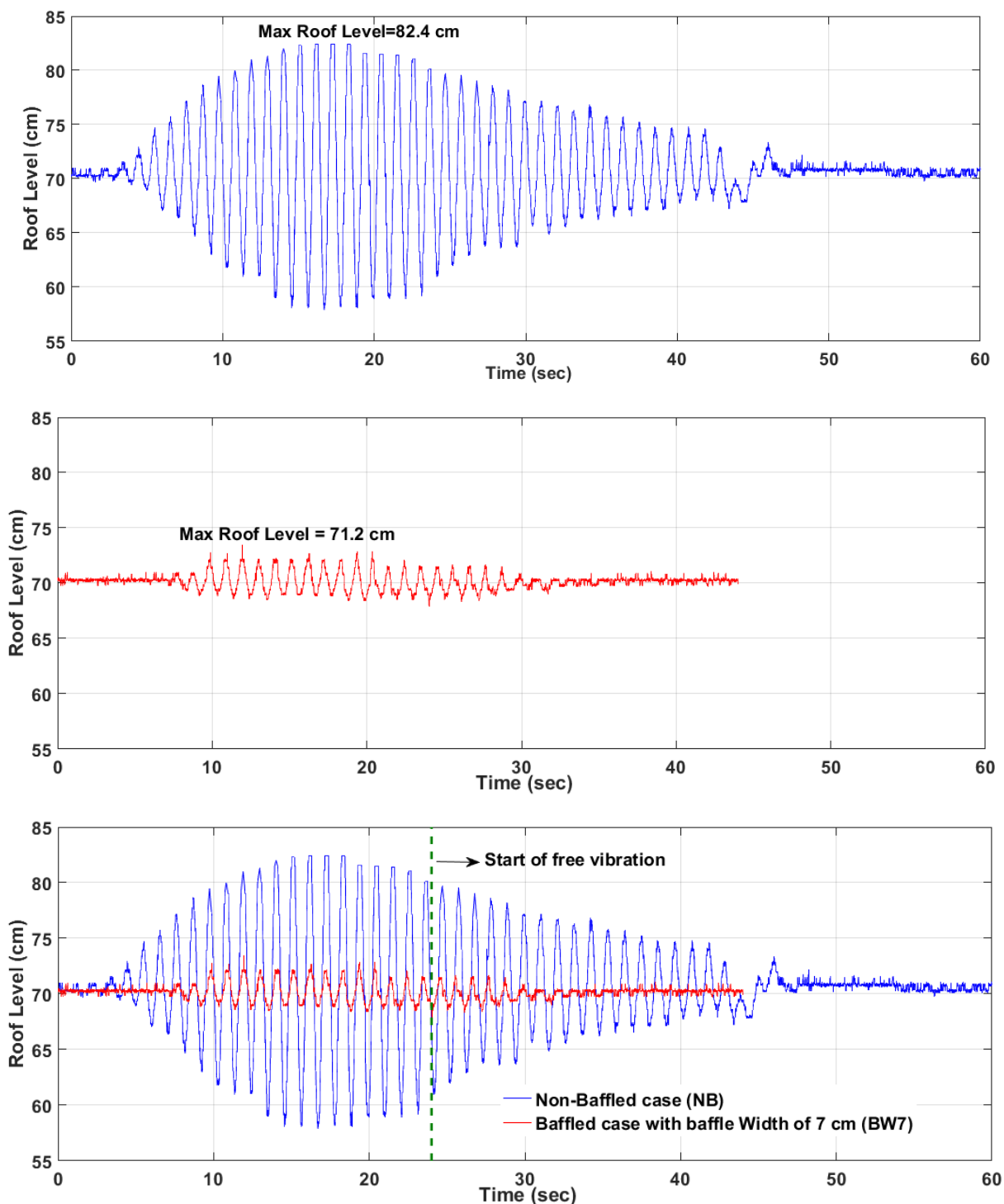


در لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم ۱۴.۵- سانتیمتر بدون بافل، از نگاه دوربین چهار



در لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم ۲.۲۵- سانتیمتر با بافل ۷ سانتیمتری، از نگاه دوربین چهار

شکل ۳-۴ تصاویر پاسخ مخزن از نگاه دوربین های یک، دو و چهار مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۷۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر با فرکانس ۰.۹۵ هرتز در دو حالت بدون بافل و با بافل ۷ سانتیمتری



شکل ۴-۴- تاریخچه جابه جایی قائم بر حسب زمان بدست آمده از سنسور، در دو حالت بدون بافل و با بافل ۷ سانتیمتری، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۵ هرتز در ارتفاع محتوی مخزن ۷۰ سانتیمتر

فیلم برداشت شده از آزمایش نظیر شکل ۳-۴ و شکل ۴-۴ در یک کلیپ مقایسه ای در سایت ژورنال استخراج شده از بخش اول این تحقیق^۱ [۵۲]، آپلود شده است. نتیجه حاصل از این تحریک، حاکی از ۸۵ درصد کاهش در دامنه تلاطم بواسطه‌ی استفاده ازبافل مدور آویخته است. متن این مقاله در پیوست ج ارائه شده است.

نتایج کلیه آزمایش های انجام شده در سه دسته آزمایشات در ارتفاع ۲۰، ۵۰ و ۷۰ سانتیمتر در سه جدول دسته بندی شده‌اند. در این جداول حداکثر دامنه تلاطم در سه حالت بدون بافل، با بافل به عرض ۷ سانتیمتر و با بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر به همراه درصد کاهش حضور بافل ۷ و ۱۱ سانتیمتر در کاهش ارتفاع تلاطم ارائه شده است. جهت بررسی بهتر اعداد نشان داده شده در هر جدول، در ادامه هر جدول نتایج بار دیگر به صورت نمودارهای میله ای نشان داده شده است.

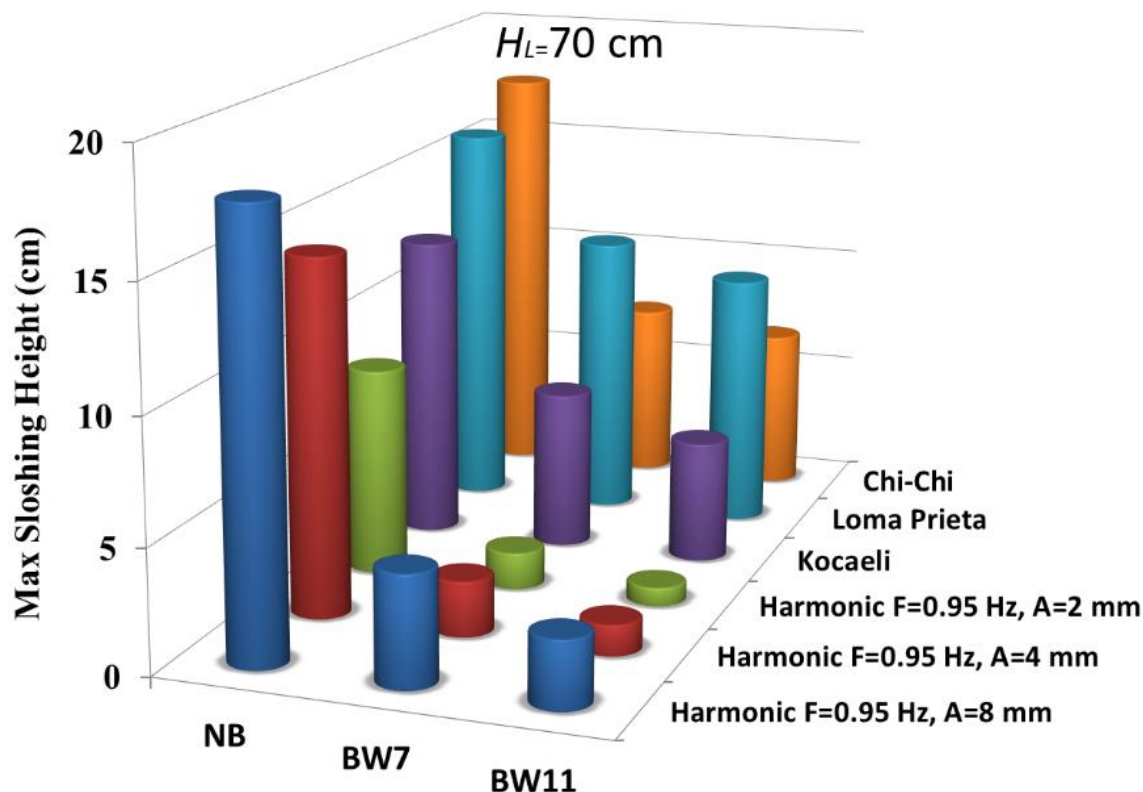
۴-۲-۱- نتایج آزمایشگاهی مربوط به ارتفاع ۷۰ سانتیمتر

در جدول زیر نتایج اندازه گیری های آزمایشگاهی مربوط به ارتفاع ۷۰ سانتیمتر برای حالات بدون بافل و نیز با بافل های مدور آویخته ۷ و ۱۱ سانتیمتری ارائه شده‌اند. شایان ذکر است که به علت چرخش سقف شناور و کاملاً مستوی نبودن سقف شناور و بافل مدور آویخته، اندازه گیری های چشمی انجام شده در جدول زیر، با حداکثر مثبت یا منفی یک سانتیمتر خطا همراه هستند.

جدول ۱-۴مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در آزمایش ارتفاع سیال ۷۰ سانتیمتر و درصد کاهش پاسخ

H (cm)	Excitation	MSH (cm)		Reduction Percent (%)	MSH (cm)	Reduction Percent (%)
		NB	BW7		BW11	
70	Harmonic F=0.95Hz, A=8 mm	20.00	4.50	77.50	2.75	86.25
	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm	14.50	2.25	84.48	1.25	91.38
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm	8.50	1.50	82.35	0.75	91.18
	Kocaeli	12.67	6.50	48.68	5.00	60.53
	Loma Prieta	16.33	11.67	28.57	10.50	35.71
	Chi-Chi	17.67	7.33	58.49	6.67	62.26

¹ Journal of Fluids and Structures - Elsevier



شکل ۵-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در آزمایش ارتفاع سیال ۷۰ سانتیمتر

با توجه به نتایج عددی نشان داده شده در جدول ۴-۱ و نمودار نشان داده شده در شکل ۵-۴، میانگین پاسخ های ارتفاع ۷۰ سانتیمتر با استفاده از بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر، حاکی از ۹۰ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت اثر تحریکات هارمونیک و ۵۳ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت تحریکات لرزه ای می باشد. میانگین پاسخ های ارتفاع ۷۰ سانتیمتر با استفاده از بافل به عرض ۷ سانتیمتر نیز حاکی از ۸۱ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت اثر تحریکات هارمونیک و ۴۵ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت تحریکات لرزه ای می باشد. با افزایش عرض بافل از ۷ سانتیمتر به ۱۱ سانتیمتر، درصد کاهش پاسخ افزایش یافته است.

میانگین درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم در حالت ارتفاع سیال ۷۰ سانتیمتر با استفاده از بافل ۷ سانتیمتری تحت تحریک هارمونیک ۸۱ درصد می باشد که این درصد در حالت استفاده از بافل ۱۱ سانتی تحت تحریک هارمونیک به ۹۰ درصد افزایش می یابد. این موضوع حکایت از تقریباً ۹ درصد بهبود عملکرد با افزایش عرض بافل در تحریکات هارمونیک می باشد. میانگین درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم در حالت ارتفاع سیال ۷۰ سانتیمتر با استفاده از بافل ۷ سانتیمتری تحت تحریک های لرزه ای ۴۵ درصد می باشد که این درصد در حالت استفاده از بافل ۱۱ سانتی تحت تحریک های لرزه ای به ۵۳ درصد افزایش می یابد. این موضوع حکایت از تقریباً ۸ درصد بهبود عملکرد با افزایش عرض بافل در تحریک های لرزه دارد.

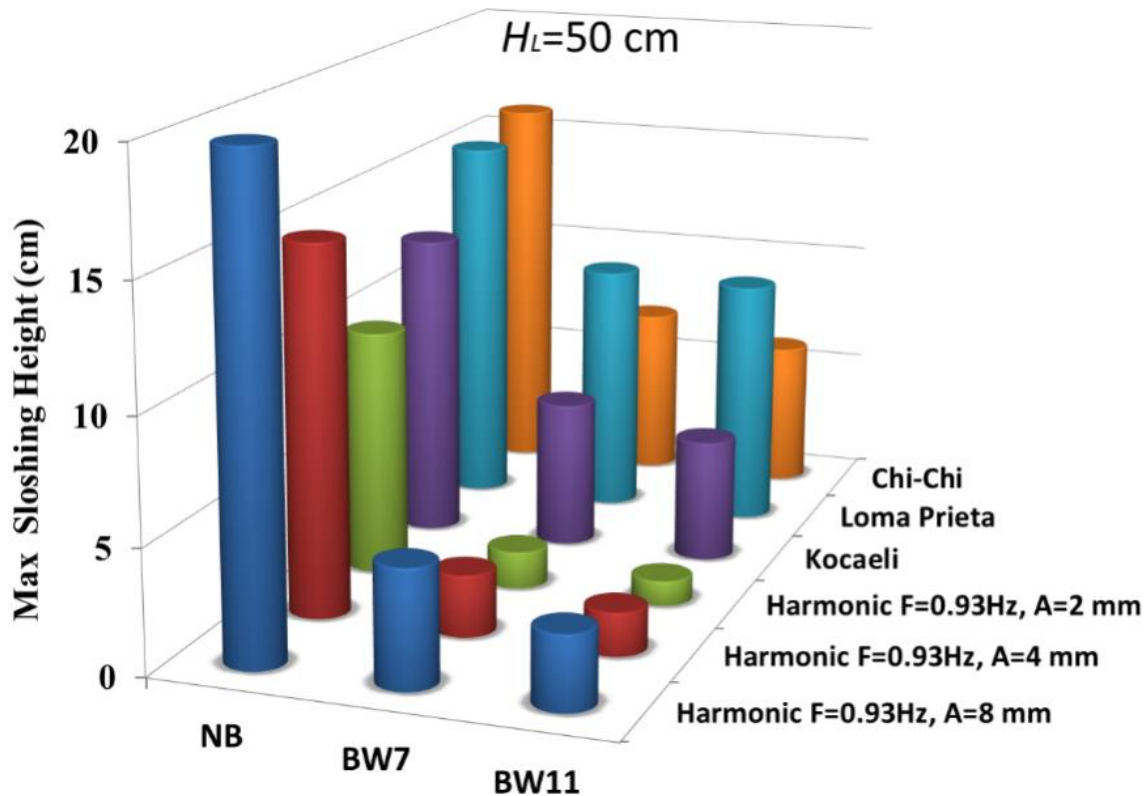
میانگین درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم در دو حالت استفاده از بافل ۷ سانتیمتری و ۱۱ سانتیمتری تحت تحریک های هارمونیک ۸۵ درصد و تحت تحریک های لرزه ای به ۴۹ درصد می باشد. این موضوع حکایت از عملکرد مناسب ایده پیشنهادی، در حالت ارتفاع سیال ۷۰ سانتیمتر، دارد.

۴-۲-۲- نتایج آزمایشگاهی مربوط به ارتفاع ۵۰ سانتیمتر

در جدول زیر نتایج اندازه گیری های آزمایشگاهی مربوط به ارتفاع ۵۰ سانتیمتر برای حالات بدون بافل و نیز با بافل های ۷ و ۱۱ سانتیمتری ارائه شده اند. شایان ذکر است که به علت چرخش سقف شناور و کاملاً مستوی نبودن سقف شناور و بافل مدور آویخته اندازه گیری های چشمی انجام شده ارائه شده در جدول زیر، با حداکثر مثبت یا منفی یک سانتیمتر خطا همراه هستند.

جدول ۲-۴ مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در آزمایش ارتفاع سیال ۵۰ سانتیمتر و درصد کاهش پاسخ

H (cm)	Excitation	MSH (cm)		Reduction Percent (%)	MSH (cm)	Reduction Percent (%)
		NB	BW7		BW11	
50	Harmonic F=0.93Hz, A=8 mm	19.75	4.75	75.95	3.00	84.81
	Harmonic F=0.93Hz, A=4 mm	15.00	2.50	83.33	1.75	88.33
	Harmonic F=0.93Hz, A=2 mm	10.00	1.50	85.00	1.00	90.00
	Kocaeli	12.50	6.00	52.00	5.00	60.00
	Loma Prieta	15.33	10.33	32.61	10.17	33.70
	Chi-Chi	16.00	7.00	56.25	6.00	62.50



شکل ۶-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در آزمایش ارتفاع سیال ۵۰ سانتیمتر

با توجه به نتایج عددی نشان داده شده در جدول ۲-۴ و نمودار نشان داده شده در شکل ۶-۴، میانگین پاسخ های ارتفاع ۵۰ سانتیمتر با استفاده از بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر، حاکی از ۸۸ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت اثر تحریکات هارمونیک و ۵۲ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت تحریکات لرزه ای می باشد. میانگین پاسخ های ارتفاع ۵۰ سانتیمتر با استفاده از بافل به عرض ۷ سانتیمتر نیز حاکی از ۸۱ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت اثر تحریکات هارمونیک و ۴۷ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت تحریکات لرزه ای می باشد. با افزایش عرض بافل از ۷ سانتیمتر به ۱۱ سانتیمتر، درصد کاهش پاسخ افزایش یافته است.

میانگین درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم در حالت ارتفاع سیال ۵۰ سانتیمتر با استفاده از بافل ۷ سانتیمتری تحت تحریک هارمونیک ۸۱ درصد می باشد که این درصد در حالت استفاده از بافل ۱۱ سانتی تحت تحریک هارمونیک به ۸۸ درصد افزایش می یابد. این موضوع حکایت از تقریباً ۷ درصد بهبود عملکرد با افزایش عرض بافل در تحریکات هارمونیک دارد.

میانگین درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم در حالت ارتفاع سیال ۵۰ سانتیمتر با استفاده از بافل ۷ سانتیمتری تحت تحریک های لرزه ای ۴۷ درصد می باشد که این درصد در حالت استفاده از بافل ۱۱ سانتی تحت تحریک های لرزه ای به ۵۲ درصد افزایش می یابد. این موضوع حکایت از تقریباً ۵ درصد بهبود عملکرد با افزایش عرض بافل در تحریک های لرزه ای دارد.

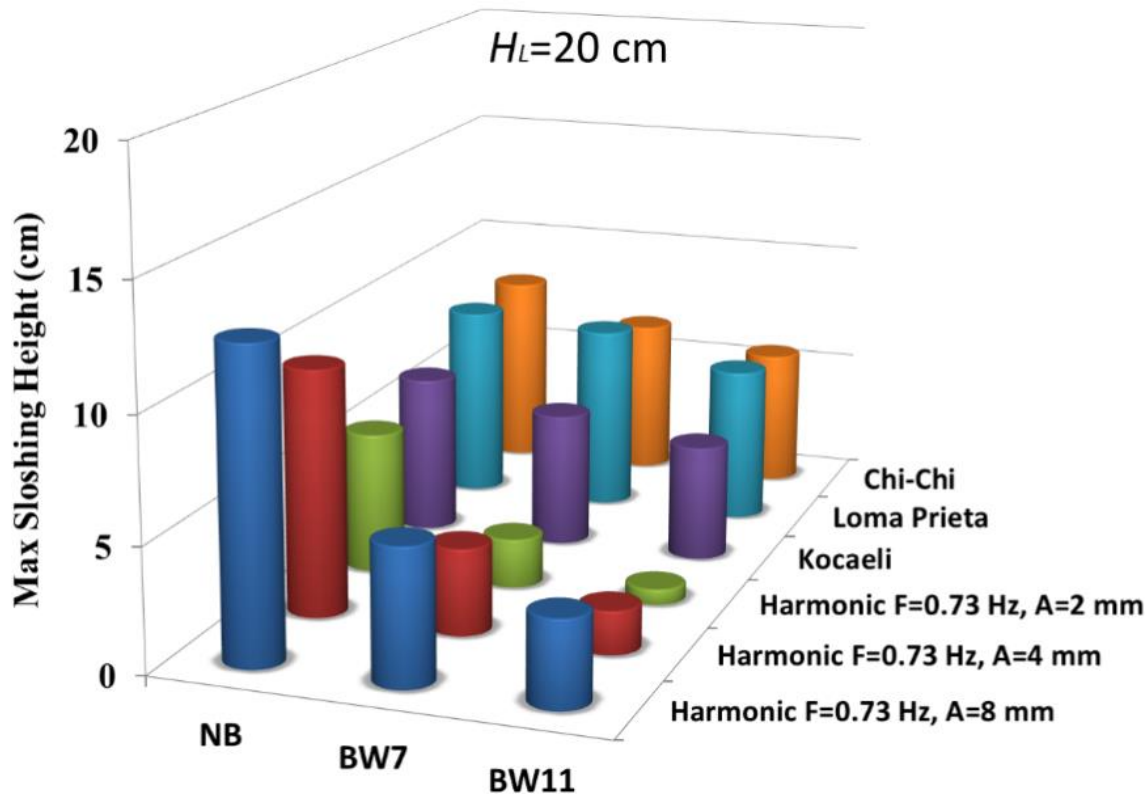
میانگین درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم در دو حالت استفاده از بافل ۷ سانتیمتری و ۱۱ سانتیمتری تحت تحریک های هارمونیک ۸۵ درصد و تحت تحریک های لرزه ای تقریباً به ۵۰ درصد می رسد. این موضوع حکایت از عملکرد مناسب ایده پیشنهادی، در حالت ارتفاع سیال ۵۰ سانتیمتر، دارد.

۳-۲-۴- نتایج آزمایشگاهی مربوط به ارتفاع ۲۰ سانتیمتر

در جدول زیر نتایج اندازه گیری های آزمایشگاهی مربوط به ارتفاع ۲۰ سانتیمتر برای حالات بدون بافل و نیز با بافل های ۷ و ۱۱ سانتیمتری ارائه شده اند. شایان ذکر است که به علت چرخش سقف شناور و کاملاً مستوی نبودن سقف شناور و بافل مدور آویخته اندازه گیری های چشمی انجام شده ارائه شده در جدول زیر، با حداکثر مثبت یا منفی یک سانتیمتر خطا همراه هستند.

جدول ۳-۴ مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در آزمایش ارتفاع سیال ۲۰ سانتیمتر و درصد کاهش پاسخ

H (cm)	Excitation	MSH (cm)		Reduction Percent (%)	MSH (cm)	Reduction Percent (%)
		NB	BW7		BW11	
20	Harmonic F=0.76Hz, A=8 mm	12.50	5.50	56.00	3.50	72.00
	Harmonic F=0.76Hz, A=4 mm	10.00	3.50	65.00	1.75	82.50
	Harmonic F=0.76Hz, A=2 mm	5.75	2.00	65.22	0.63	89.13
	Kocaeli	6.50	5.50	15.38	4.75	26.92
	Loma Prieta	8.00	7.67	4.17	6.42	19.79
	Chi-Chi	8.00	6.50	18.75	5.67	29.17



شکل ۴-۷ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در آزمایش ارتفاع سیال ۲۰ سانتیمتر

با توجه به نتایج عددی نشان داده شده در جدول ۳-۴ و نمودار نشان داده شده در شکل ۴-۷، میانگین پاسخ های ارتفاع ۲۰ سانتیمتر با استفاده از بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر، حاکی از ۸۱ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت اثر تحریکات هارمونیک و ۲۵ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت تحریکات لرزه ای می باشد. میانگین پاسخ های ارتفاع ۲۰ سانتیمتر با استفاده از بافل به عرض ۷ سانتیمتر نیز حاکی از ۶۲ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت اثر تحریکات هارمونیک و ۱۳ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت تحریکات لرزه ای می باشد. با افزایش عرض بافل از ۷ سانتیمتر به ۱۱ سانتیمتر، درصد کاهش پاسخ افزایش یافته است.

میانگین درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم در حالت ارتفاع سیال ۲۰ سانتیمتر با استفاده از بافل ۷ سانتیمتری تحت تحریک هارمونیک ۶۲ درصد می باشد که این درصد در حالت استفاده از بافل ۱۱ سانتی تحت تحریک هارمونیک به ۸۱ درصد افزایش می یابد. این موضوع حکایت از تقریباً ۱۹ درصد بهبود عملکرد با افزایش عرض بافل در تحریکات هارمونیک دارد.

میانگین درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم در حالت ارتفاع سیال ۲۰ سانتیمتر با استفاده از بافل ۷ سانتیمتری تحت تحریک های لرزه ای ۱۳ درصد می باشد که این درصد در حالت استفاده از بافل ۱۱ سانتی تحت تحریک های لرزه ای به ۲۵ درصد افزایش می یابد. این موضوع حکایت از تقریباً ۱۲ درصد بهبود عملکرد با افزایش عرض بافل در تحریک های لرزه ای دارد.

میانگین درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم در دو حالت استفاده از بافل ۷ سانتیمتری و ۱۱ سانتیمتری تحت تحریک های هارمونیک تقریباً ۷۲ درصد و تحت تحریک های لرزه ای تقریباً به ۱۹ درصد می رسد. این موضوع حکایت از عملکرد مناسب

ایده پیشنهادی، در حالت ارتفاع سیال ۲۰ سانتیمتر، دارد. هر چند این عملکرد، نسبت به قرار گیری سقف در دو عمق شناور قبلی (۷۰ و ۵۰ سانتیمتر) کمتر است.

از آنجا که اکثر آسیب‌های لرزه ای ناشی از تلاطم در مخازن سقف شناور هنگامی رخ داده اند که سیال بیش از نصف ارتفاع مخزن را پر کرده است و از سوی دیگر متغیر بودن طول آویزهای نگهدارنده بافل، از نظر اجرایی مشکل ساز می شود، توصیه می شود اندازه آویزها متناسب با دو سوم حداکثر عمق بهره برداری در نظر گرفته شود.

۴-۲-۴- مقیاس آزمایش انجام شده بر اساس معادله حرکت سقف شناور بدون بافل آویخته و میرایی سقف

با فرض آنکه تاریخچه پاسخ "نسبت ارتفاع تلاطم به شعاع مخزن" را در مدل آزمایشگاهی و مدل واقعی برابر قرار دهیم و معادله حرکت ارائه شده معادله ۵۱-۳ در فصل سوم را مستقل از جرم نماییم و از جرم سقف شناور در برابر جرم کانوکتیو سیال صرف نظر نماییم، خواهیم داشت:

معادله ۴-۱

$$\frac{\ddot{\xi}_0(t)}{R} + \frac{K_{NB}^*}{RM_{NB}^*} \xi_0(t) = -\rho \frac{R^2}{4M_{NB}^*} \ddot{x}_g(t)$$

معادله ۴-۲

$$\frac{\ddot{\xi}_0(t)}{R} + \omega_{n_{NB}}^2 \frac{\xi_0(t)}{R} = -\rho \frac{R^2}{4M_{NB}^*} \ddot{x}_g(t)$$

معادله ۴-۳

$$\left(-\rho \frac{R^2}{4M_{NB}^*} \ddot{x}_g(t) \right)_{experimental} = \left(-\rho \frac{R^2}{4M_{NB}^*} \ddot{x}_g(t) \right)_{real\ tank}$$

معادله ۴-۴

$$\left(\frac{R^2 \ddot{x}_g(t)}{4\rho R^3 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{\varepsilon_l^3 (\varepsilon_l^2 - 1) \tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right)} - 2\rho R^3 \sum_{i=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_i^2}\right) \frac{1}{\varepsilon_i (\varepsilon_i^2 - 1)^2} \frac{1}{\tanh\left(\frac{\varepsilon_i H}{R}\right)}} \right)_{experimental} = \left(\frac{R^2 \ddot{x}_g(t)}{4\rho R^3 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{\varepsilon_l^3 (\varepsilon_l^2 - 1) \tanh\left(\frac{\varepsilon_l H}{R}\right)} - 2\rho R^3 \sum_{i=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_i^2}\right) \frac{1}{\varepsilon_i (\varepsilon_i^2 - 1)^2} \frac{1}{\tanh\left(\frac{\varepsilon_i H}{R}\right)}} \right)_{real\ tank}$$

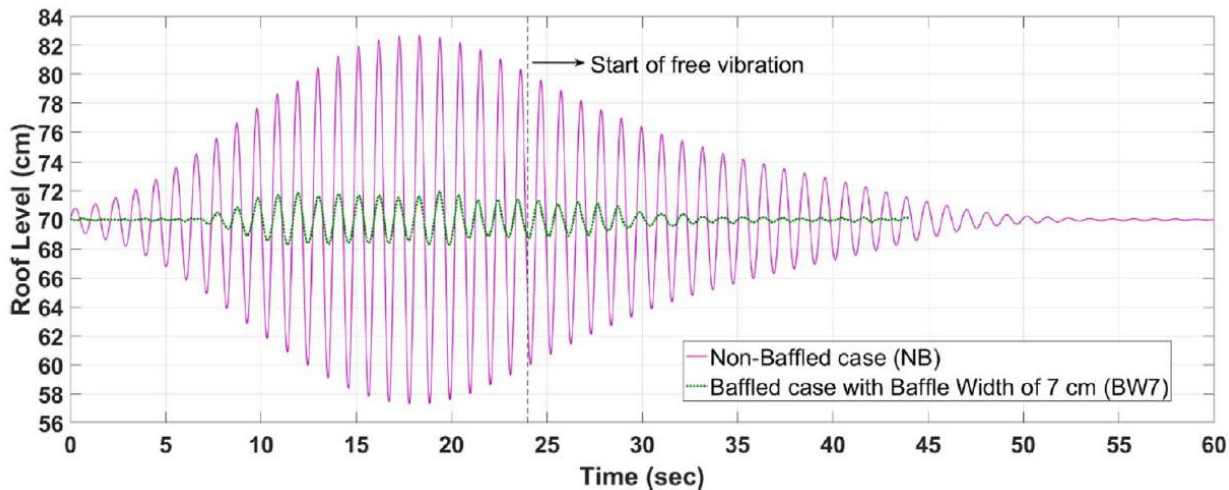
معادله ۴-۵

$$\left(\frac{\ddot{x}_g(t)}{R} \right)_{experimental} = \left(\frac{\ddot{x}_g(t)}{R} \right)_{real\ tank}$$

معادله فوق برای مثال بدان معناست که پاسخ های مدل آزمایشی مخزن همراه با سقف شناور بدون بافل، به قطر یک متر حاوی ۲۰ سانتیمتر سیال که ارتفاع ۸ سانتیمتر تلاطم (تحت اثر زلزله مقیاس شده آزمایشگاهی چپ چپ با حداکثر شتاب تقریباً ۰.۱۵ برابر شتاب ثقل با محتوی فرکانسی نزدیک به محتوی فرکانسی مخزن) را تجربه کرده است، می تواند در واقعیت برابر با ارتفاع تلاطم ۸۰ سانتیمتر در یک مخزن با سقف شناور به قطر ۱۰ متر با ارتفاع سیال ۲ متر باشد که شتاب وارد شده به آن با محتوی فرکانسی نزدیک به فرکانس مود اول تلاطم در مخزن، تحت تحریکی با شتاب بیشینه ۱.۵ برابر شتاب ثقل باشد. این مطلب در حالی است که سقف شناور و دیواره در مدل واقعی تقریباً صلب عمل نمایند.

۴-۲-۵- محاسبه میرایی ویسکوز معادل

در شکل ۴-۸ تاریخچه ارتفاع تلاطم سقف شناور در حالت بدون بافل و با بافل به عرض ۷ سانتیمتر تحت اثر تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۵ هرتز در حالت ارتفاع سیال ۷۰ سانتیمتر، نشان داده شده است. در حالت آزمایش سقف شناور تنها، پس از ۲۴ ثانیه دستور توقف میز داده شد تا بتوان با بررسی ارتعاش آزاد بوجود آمده بعد از این لحظه، درصد میرایی ویسکوز سقف شناور را بدون حضور بافل محاسبه نمود. کاهش نمایی دامنه نوسان هنگام ارتعاش آزاد، ارائه شده است. جهت بدست آوردن درصد میرایی ویسکوز در دو حالت استفاده از بافل با عرض ۷ سانتیمتر و بدون بافل، از معادله ۴-۶ استفاده شده است.



شکل ۸-۴ تاریخچه ارتفاع تلاطم سقف شناور در حالت بدون بافل و با بافل به عرض ۷ سانتیمتر تحت اثر تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۵ هرتز در حالت ارتفاع سیال ۷۰ سانتیمتر

معادله ۶-۴

$$\xi = \frac{\ln\left(\frac{v_n}{v_{n+m}}\right)}{2m\pi}$$

در معادله فوق ξ درصد میرایی، v_n دامنه ارتفاع تلاطم در لحظه اولین اوج پس از شروع ارتعاش آزاد، v_{n+m} ارتفاع دامنه تلاطم m سیکل پس از رخ دادن v_n . براساس این معادله، مقدار درصد میرایی مربوط به آزمایش نظیر در شکل ۸-۴ در دو حالت سقف شناور تنها و در حالت استفاده از بافل با عرض ۷ سانتیمتر محاسبه شده است.

درصد میرایی در حالت حضور سقف شناور بدون بافل مدور آویخته مربوط به آزمایش نظیر شکل ۸-۴:

معادله ۷-۴

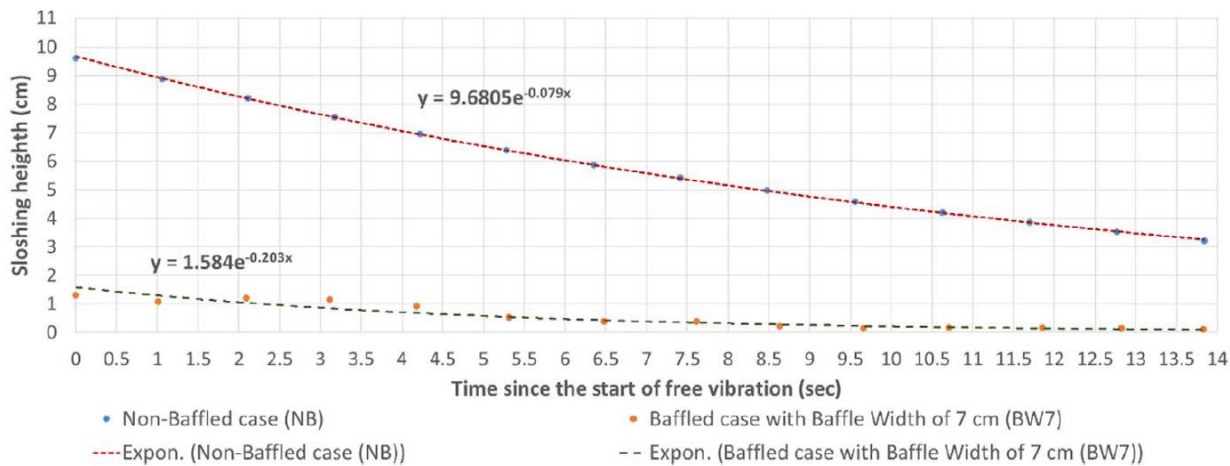
$$\xi = \frac{\ln\left(\frac{9.68}{3.24}\right)}{2 * 13 * \pi} = 0.013$$

درصد میرایی در حالت حضور سقف شناور همراه با بافل مدور آویخته به عرض ۷ سانتیمتر مربوط به آزمایش نظیر شکل

۸-۴:

معادله ۸-۴

$$\xi = \frac{\ln\left(\frac{1.584}{.096}\right)}{2 * 13 * \pi} = 0.034$$



شکل ۴-۹- تابع نمایی روند کاهش دامنه تلاطم پس از شروع ارتعاش آزاد، بدست آمده از شکل ۴-۸

با توجه به دو مقدار بدست آمده از آزمایش نظیر شکل ۴-۸ برای درصد میرایی ویسکوز، حضور سقف شناور تقریباً سبب افزایش ۲.۵ برابر، درصد میرایی نسبت به حالت ارتعاش آزاد سیال بدون سقف شناور می باشد (آیین نامه API650 درصد میرایی ارتعاش آزاد بخش کانوکتیو سیال داخل مخزن را نیم درصد ۰.۰۰۵ پیشنهاد می نماید). حضور بافل به عرض ۷ سانتیمتر نیز مجدد سبب افزایش ۲.۵ برابر درصد میرایی نسبت به حالتی که به سقف شناور بافل مدور آویخته متصل نیست، می شود.

۴-۳- نتایج تحلیلی

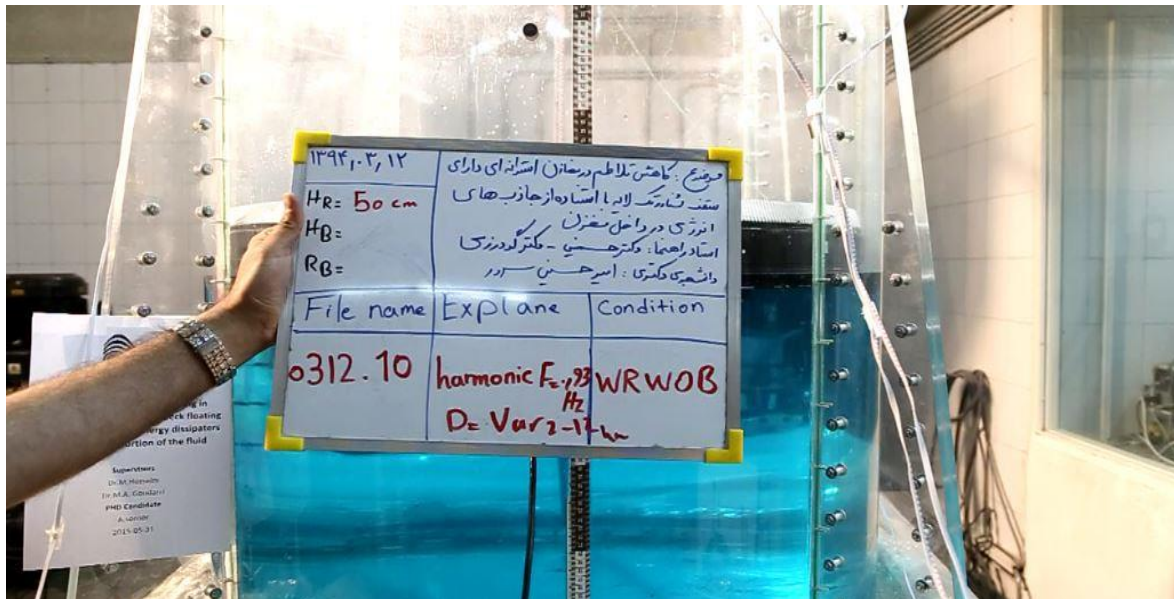
در جدول ۲-۲، جدول ۲-۳ و جدول ۲-۴ نام مدل های آزمایشگاهی و در کنار آن نام مدل تحلیلی مربوط به آن آزمایش ارائه شده اند. بر اساس مبانی تحلیلی و معادلات ارائه شده در فصل سوم ابتدا برنامه متلب^۱ برای تحلیل رفتار لرزه ای مخزن سقف شناور نوشته شده است. میرایی متناسب برای حضور سقف شناور به نحوی در این معادلات تحلیلی در نظر گرفته شد که تطابق مناسب بین نتایج معادلات تحلیلی (ارائه شده در فصل سوم) و نتایج ارائه شده در قسمت آزمایشگاهی این فصل وجود داشته باشد. پس از بدست آوردن درصد میرایی سقف شناور، معادلات با حضور بافل در دو حالت بافل ۷ سانتیمتری و ۱۱ سانتیمتری، بر اساس معادلات ارائه شده در فصل سوم، برنامه نویسی شدند.

۴-۳-۱- نتایج مطالعات تحلیلی آزمایش های لرزه ای سقف شناور، بدون حضور بافل

برنامه متلبی که جهت حل معادلات ارائه شده در فصل سوم، نوشته شده است، بدین ترتیب معادله تحلیلی تلاطم را انجام می دهد: ابتدا اطلاعات مدل فیزیکی مانند وزن سقف، چگالی سیال، قطر سقف و مخزن، شتاب ثقلی، ارتفاع سیال و درصد میرایی سقف با یک فرض اولیه وارد مدل می شوند، سپس تحریک انتخابی اعمال شده به میز که با دستگاه شتاب سنج برداشته

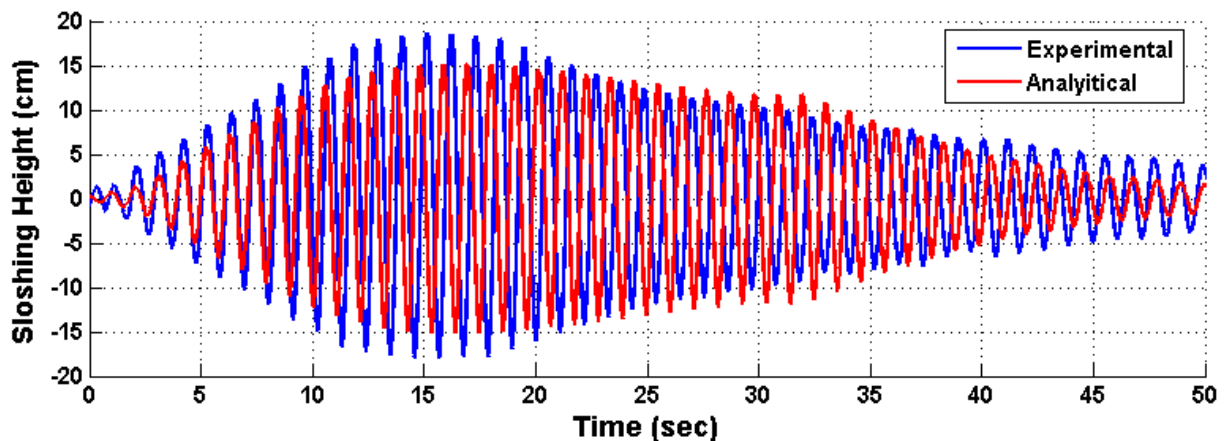
¹ MATLAB software

شده اند، شامل هارمونیک و یا لرزه ای در نرم افزار بارگذاری می شوند. در ادامه به حل تحلیلی معادله ۳-۵۴ با روش رانگ کوتا پرداخته شده و با چند بار رفت و برگشت و کنترل جواب های تحلیلی با آزمایشگاه، مقدار درصد میرایی متناسب فرض شده معادل با رفتار سقف بدست آمده است. در شکل ۴-۱۰ تاریخچه پاسخ تلاطم بر حسب زمان در دو حالت نتیجه آزمایش و حل تحلیلی جهت مقایسه بر روی یک نمودار ارائه شده اند، چنانچه مشاهده می شود تطابق خوبی از نظر دامنه، فرکانس، شروع و افت نمودار وجود دارد. این نتایج مربوط به آزمایش قرار گیری سقف شناور در ارتفاع ۵۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳. هرگز در حالت بدون بافل H50WOBHf093 می باشد، در شکل ۴-۱۰ شرایط شروع این آزمایش نشان داده شده است و در شکل ۴-۱۲ تصویر لحظه حداکثر پاسخ از نگاه دوربین شماره دو، ارائه شده است.

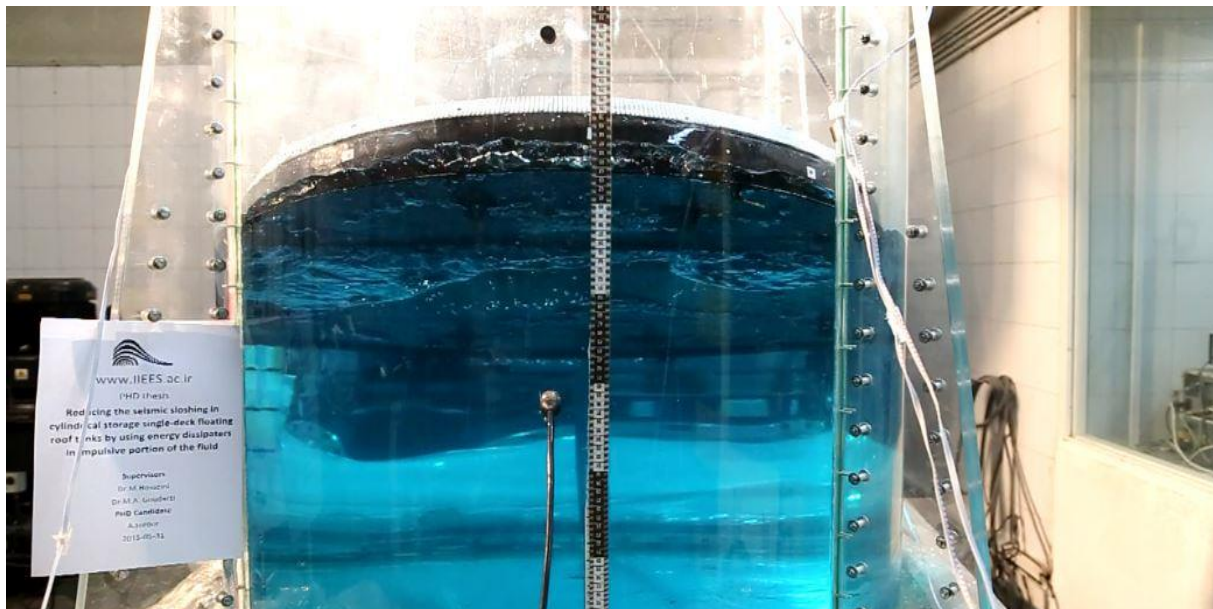


شکل ۱۰-۴ تصویر لحظه شروع آزمایش از نگاه دوربین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۵۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز در حالت بدون بافل H50WOBHf093

در شکل ۱۰-۴ تصویر لحظه شروع آزمایش از نگاه دوربین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۵۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز در حالت بدون بافل H50WOBHf093 آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۵۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز در حالت بدون بافل قبل از تحریک و در حداکثر ارتفاع تلاطم را مشاهده می کنید.



شکل ۱۱-۴ مقایسه تاریخچه پاسخ دامنه تلاطم بدست آمده از آزمایش و حل تحلیلی در آزمایش قرار گیری سقف شناور در ارتفاع ۵۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز در حالت بدون بافل H50WOBHf093



شکل ۱۲-۴ تصویر لحظه حداکثر پاسخ از نگاه دوربین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز در حالت بدون بافل H50WOBHf093

در جدول ۴-۴ نتایج آزمایشگاهی و حل معادلات تحلیلی ارائه شده در فصل سوم، مربوط به آزمایش های با سقف شناور تنها (بدون حضور بافل) و درصد تفاوت پاسخ ها با میرایی مناسب نظیر تحلیل ارائه شده است. اعداد نوشته شده به عنوان حداکثر دامنه تلاطم در حل تحلیلی با استفاده از نرم افزار متلب، قدر مطلق حداکثر ارتفاع دامنه تلاطم می باشند.

جدول ۴-۴- مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در حالت بدون بافل

H (cm)	Excitation	MSH (cm)			
		Experimental	Analytical	Relative Difference (%)	Damping Ratio (%)
70	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm	15.50	17.36	12.00	2
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm	8.50	8.64	1.65	2
	Kocaeli	12.67	12.02	-5.13	4
	Loma Prieta	16.33	19.42	18.92	4
	Chi-Chi	17.67	19.17	8.49	4
50	Harmonic F=0.93Hz, A=4 mm	15.00	15.14	0.93	2
	Harmonic F=0.93Hz, A=2 mm	9.00	8.70	-3.33	2
	Kocaeli	12.50	10.77	-13.84	4
	Loma Prieta	15.33	18.29	19.29	4
	Chi-Chi	16.00	15.71	-1.81	4
20	Harmonic F=0.76Hz, A=4 mm	11.00	11.86	7.82	2
	Harmonic F=0.76Hz, A=2 mm	6.50	6.36	-2.15	2
	Kocaeli	6.50	5.82	-10.46	4
	Loma Prieta	8.00	7.89	-1.38	4
	Chi-Chi	8.00	8.18	2.25	4

با توجه به جدول ۴-۴ می توان گفت، میرایی ناشی از سقف، که با پارامتر Damping Ratio(%) در جدول نشان داده شده است، به نوع تحریک وابسته است، به نحوی که مقدار متناسب این پارامتر در تحریک های هارمونیک ۲ درصد و در تحریک های لرزه ای ۴ درصد بدست آمده است. شایان ذکر است که به علت چرخش سقف شناور و کاملاً مستوی نبودن سقف شناور و بافل مدور آویخته اندازه گیری های چشمی انجام شده ارائه شده در جدول فوق، با حداکثر مثبت یا منفی یک سانتیمتر خطا همراه هستند که در جهت کاستن خطای مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی مقادیر اندازه گیری شده در جدول اصلاح گردیده اند. در ضمن نتایج تلاطم با دامنه تحریک ۸ میلی متر به علت افزایش درصد خطا در نمونه هایی که دامنه تلاطم زیاد می باشد، ارائه نشده اند و علت آن است که معادلات تشکیل شده، در دامنه های کم تلاطم که چرخش سقف شناور آغاز نشده است، تشکیل شده اند. البته شایان ذکر است، دامنه تلاطم در مخازن واقعی تحت تحریکات لرزه ای، به نسبت، به همین دامنه های کم هم نمی رسد. در حالت بدون بافل مدور آویخته، تحت اثر تحریکات هارمونیک میانگین قدر مطلق خطاهای روش تحلیلی تقریباً ۴.۵ درصد و تحت اثر تحریکات لرزه ای تقریباً ۹ درصد می باشد.

۴-۳-۲- نتایج مطالعات تحلیلی آزمایش های لرزه ای سقف شناور، با حضور بافل به عرض ۷ سانتیمتر

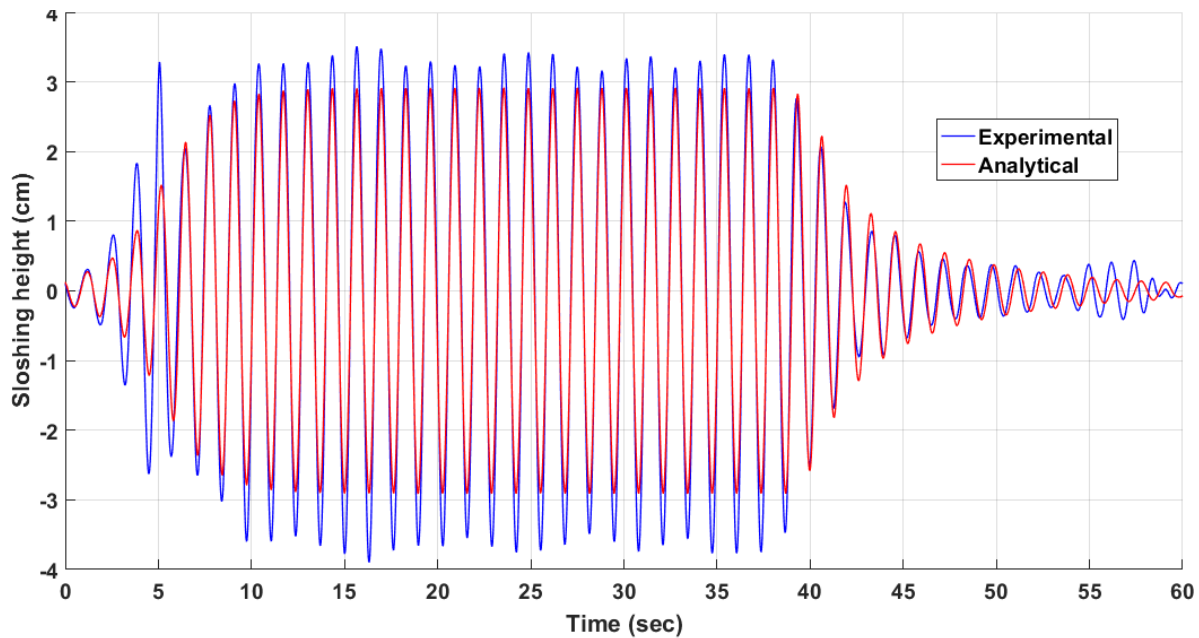
الگوریتم برنامه متلب معادله تحلیلی حاکم بر تلاطم (بر اساس معادلات ارائه شده در فصل سوم مربوط به حل معادلات با حضور بافل مدور آویخته است) به قرار ذیل می باشد:

ابتدا اطلاعات مدل فیزیکی مانند وزن سقف، چگالی سیال، قطر سقف و مخزن، شتاب ثقلی، ارتفاع سیال و درصد میرایی سقف با توجه به بررسی های انجام شده در حل معادلات بدون حضور بافل (درصد میرایی ناشی از سقف با توجه به این نتایج،

در تحریک‌های هارمونیک ۲ درصد و در تحریک‌های لرزه ای ۴ درصد، ارائه شده در قسمت ۴-۳-۱ در مدل وارد می شوند، سپس تحریک انتخابی اعمال شده به میز که با دستگاه شتاب سنج برداشته شده است، شامل تحریک‌های هارمونیک و لرزه ای در برنامه نوشته شده، بارگذاری می شوند. اطلاعاتی که در این تحلیل ها، بیش از اطلاعات ورودی برنامه مربوط حل معادلات بدون حضور بافل، وارد می شوند، شامل عرض، قطر خارجی و جرم بافل، ارتفاع قرار گیری بافل از کف مخزن، C_d ضریب میرایی ناشی از سقوط آزادانه بافل در سیال (هنگام برگشت) و C_g ضریب میرایی هندسه که هنگام بالا رفتن بافل فعال می باشد، هستند. مقادیر این دوضریب با بررسی نتایج آزمایش به صورت کلی، به نحوی که بتوانند تطابق خوبی با جواب ها داشته باشند، بدست آمده است.

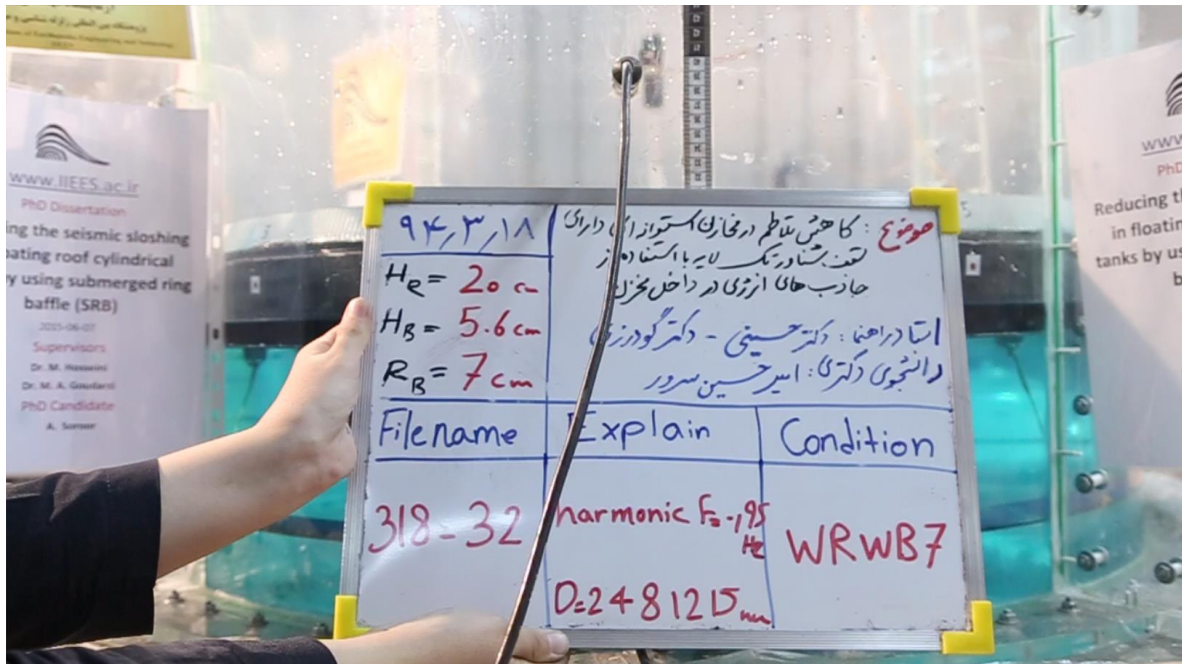
حل معادلات ابتدا با فرض وصل بودن بافل به سقف با حل معادله ۶۴-۳، با استفاده از روش رانگ کوتا، تحت تحریک اعمالی به میز آغاز می شود. هر زمان که علامت جبری سرعت عوض شود، به معنای رسیدن حرکت سقف شناور به اوج خود می باشد (از نظر برنامه نویسی، این لحظه در صورتیکه ضرب دو مقدار سرعت متوالی منفی شود، بدست می آید). در لحظاتی که حرکت سقف شناور و در پی آن بافل مدور آویخته به اوج می رسند، می توان گفت که بافل از سقف جدا می شود زیرا کابل ها تحمل فشار ندارند، بنابراین باید در این لحظات معادلات سقوط سقف شناور از یک طرف و معادله سقوط آزاد بافل مدور آویخته از طرفی دیگر، به صورت مستقل انجام شوند (معادلات سقوط آزاد بافل، در فصل سوم ارائه شده اند). این معادلات تا آن هنگام مستقل حل می شوند که فاصله بافل و سقف شناور که در برنامه نوشته همواره در حال بررسی هستند، بیش از اندازه حاصلضرب پارامتر ضریب طول نخ^۱ در طول نخ وصل کننده بافل مدور آویخته و سقف شناور شوند، در این لحظه مجدد سقف شناور به بافل متصل شده و بافل مدور آویخته بواسطه ایجاد کشش در کابل، وارد عمل می شوند و با مستهلک کردن انرژی از ازدیاد دامنه تلاطم می کاهد. این روند تبدیل شدن معادلات از حالت حرکت آزادانه سقف و حرکت سقف همراه با بافل مدور آویخته، در تمامی طول حل ادامه دارد. در شکل ۱۳-۴ تاریخچه پاسخ تلاطم بر حسب زمان حاصل از نتیجه آزمایش و مطالعات تحلیلی جهت مقایسه بر روی یک نمودار ارائه شده اند، چنانچه مشاهده می شود تطابق خوبی از نظر دامنه، فرکانس، شروع وافت نمودار وجود دارد. این نتایج مربوط به آزمایش قرار گیری سقف شناور در ارتفاع ۲۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۷۶ هرتز در حالت استفاده از بافل ۷ سانتیمتری می باشد H20WB07Hf076cd4cg8.5، در شکل ۱۴-۴ شرایط شروع این آزمایش نشان داده شده است و در شکل ۱۵-۴ تصویر لحظه حداکثر پاسخ از نگاه دوربین شماره دو مربوط این آزمایش ارائه شده است.

¹ Cable length coefficient

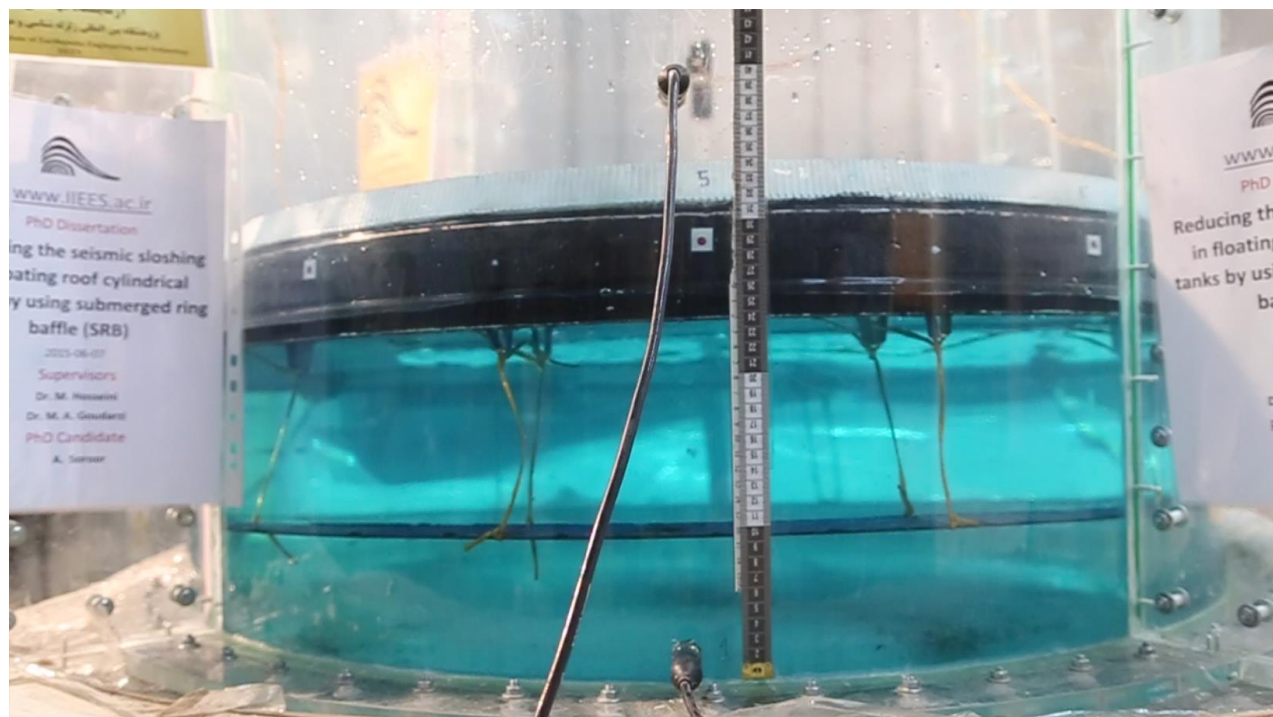


شکل ۱۳- ۴ تاریخچه دامنه تلاطم در آزمایش قرار گیری سقف شناور در ارتفاع ۲۰ سانتیمتر تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۷۶ هرتز در حالت بافل با عرض ۷ سانتی متر H20WB07Hf076cdrop4cdrag40

به ترتیب مربوط به پاسخ مخزن از نگاه دورین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۲۰ تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر با فرکانس ۰.۷۶ هرتز در حالت بافل با عرض ۷ سانتی متر قبل از تحریک و لحظه حداکثر تلاطم را مشاهده می کنید.



شکل ۱۴- ۴ تصویر پاسخ مخزن از نگاه دورین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۲۰ تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر با فرکانس ۰.۷۶ هرتز در حالت بافل با عرض ۷ سانتی متر H20WB07Hf076cdrop4cdrag40 لحظه شروع آزمایش قبل از تحریک



شکل ۱۵-۴ تصویر پاسخ مخزن از نگاه دوربین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۲۰ تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر با فرکانس ۰.۷۶ هرتز در حالت بافل با عرض ۷ سانتی متر H20WB07Hf076cdrop4cdrag40 لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم ۳.۵ سانتیمتر

در جدول ۴-۵ مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در حالت بافل با عرض ۷ سانتی متر نتایج آزمایشگاهی و حل معادلات تحلیلی ارائه شده در فصل سوم، مربوط به آزمایش‌های با سقف شناور همراه با حضور بافل به عرض ۷ سانتیمتر و درصد تفاوت پاسخ‌ها با ضرایب میرایی مناسب نظیر تحلیل ارائه شده است.

جدول ۵-۴ مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در حالت بافل با عرض ۷ سانتی متر

H (cm)	Excitation	MSH (cm)						
		Experimental	Analytical	Relative Difference (%)	Cable length coefficient	Damping Ratio (%)	CDrop	CSAB
70	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm	2.75	2.86	4.00	1.04	2	4	40
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm	2.00	1.91	-4.50	1.04	2	4	40
	Kocaeli	6.50	6.97	7.23	1.04	4	4	40
	Loma Prieta	11.67	11.89	1.89	1.04	4	4	40
	Chi-Chi	7.33	7.76	5.87	1.04	4	4	40
50	Harmonic F=0.93Hz, A=4 mm	3.00	2.85	-5.00	1.05	2	4	40
	Harmonic F=0.93Hz, A=2 mm	2.00	1.93	-3.50	1.05	2	4	40
	Kocaeli	6.00	6.85	14.17	1.05	4	4	40
	Loma Prieta	10.33	11.37	10.07	1.05	4	4	40
	Chi-Chi	7.00	7.42	6.00	1.05	4	4	40
20	Harmonic F=0.76Hz, A=4 mm	3.00	2.91	-3.00	1.06	2	4	40
	Harmonic F=0.76Hz, A=2 mm	2.00	1.95	-2.50	1.06	2	4	40
	Kocaeli	5.50	4.73	-14.00	1.06	4	4	40
	Loma Prieta	7.67	6.96	-9.26	1.06	4	4	40
	Chi-Chi	6.50	6.08	-6.46	1.06	4	4	40

در جدول ۵-۴ مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در حالت بافل با عرض ۷ سانتی متر، میرایی ناشی از سقف، که با پارامتر Damping Ratio(%) در جدول نشان داده شده است، از قسمت تحلیل های سقف شناور بدون حضور بافل مدور آویخته بدست آمده است، به نحوی که مقدار متناسب این پارامتر در تحریک های هارمونیک ۲ درصد و در تحریک های لرزه ای ۴ درصد بدست آمده است. شایان ذکر است که به علت چرخش سقف شناور و کاملاً مستوی نبودن سقف شناور و بافل مدور آویخته، اندازه گیری های چشمی انجام شده ارائه شده در جدول فوق، با حداکثر مثبت یا منفی یک سانتیمتر خطا همراه هستند که در جهت کاستن خطای مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی مقادیر اندازه گیری شده در جدول اصلاح گردیده اند. در ضمن نتایج تلاطم با دامنه تحریک ۸ میلی متر به علت افزایش درصد خطا در نمونه هایی که دامنه تلاطم زیاد می باشد، ارائه نشده اند و علت آن است که معادلات تشکیل شده، در دامنه های کم تلاطم که چرخش سقف شناور آغاز نشده است، تشکیل شده اند. البته شایان ذکر است، دامنه تلاطم در مخازن واقعی تحت تحریکات لرزه ای، به

نسبت، به همین دامنه های کم هم نمی رسد. در حالت بدون بافل مدور آویخته، تحت اثر تحریکات هارمونیک میانگین قدر مطلق خطاهای روش تحلیلی تقریباً ۴ درصد و تحت اثر تحریکات لرزه ای تقریباً ۸.۵ درصد می باشد.

۳-۳-۴- نتایج مطالعات تحلیلی آزمایش های لرزه ای سقف شناور، با حضور بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر

الگوریتم برنامه متلب معادله تحلیلی حاکم بر تلاطم (بر اساس معادلات ارائه شده در فصل سوم مربوطه به حل معادلات با حضور بافل مدور آویخته است) به قرار ذیل می باشد:

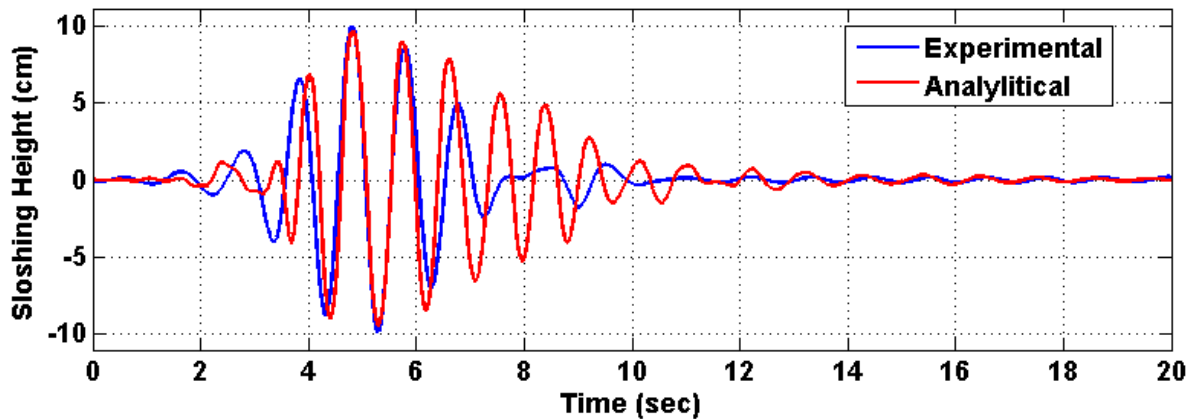
ابتدا اطلاعات مدل فیزیکی مانند وزن سقف، چگالی سیال، قطر سقف و مخزن، شتاب ثقلی، ارتفاع سیال و درصد میرایی سقف با توجه به بررسی های انجام شده در حل معادلات بدون حضور بافل (درصد میرایی ناشی از سقف با توجه به این نتایج، در تحریک های هارمونیک ۲ درصد و در تحریک های لرزه ای ۴ درصد، ارائه شده در قسمت ۴-۳-۱) در مدل وارد می شوند، سپس تحریک انتخابی اعمال شده به میز که با دستگاه شتاب سنج برداشته شده اند، شامل تحریک های هارمونیک و لرزه ای در برنامه نوشته شده، بارگذاری می شوند. اطلاعاتی که در این تحلیل ها، بیش از اطلاعات ورودی برنامه حل معادلات بدون حضور بافل، وارد می شوند، شامل عرض، قطر خارجی و جرم بافل مدور آویخته، ارتفاع قرار گیری بافل از کف مخزن، C_d ضریب میرایی ناشی از سقوط آزادانه بافل در سیال (هنگام برگشت) و C_g ضریب میرایی هندسه که هنگام بالا رفتن بافل فعال می باشد، هستند. مقادیر این دوضریب با بررسی نتایج آزمایش به صورت کلی، به نحوی که بتوانند تطابق خوبی با جواب ها داشته باشند، بدست آمده است.

حل معادلات ابتدا با فرض وصل بودن بافل به سقف با حل معادله ۶۴-۳، با استفاده از روش رانگ کوتا، تحت تحریک اعمالی به میز آغاز می شود. هر زمان که جهت سرعت عوض شود، به معنای رسیدن حرکت سقف شناور به اوج خود می باشد (از نظر برنامه نویسی این لحظه در صورتیکه ضرب دو سرعت متوالی منفی شود، بدست می آید). در لحظاتی که حرکت سقف شناور و در پی آن بافل به اوج می رسند، می توان گفت که بافل از سقف جدا می شود زیرا کابل ها تحمل فشار ندارند، بنابراین باید در این لحظات معادلات سقوط سقف شناور از یک طرف و معادله سقوط آزاد بافل از طرفی دیگر، به صورت مستقل انجام شوند (معادلات سقوط آزاد بافل، در فصل سوم ارائه شده اند). این معادلات تا آن هنگام مستقل حل می شوند که فاصله بافل و سقف شناور که در برنامه نوشته همواره در حال بررسی هستند، بیش از اندازه حاصلضرب پارامتر ضریب طول نخ^۱ در طول نخ وصل کننده بافل و سقف شناور شوند، در این لحظه مجدد سقف شناور به بافل مدور آویخته متصل شده و بافل مدور آویخته بواسطه ایجاد کشش در کابل، وارد عمل می شود و با مستهلک کردن انرژی از ازدیاد دامنه تلاطم می کاهد. این روند تبدیل شدن معادلات، از حالت حرکت آزادانه سقف و حرکت سقف همراه با بافل مدور آویخته، در تمامی طول حل ادامه دارد.

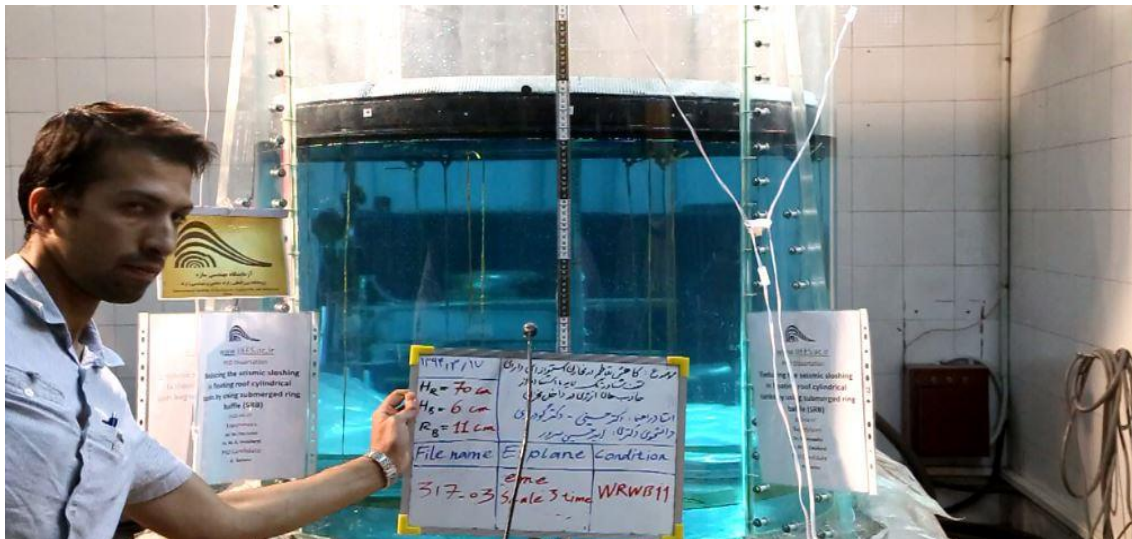
در شکل ۱۳-۴ و شکل ۱۶-۴ تاریخچه پاسخ تلاطم بر حسب زمان حاصل از نتیجه آزمایش و مطالعات تحلیلی، جهت مقایسه بر روی یک نمودار ارائه شده اند. چنانچه مشاهده می شود تطابق خوبی از نظر دامنه، فرکانس، شروع و افت نمودار

¹ Cable length coefficient

وجود دارد. این نتایج مربوط به آزمایش قرار گیری سقف شناور در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر تحت تحریک زلزله لوما در حالت استفاده از بافل ۱۱ سانتیمتری می باشند (آزمایش H70WB11Lomacdrop5cg12.7). در شکل ۱۷-۴ شرایط شروع این آزمایش نشان داده شده است و در شکل ۱۸-۴ تصویر لحظه حداکثر پاسخ از نگاه دوربین شماره دو مربوط این آزمایش ارائه شده است.

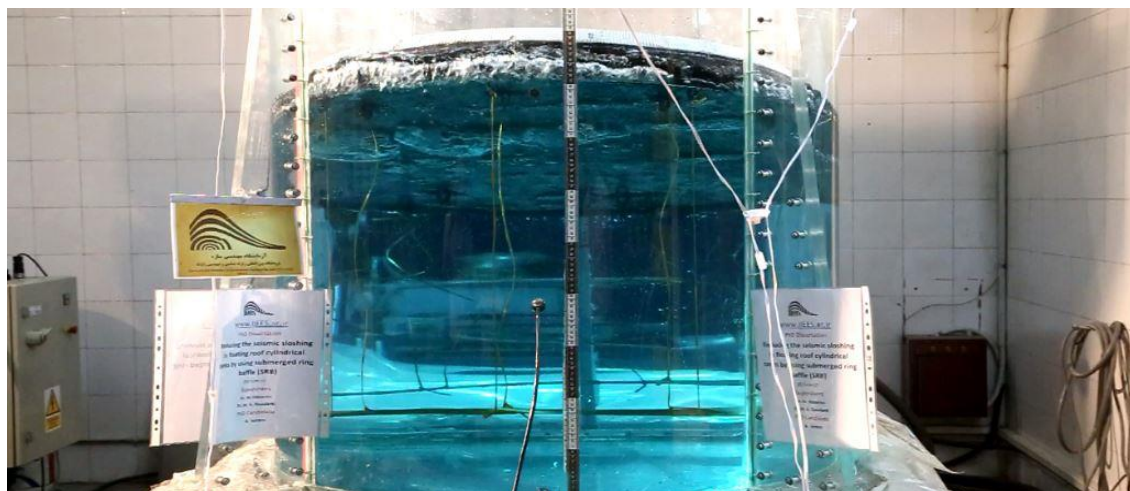


شکل ۱۶-۴ تاریخچه دامنه تلاطم در آزمایش قرار گیری سقف شناور در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر تحت تحریک زلزله لوما در حالت بافل با عرض ۱۱ سانتی متر H70WB11Lomacdrop5cdrag75



شکل ۱۷-۴ تصویر پاسخ مخزن از نگاه دوربین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۷۰ تحت تحریک لرزه ای لوما، در حالت بافل با عرض ۱۱ سانتی متر H70WB11Lomacdrop5cdrag75 لحظه شروع آزمایش قبل از تحریک

در شکل ۱۷-۴ و شکل ۱۸-۴ تصویر پاسخ مخزن از نگاه دوربین شماره دو که مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۷۰ تحت تحریک لرزه ای لوما، در حالت بافل با عرض ۱۱ سانتیمتر در لحظه قبل از تحریک و حداکثر دامنه تلاطم را مشاهده می کنید.



شکل ۱۸-۴ تصویر پاسخ مخزن از نگاه دوربین شماره دو مربوط به آزمایش مخزن حاوی سیال تا ارتفاع ۷۰ تحت تحریک لرزه ای لوما در حالت بافل با عرض ۱۱ سانتی متر H70WB11Lomacdrop5cdrag75، لحظه حداکثر ارتفاع تلاطم ۱۰۰ سانتیمتر

در جدول ۶-۴ نتایج آزمایشگاهی و حل معادلات تحلیلی ارائه شده در فصل سوم، مربوط به آزمایش های با سقف شناور همراه با حضور بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر و درصد تفاوت پاسخ ها با ضرایب میرایی مناسب نظیر تحلیل، ارائه شده است.

جدول ۶-۴ مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در حالت بافل با عرض ۱۱ سانتی متر

H (cm)	Excitation	MSH (cm)						
		Experimental	Analytical	Different Percent (%)	Cable length coefficient	Damping Ratio (%)	CDrop	CSAB
70	Harmonic F=0.95Hz, A=4 mm	2.25	2.12	-5.78	1.04	2	5	75
	Harmonic F=0.95Hz, A=2 mm	1.25	1.33	6.40	1.04	2	5	75
	Kocaeli	5.00	5.67	13.40	1.04	4	5	75
	Loma Prieta	10.50	9.85	-6.19	1.04	4	5	75
	Chi-Chi	6.67	6.60	-1.05	1.04	4	5	75
50	Harmonic F=0.93Hz, A=4 mm	2.00	1.97	-1.50	1.05	2	5	75
	Harmonic F=0.93Hz, A=2 mm	1.25	1.33	6.40	1.05	2	5	75
	Kocaeli	5.00	5.58	11.60	1.05	4	5	75
	Loma Prieta	10.17	9.48	-6.78	1.05	4	5	75
	Chi-Chi	6.00	6.39	6.50	1.05	4	5	75
20	Harmonic F=0.76Hz, A=4 mm	2.25	2.22	-1.33	1.06	2	5	75
	Harmonic F=0.76Hz, A=2 mm	1.63	1.50	-7.98	1.06	2	5	75
	Kocaeli	4.75	3.88	-18.32	1.06	4	5	75
	Loma Prieta	6.42	6.54	1.87	1.06	4	5	75
	Chi-Chi	5.67	5.63	-0.71	1.06	4	5	75

در جدول ۶-۴ میرایی ناشی از سقف، که با پارامتر Damping Ratio(%) در جدول نشان داده شده است، از قسمت تحلیل های سقف شناور بدون حضور بافل بدست آمده است، به نحوی که مقدار متناسب این پارامتر در تحریک های هارمونیک ۲ درصد و در تحریک های لرزه ای ۴ درصد بدست آمده است. شایان ذکر است که به علت چرخش سقف شناور و کاملاً مستوی نبودن سقف شناور و بافل مدور آویخته، اندازه گیری های چشمی انجام شده ارائه شده در جدول فوق، با حداکثر مثبت یا منفی یک سانتیمتر خطا همراه هستند که در جهت کاستن خطای مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی، مقادیر اندازه گیری شده در جدول اصلاح گردیده اند. در ضمن نتایج تلاطم با دامنه تحریک ۸ میلی متر به علت افزایش درصد خطا

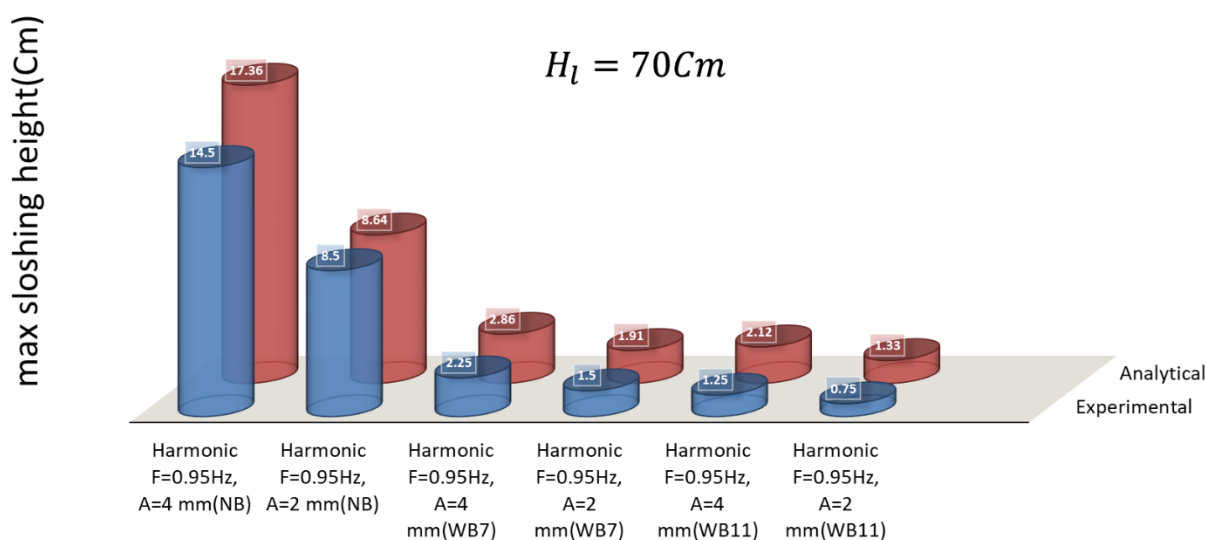
در نمونه هایی که دامنه تلاطم زیاد می باشد، ارائه نشده اند و علت آن است که معادلات تشکیل شده، در دامنه های کم تلاطم که چرخش سقف شناور آغاز نشده است، تشکیل شده اند. البته شایان ذکر است، دامنه تلاطم در مخازن واقعی تحت تحریکات لرزه ای، به نسبت، به همین دامنه های کم هم نمی رسد. در حالت بدون بافل مدور آویخته، تحت اثر تحریکات هارمونیک میانگین قدر مطلق خطاهای روش تحلیلی تقریباً ۵ درصد و تحت اثر تحریکات لرزه ای تقریباً ۷.۵ درصد می باشد.

۴-۳-۴- مقایسه نموداری نتایج حاصل از آزمایش‌ها و مطالعات تحلیلی

جهت درک سریعتر و بهتر اعداد ارائه شده در جدول ۲-۲، جدول ۲-۳ و جدول ۲-۴ در این قسمت، در دو بخش هارمونیک و لرزه ای، نتایج این جداول به صورت نموداری ارائه شده اند.

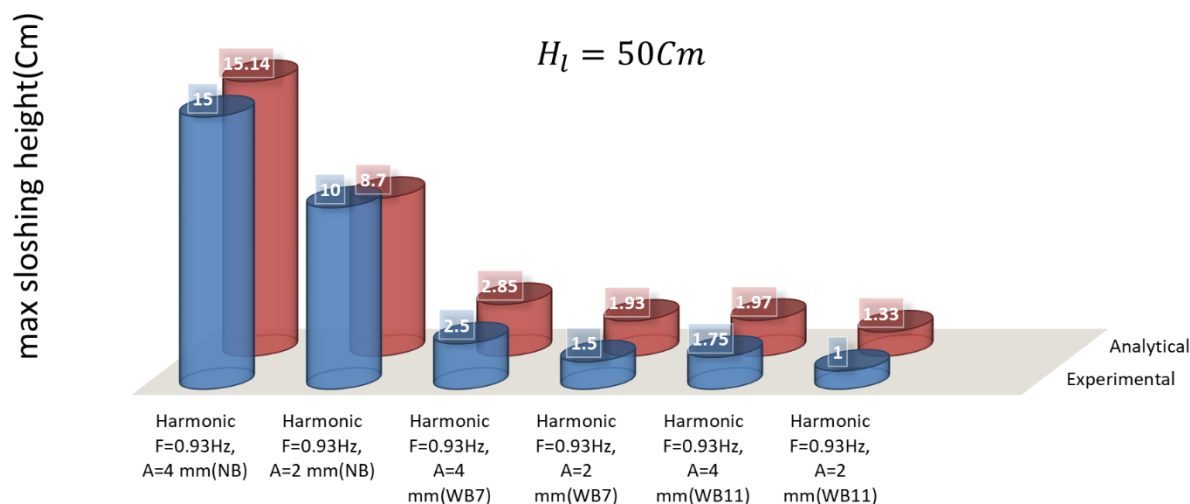
۴-۳-۴-۱ در حالت هارمونیک

در شکل ۴-۱۹، شکل ۴-۲۰ و شکل ۴-۲۱ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مطالعات تحلیلی مربوط به مخزن حاوی سیال به ترتیب به ارتفاع ۲۰، ۵۰ و ۷۰ سانتیمتر تحت تحریک های هارمونیک با فرکانس تشدید و دامنه های ۲ و ۴ میلی متر ارائه شده اند.



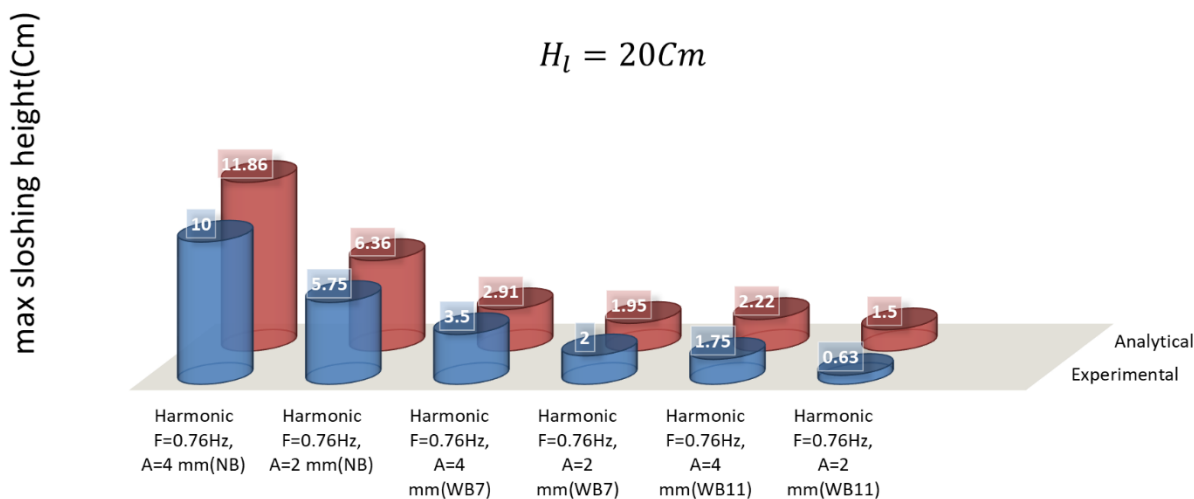
شکل ۴-۱۹ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در حالت هارمونیک بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در ارتفاع ۷۰ سانتی متر

در شکل ۴-۱۹ تفاوت بین پاسخ های تحلیلی و آزمایشگاهی در آزمایشی که ارتفاع سقف شناور ۷۰ سانتیمتر می باشد، از چپ به راست، مربوط به حالت های بدون بافل، استفاده از بافل ۷ سانتیمتری و استفاده از بافل ۱۱ سانتیمتری، تحت دو حالت تحریک هارمونیک با دامنه های ۲ و ۴ میلی متر با فرکانس تشدید ۰.۹۵ هرتز، نشان داده شده است.



شکل ۲۰-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در حالت هارمونیک بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در ارتفاع ۵۰ سانتی متر

در شکل ۲۰-۴ تفاوت بین پاسخ های تحلیلی و آزمایشگاهی در آزمایشی که ارتفاع سقف شناور ۵۰ سانتی متر می باشد، از چپ به راست، مربوط به حالت های بدون بافل، استفاده از بافل ۷ سانتیمتری و استفاده از بافل ۱۱ سانتیمتری، تحت دو حالت تحریک هارمونیک با دامنه های ۲ و ۴ میلی متر با فرکانس تشدید ۰.۹۳ هرتز، نشان داده شده است.

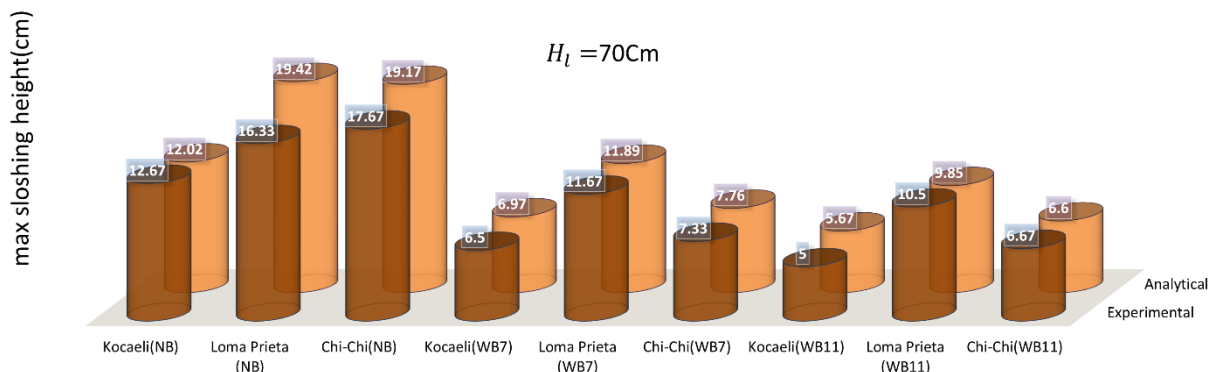


شکل ۲۱-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در حالت هارمونیک بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در ارتفاع ۲۰ سانتی متر

در شکل ۲۱-۴ تفاوت بین پاسخ های تحلیلی و آزمایشگاهی در آزمایشی که ارتفاع سقف شناور ۲۰ سانتی متر می باشد، از چپ به راست، مربوط به حالت های بدون بافل، استفاده از بافل ۷ سانتیمتری و استفاده از بافل ۱۱ سانتیمتری، تحت دو حالت تحریک هارمونیک با دامنه های ۲ و ۴ میلی متر با فرکانس تشدید ۰.۷۶ هرتز، نشان داده شده است.

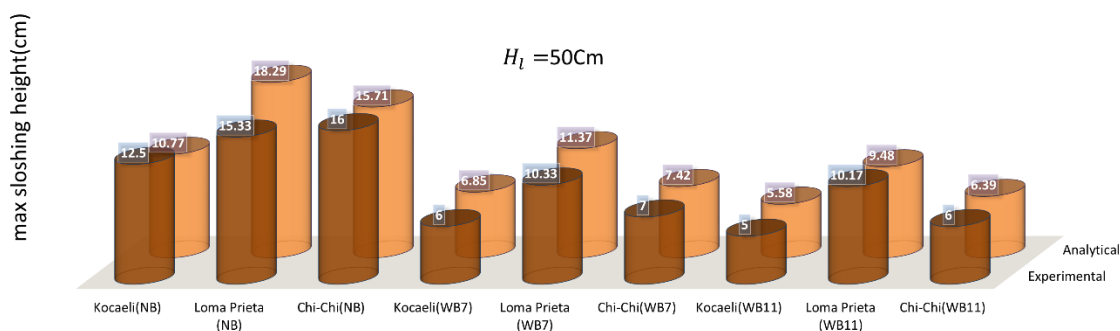
۴-۳-۴-۲ در حالت لرزه ای

در شکل ۴-۲۲، شکل ۴-۲۳ و شکل ۴-۲۴ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مطالعات تحلیلی مربوط به مخزن حاوی سیال به ترتیب به ارتفاع ۲۰، ۵۰ و ۷۰ سانتیمتر تحت سه تحریک لرزه ای با نام های: چی چی^۱، لوما پریتا^۲ و کوجاییلی^۳ ارائه شده است.



شکل ۴-۲۲ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در حالت لرزه ای بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در ارتفاع ۷۰ سانتی متر

در شکل ۴-۲۲ تفاوت بین پاسخ های تحلیلی و آزمایشگاهی در آزمایشی که ارتفاع سقف شناور ۷۰ سانتیمتر می باشد، از چپ به راست، مربوط به حالت های بدون بافل، استفاده از بافل ۷ سانتیمتری و استفاده از بافل ۱۱ سانتیمتری، تحت سه تحریک لرزه ای مذکور، نشان داده شده است.



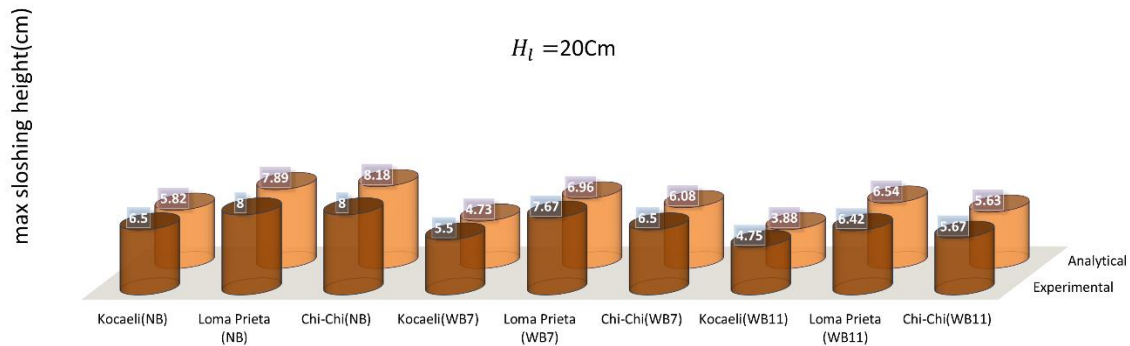
شکل ۴-۲۳ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در حالت لرزه ای بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در ارتفاع ۵۰ سانتی متر

¹ Chi-Chi

² Loma Prieta

³ Kocaeli

در شکل ۲۳-۴ تفاوت بین پاسخ های تحلیلی و آزمایشگاهی در آزمایشی که ارتفاع سقف شناور ۵۰ سانتیمتر می باشد، از چپ به راست، مربوط به حالت های بدون بافل، استفاده از بافل ۷ سانتیمتری و استفاده از بافل ۱۱ سانتیمتری، تحت سه تحریک لرزه ای مذکور، نشان داده شده است.



شکل ۲۴-۴ نمودار مقایسه حداکثر ارتفاع تلاطم در حالت لرزه ای بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در ارتفاع ۲۰ سانتی متر

در شکل ۲۴-۴ تفاوت بین پاسخ های تحلیلی و آزمایشگاهی در آزمایشی که ارتفاع سقف شناور ۲۰ سانتیمتر می باشد، از چپ به راست، مربوط به حالت های بدون بافل، استفاده از بافل ۷ سانتیمتری و استفاده از بافل ۱۱ سانتیمتری، تحت سه تحریک لرزه ای مذکور، نشان داده شده است.

۴-۳-۵- بررسی حضور بافل مدور آویخته در بخش ضربه ای

در جدول ۷-۴ درصد بخش ضربه ای و متلاطم با توجه به ارتفاع محتویات مخزن در سه نمونه ارتفاع سیال که مخزن مورد آزمایش قرار گرفت، ارائه شده است. با توجه به آنکه فاصله بافل مدور آویخته از کف مخزن ۶ سانتیمتر می باشد و نتایج ارائه شده در قسمت ارائه نتایج آزمایشگاهی همین فصل، می توان مشاهده نمود که حتی در مواردی که بافل مدور آویخته در بخش ضربه ای سیال حضور نداشته باشد، ایده ارائه شده، کارایی دارد.

جدول ۷-۴ بررسی حضور بافل مدور آویخته در بخش ضربه ای سیال

حضور بافل در بخش ضربه ای	فاصله بافل از کف مخزن، سانتیمتر	ارتفاع بخش ضربه - ای، سانتیمتر	درصد ارتفاع بخش متلاطم	درصد ارتفاع بخش ضربه ای	ارتفاع سیال در مخزن، سانتیمتر
خیر	6	4.6	77	23	20
بله	6	27.5	45	55	50
بله	6	48.3	31	69	70

فصل ۵- جمع بندی

در این رساله یک روش نوین جهت کاهش ارتفاع تلاطم در مخازن دارای سقف شناور، با استفاد از متصل نمودن بافل مدور آویخته^۱ به سقف شناور، ارائه شده است. نتایج حاکی از توانایی این ایده جهت کاهش قابل توجه دامنه تلاطم در مخازن استوانه ای با سقف شناور، هنگام زلزله است. آزمایش‌ها با سه مقدار متفاوت ۲۰، ۵۰ و ۷۰ سانتیمتر برای ارتفاع مایع داخل مخزن و در سه حالت بدون بافل، با استفاده از بافل مدور آویخته با پهنای ۷ سانتیمتر و با استفاده از بافل مدور آویخته با پهنای ۱۱ سانتیمتر تحت تحریکات هارمونیک و لرزه ای صورت گرفت. سپس بر اساس تابع پتانسیل سرعت و معادلات لاگرانژ روابط تحلیلی مربوط به حرکت سقف شناور در دو حالت با و بدون بافل توسعه داده شد و با تهیه یک برنامه در محیط نرم افزار متلب نتایج روابط تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. در ادامه نتایج بدست آمده از این پژوهش در دو بخش آزمایشی و تحلیلی ارائه می گردد. قبل از ارائه نتایج نهایی مطالعات، ذکر چند نکته که از نظرات داوران محترم رساله در جلسه دفاع نهایی با رتبه عالی دریافت شد، ضروری می باشد: (آقایان دکتر منصور ضیایی فر از پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، دکتر رحیم زاده از دانشگاه صنعتی شریف، دکتر حمزه شکیب از دانشگاه تربیت مدرس، دکتر بسطامی از پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله)

- در این رساله ایده ای نوین جهت کاهش تلاطم در مخازن سقف شناور هنگام زلزله ارائه شده است، تحلیل ابعادی آزمایش مقیاس شده، با توجه به محدودیت های فیزیکی به صورت کامل امکان پذیر نبوده، بیشتر به صورت هندسی مقیاس انجام شده است و همانند اکثر تحقیقات به روز دنیا، باید به صورت مقیاس یک به یک^۲ آزمایش صورت گیرد تا بتوان کارایی سیستم را با تمام زوایا بررسی نمود. در مدل آزمایشگاهی نتایج نشان می دهند که ایده کارایی خوبی را می تواند در صنعت جهت کاهش تلاطم داشته باشد.
- سقف شناور، بافل مدور آویخته و مخزن در مطالعات صلب در نظر گرفته شده بودند، که تامین این صلیت در مدل تمام مقیاس باید بررسی شود.
- در مورد آزمایش تمام مقیاس باید به تحریک مخزن با زلزله های با زمان تناوب بالا دقت ویژه نمود.

۵-۱- نتایج مطالعات آزمایشگاهی

بر اساس بخش آزمایشگاهی مطالعه می توان نتایج زیر را استخراج نمود:

- حضور بافل مدور آویخته در بخش ضربه ای سیال، جهت کاهش پاسخ لرزه ای سقف بسیار موثر می باشد. میانگین پاسخ های ارتفاع ۵۰ و ۷۰ سانتیمتر مایع درون مخزن حاکی از ۸۵ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت تحریکات هارمونیک و ۵۰ درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت اثر تحریکات لرزه ای می باشد.

¹ Suspended Annular Baffle (SAB)

² Full Scale

- حضور بافل مدور آویخته در قسمت تحتانی بخش تلاطمی سیال نیز می‌تواند در کاهش حداکثر دامنه تلاطم مفید باشد. در پاسخ‌های آزمایش با ارتفاع ۲۰ سانتیمتر برای مایع درون مخزن، میانگین کاهش پاسخ تحت اثر تحریکات هارمونیک ۷۰ درصد و تحت اثر تحریکات لرزه ای ۲۰ درصد می‌باشد.
- در آزمایشهای تحت اثر تحریکات هارمونیک مشاهده شد که با افزایش دامنه تحریک، اثرات کاهشی سقف شناور با بافل مدور آویخته، اندکی کاهش می‌یابد.
- حضور بافل مدور آویخته، تاثیر قابل توجهی در تغییر زمان تناوب مود اول حرکت سقف شناور ندارد.
- حضور سقف شناور سبب افزایش میرایی بخش تلاطمی سیال در حدود دو برابر می‌شود.
- با حضور بافل مدور آویخته، میرایی بخش تلاطمی سیال به صورت قابل ملاحظه ای افزایش می‌یابد.
- درصد کاهش حداکثر دامنه تلاطم تحت تحریکات لرزه ای، تابع ویژگی های تحریک لرزه ای اعمالی است.
- در مخازن لاغر که نسبت ارتفاع به قطر آن بیشتر می‌باشد، استفاده از بافل مدور آویخته تاثیر بهتر در کاهش حداکثر دامنه تلاطم دارد، زیرا بخش ثابت این مخازن دارای ارتفاع بیشتری می‌باشد.
- با افزایش عرض بافل مدور آویخته از ۷ به ۱۱ سانتیمتر تحت تحریکات هارمونیک، میزان کاهش پاسخ به صورت میانگین، از ۷۵ به ۸۶ درصد و تحت تحریکات لرزه ای از ۳۵ به ۴۳ درصد رسید.
- استفاده از بافل مدور آویخته، چرخش آزادانه سقف^۱ را نیز به صورت قابل ملاحظه ای کاهش می‌دهد.
- با توجه به نتایج آزمایش‌ها میتوان گفت که اثر مثبت استفاده از بافل مدور آویخته تنها به مخازن استوانه ای با سقف شناور محدود نمی‌شود، در واقع در تمام مواردی که تلاطم دارای اثرات منفی می‌باشد، مانند مخازن مرتفع یا مخازن سرباز، استفاده از یک المان شناور روی سطح و دوختن آن به بافل مدور آویخته، می‌تواند اثرات مفیدی در کاهش دامنه تلاطم داشته باشد.

۲-۵- نتایج مطالعات تحلیلی

بر اساس مطالعات بخش تحلیلی، نتایج زیر قابل ذکر می‌باشند:

- در حالت بدون بافل مدور آویخته، تحت اثر تحریکات هارمونیک میانگین قدر مطلق خطای روش تحلیلی تقریباً ۴.۵ درصد و تحت اثر تحریکات لرزه ای تقریباً ۹ درصد می‌باشد.
- در حالت با بافل مدور آویخته ۷ سانتی، تحت اثر تحریکات هارمونیک میانگین قدر مطلق خطای روش تحلیلی تقریباً ۴ درصد و تحت اثر تحریکات لرزه ای تقریباً ۸.۵ درصد می‌باشد.
- در حالت با بافل مدور آویخته ۱۱ سانتی، تحت اثر تحریکات هارمونیک میانگین قدر مطلق خطای روش تحلیلی تقریباً ۵ درصد و تحت اثر تحریکات لرزه ای تقریباً ۷.۵ درصد می‌باشد.

¹ Swirling

- در حالات بدون بافل میزان میرایی ویسکوز معادل برای سیستم سیال و سقف در دو حالت هارمونیک و لرزه ای به ترتیب ۲ و ۴ درصد بوده است. علت بالابودن این پارامتر در حالت لرزه ای، دامنه بزرگتر حرکت و نتیجه آن تماس بیشتر سقف با دیواره و افزایش تاثیر اصطکاک ناشی از آن می باشد.
- میرایی ناشی از مقاومت سیال در حالت سقوط آزاد بافل C_{Drop} با افزایش عرض بافل مدور آویخته از ۷ به ۱۱ سانتیمتر (حدود ۵۷ درصد افزایش) حدود ۲۵ درصد افزایش می یابد، در حالیکه این میرایی C_{Drag} در حرکت به سمت بالای بافل حدود ۸۷ درصد افزایش می یابد.
- افزایش عرض بافل از ۷ به ۱۱ سانتیمتر (حدود ۵۷ درصد افزایش) به صورت میانگین در تمامی حالات تحریکات هارمونیک و لرزه ای، باعث کاهش حدود ۲۰ درصد در دامنه بیشینه تلاطم می گردد.

۵-۳- پیشنهادات

در راستای تکمیل فعالیت های انجام شده در این پژوهش، اقدامات زیر پیشنهاد می شوند:

- بررسی اثر انعطاف پذیری بافل مدور آویخته و سقف شناور
- بررسی تاثیر افزایش جرم بافل در رفتار تلاطمی سقف (تا جایی که در شناوری سقف خللی وارد نشود)
- بررسی هندسه بافل (هندسه لبه ، وجود سوارخ در سطح بافل،...)
- بررسی اثر انعطاف پذیری کابل های واسطه سقف شناور و بافل مدور آویخته

فهرست منابع

۱. Kuan, S.Y., *Design, construction and operation of the floating roof tank*. 2009.
۲. API 650, S., *Welded tanks for oil storage*, in *American Petroleum Institute*. 2016.
۳. ح. زینلی, ساخت مخازن سقف شناور. and سلطان‌ی, م.
۴. Persson, H. and A. Lonnermark, *Tank fires: Review of fire incidents 1951-2003: BRANDFORSK Project 513-021*. 2004: SP Sveriges Provnings-och Forskningsinstitut.
۵. *LASTFIRE - Large Atmospheric Storage Tank Fires*", *Resource Protection International*. 1997.
۶. Loss Control Associates, I., *Prevention and Suppression of fires in Large Aboveground Storage Tanks*. 1995.
۷. Girgin, S., *The natech events during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake: aftermath and lessons learned*. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2011. **11**(4): p. 1129-1140.
۸. Cooper, T., *A Study of the Performance of Petroleum Storage Tanks during Earthquakes, 1933–1995*, *NIST No. GCR 97-720*. US Dept. of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 1997.
۹. Nishi, H., et al., *Experimental study on the sloshing behavior of the floating roof using a real tank*. *压力技術*, 2008. **46**(1): p. 4-17.
۱۰. Yamauchi, Y., et al. *Seismic design of floating roof of oil storage tanks under liquid sloshing*. in *ASME 2006 Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11 Conference*. 2006. American Society of Mechanical Engineers.
۱۱. Sezen, H., et al., *Structural Engineering Reconnaissance of the August 17, 1999 Earthquake: Kocaeli (Izmit), Turkey*. 2000.
۱۲. Hatayama, K. *Sloshing Damage to Oil Storage Tanks due to Long-Period Strong Ground Motions during the 2011 Tohoku, Japan Earthquake*. in *10th International Workshop on Seismic Microzoning and Risk Reduction*. 2013. at Sokairo Hall, GRIPS, Tokyo, Japan.: IISEE.
۱۳. Hatayama, K., *Lessons from the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake for prediction of long-period strong ground motions and sloshing damage to oil storage tanks*. *Journal of seismology*, 2008. **12**(2): p. 255-263.
۱۴. Cacciatore, P.J., B.F. Hantz, and L.M. Gustafsson. *Evaluation of storage tank floating roofs for stress and stability due to earthquake induced liquid sloshing*. in *ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference*. 2007. American Society of Mechanical Engineers.
۱۵. Utsumi, M. and K. Ishida, *Vibration analysis of a floating roof taking into account the nonlinearity of sloshing*. *Journal of Applied Mechanics*, 2008. **75**(4): p. 041008.
۱۶. Steinberg, L.J., et al. *Risk management practices at industrial facilities during the Turkey earthquake of August 17, 1999: case study report*. in *First Annual IIASA-DPRI meeting Proceedings, Laxenburg ,Austria*. 2001.
۱۷. Gayle Johnson, H.-P.A., Oakland, CA, *Refinery Damage and Emergency Response in the 1999 Izmit, Turkey Earthquake*. 1999.
۱۸. Yazici, G. and F. Cili, *EVALUATION OF THE LIQUID STORAGE TANK FAILURES IN THE 1999 KOCAELI EARTHQUAKE* 2008.
۱۹. Koketsu, K., et al., *Damaging long-period ground motions from the 2003 Mw 8.3 Tokachi-oki, Japan earthquake*. *Seismological Research Letters*, 2005. **76**(1): p. 67-73.

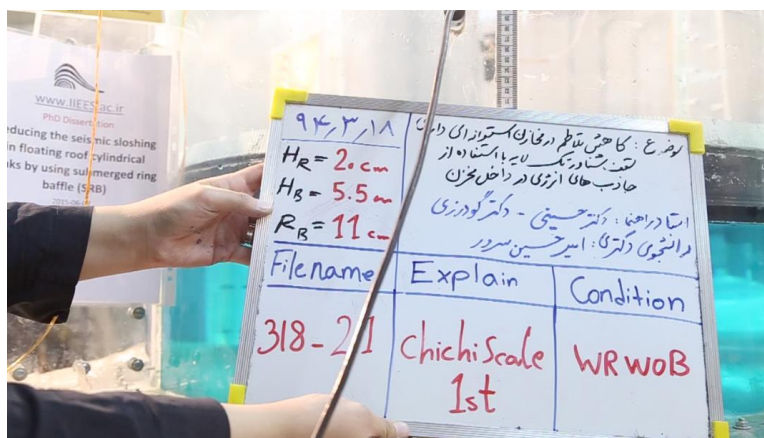
- .۲۰ Yumoto, G., *Vibrations of Fluid and Floating Roof of a Tank during an Earthquake and Its Prevention Equipment*. Journal of Japan Society for Safety Engineering, 1968. 7.(۳)
- .۲۱ Matsui, T., *SLOSHING AND DYNAMIC INTERACTION BETWEEN LIQUID AND FLOATING ROOF IN A STORAGE TANK UNDER SEISMIC EXCITATION*. 2005-2007, Meijo University.
- .۲۲ Sakai, F. and R. Inoue. *Proposals of an earthquake-resistant floating-roof and an isolation system for larg-sized oil tanks*. in *Proc. Mini-symp on earthquake-resistance, vibration control and isolation against sloshing of large-sized tank*, JSCE. 2005. Tokyo.
- .۲۳ Sakai, F. and R. Inoue, *SOME CONSIDERATIONS ON SEISMIC DESIGN AND CONTROLS OF SLOSHING IN FLOATING-ROOFED OIL TANKS*. 2008.
- .۲۴ De Angelis, M., R. Giannini, and F. Paolacci, *Experimental investigation on the seismic response of a steel liquid storage tank equipped with floating roof by shaking table tests*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010. **39**(4): p. 377-396.
- .۲۵ Jafarieh, F., *A Technique for Upgrading the Seismic Performance of Floating Roof Tanks*, in *Civil Engineering 2012*, Islamic Azad University: Tehran South Branch.
- .۲۶ Haiyan, M. and S. Yuezhou, *PASSIVE CONTROL VIBRATION REDUCING ANALYSIS OF LARGE ELEVATED LIQUID-STORAGE TANK WITH OUTSIDE FLOATING ROOF UNDER BIDIRECTIONAL EARTHQUAKE*. Industrial Construction, 2013: p. S1.
- .۲۷ Goudarzi ,M.A., *Seismic behavior of a single deck floating roof due to second sloshing mode*. Journal of Pressure Vessel Technology, 2013. **135**(1): p. 011801.
- .۲۸ Goudarzi, M.A., *Attenuation Effects of a Single Deck Floating Roof in a Liquid Storage Tank*. Journal of Pressure Vessel Technology, 2014. **136**(1): p. 011802.
- .۲۹ Goudarzi, M.A., *New Design Method to Evaluate the Seismic Stress of Single Deck Floating Roof for Storage Tanks*. Earthquake Spectra, 2015. **31**(1): p. 421-439.
- .۳۰ Goudarzi, M.A., *Seismic Design of a Double Deck Floating Roof Type Used for Liquid Storage Tanks*. Journal of Pressure Vessel Technology, 2015. **137**(4): p. 041302.
- .۳۱ Goudarzi, M., S. Sabbagh-Yazdi, and W. Marx, *Investigation of sloshing damping in baffled rectangular tanks subjected to the dynamic excitation*. Bulletin of Earthquake Engineering, 2010. **8**(4): p. 1055-1072.
- .۳۲ Goudarzi, M.A. and S.R. Sabbagh-Yazdi, *Analytical and experimental evaluation on the effectiveness of upper mounted baffles with respect to commonly used baffles*. Ocean Engineering, 2012. **42**: p. 205-217.
- .۳۳ Goudarzi, M., *Analytical method for evaluating attenuation effects of a single deck floating roof storage*. Journal of Pressure Vessel Technology, 2013. **136**: p. 011802-011802.
- .۳۴ Hosseini, M. and P. Farshadmanesh, *Evaluating the effect of multiple vertical orthogonal baffles on sloshing phenomenon in rectangular tanks subjected to 3-dimensional earthquake excitations*. 2013.
- .۳۵ Mahmood Hosseini, S.S., Pegah Farshadmanesh, *A Simple Procedure for Evaluation of Baffles Arrangement Effects on Sloshing Phenomenon in Rectangular Tanks Subjected to 3-Dimensional Earthquake Excitatio*. Proceedings of SE-50EEE conference, 2013: p. 29-31.
- .۳۶ Hosseini, M., H. Vosoughifar, and P. Farshadmanesh, *Simplified dynamic analysis of sloshing in rectangular tanks with multiple vertical baffles*. 2013.
- .۳۷ Maleki, A. and M. Ziyaeifar, *Damping enhancement of seismic isolated cylindrical liquid storage tanks using baffles*. Engineering Structures, 2007. **29**(12): p. 3227-3240.

۳۸. Hosseini, M., et al., *A Simplified Method for Seismic Analysis of Tanks with Floating Roof by using Finite Element Method: Case Study of Kharg (Southern Iran) Island Tanks*. Procedia Engineering, 2011. **14**: p. 2884-2890.
۳۹. جعفریه.فرشید, ح.م., پیشنهاد یک سیستم جدید برای مخازن با سقف شناور جهت بهبود عملکرد لرزه ای آن ها در زلزله. پایان نامه کارشناسی ارشد, دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب, مهندسی عمران-سازه های هیدرولیکی, ۱۳۹۰.
۴۰. Ibrahim, R.A., *Liquid sloshing dynamics: theory and applications*. 2005: Cambridge University Press.
۴۱. Abramson, H.N., W. Chu, and L.R. Garza, *Liquid sloshing in spherical tanks*. AIAA Journal, 1963. **1**(2): p. 384-389.
۴۲. Matsui, T., *Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a floating roof under seismic excitation*. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007. **129**(4): p. 557-566.
۴۳. Matsui, T., *Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a single-deck type floating roof under seismic excitation*. Journal of Pressure Vessel Technology, 2009. **131**(2): p. 021303.
۴۴. Sakai, F., M. Nishimura, and H. Ogawa, *Sloshing behavior of floating-roof oil storage tanks*. Computers & Structures, 1984. **19**(1-2): p. 183-192.
۴۵. Golzar, F.G., et al., *Sloshing Response of Floating Roofed Liquid Storage Tanks Subjected to Earthquakes of Different Types*. Journal of Pressure Vessel Technology, 2012. **134**(5): p. 051801-051801-13.
۴۶. inگلزار, ف.ق., تحلیل دینامیکی مخازن استوانه ای نگهداری مایعات با سقف شناور تحت تحریک پایه, مهندسی مکانیک. ۱۳۹۰: دانشگاه ارومیه.
۴۷. پانزدهمین کنفرانس سالانه inگرانسیاه, غ.ب.م.ف., تحلیل سقف های شناور با روش خطی سازی مجازی, مهندسی مکانیک. ۱۳۸۶, دانشگاه شهیدباهنر کرمان: دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
۴۸. H.Carpenter, G.H.K.a.L., *Forces on Cylinders and Plates in an Oscillation Fluid*. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1958. **60**, No. 5, May 1958.
۴۹. ACI-350, 350.3-01/350.3R-01: *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary*. Technical Documents.
۵۰. Clough, R.W. and J. Penzien, *Dynamics of structures*. 1975: McGraw-Hill.
۵۱. Maleki, A. and M. Ziyaeifar, *Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles*. Journal of Sound and Vibration, 2008. **311**(1): p. 372-385.
۵۲. Hosseini, M., M.A. Goudarzi, and A. Soroor, *Reduction of seismic sloshing in floating roof liquid storage tanks by using a Suspended Annular Baffle (SAB)*. Journal of Fluids and Structures, 2017. **71**: p. 40-55.
۵۳. Burden, R. and J. Faires, *Numerical Analysis*. 2010: Cengage Learning.

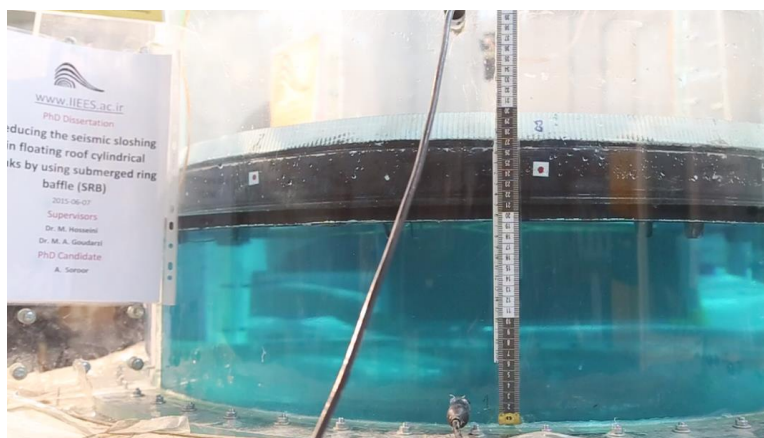
پیوست الف: منتخبی از نتایج تصویری آزمایش ها

آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، بدون بافل، تحت تحریک زلزله چی چی

در این بخش به ارائه تصاویر لحظه حداکثر دامنه تلاطم مربوط به آزمایش تحریک مخزن محتوی سیال به ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، بدون بافل، تحت اثر تحریک زلزله چی چی^۱ می پردازیم.

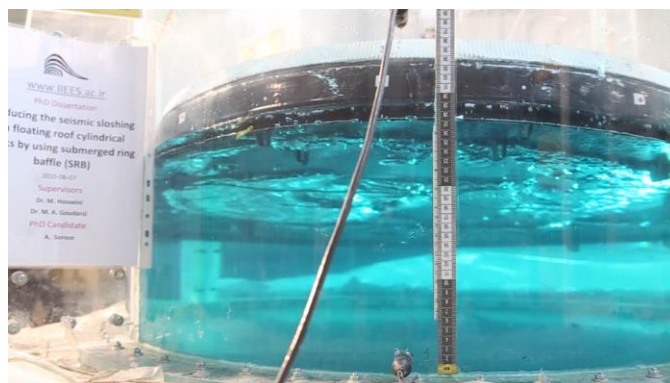


شکل ۱-۰ شروع آزمایش WR20WOBchichi

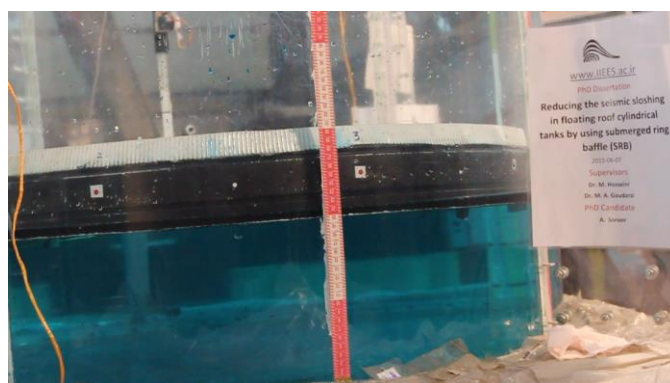


شکل ۲-۰ ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۱۹.۲۵ سانتیمتر از دیدگاه دوربین دوم

¹ Chichi



شکل ۳-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار اول تحریک، ۲۷ سانتیمتر



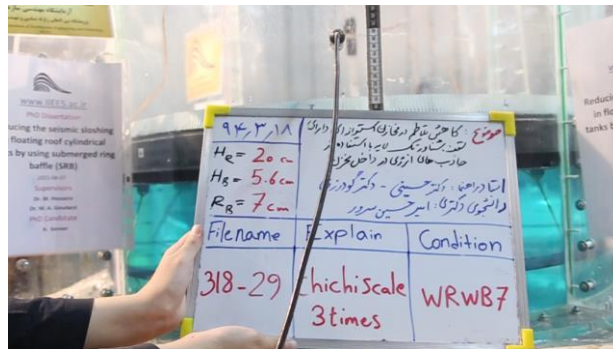
شکل ۴-۰ ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۲۰ سانتیمتر از دیدگاه دورین چهارم



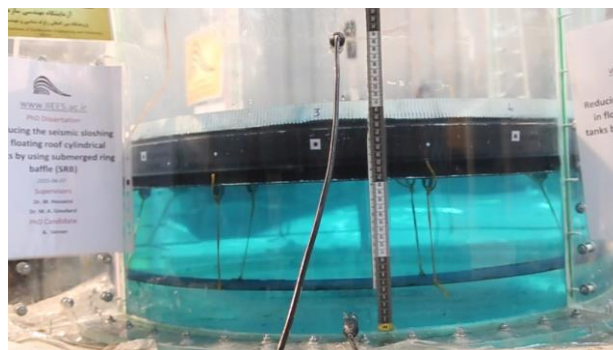
شکل ۵-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار اول تحریک، ۲۸ سانتیمتر

آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۷ سانتیمتر، تحت تحریک زلزله چی چی

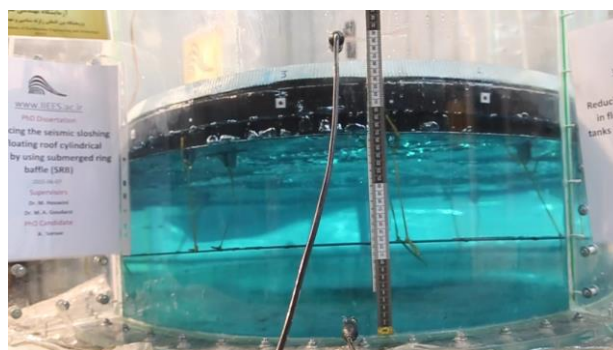
در این بخش به ارائه تصاویر لحظه حداکثر دامنه تلاطم مربوط به آزمایش تحریک مخزن محتوی سیال به ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، همراه با بافل به عرض ۷ سانتیمتر به ارتفاع ۶ سانتیمتر از کف مخزن، تحت اثر تحریک زلزله چی چی^۱ پرداخته شده است.



شکل ۶-۰ شروع آزمایش WR20WB7chichi

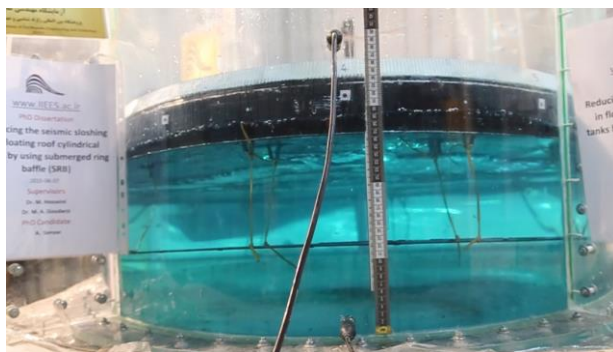


شکل ۷-۰ ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۲۰.۵ سانتیمتر از دیدگاه دوربین دوم



شکل ۸-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، بار اول تحریک، ۲۶.۵ سانتیمتر

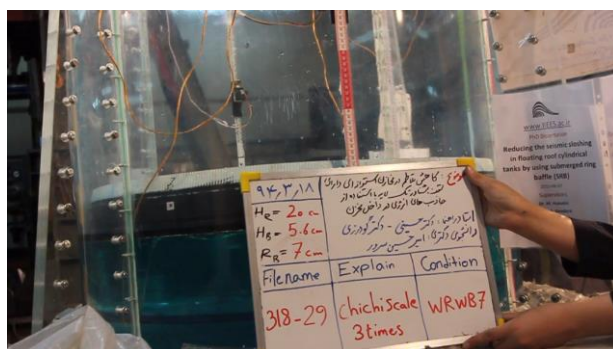
¹ Chichi



شکل ۹-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار دوم تحریک، ۲۶.۵ سانتیمتر



شکل ۱۰-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار سوم تحریک، ۲۶.۵ سانتیمتر



شکل ۱۱-۰ ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۲۰.۵ سانتیمتر از دیدگاه دورین چهارم



شکل ۱۲-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین چهارم، بار اول تحریک، ۲۷ سانتیمتر



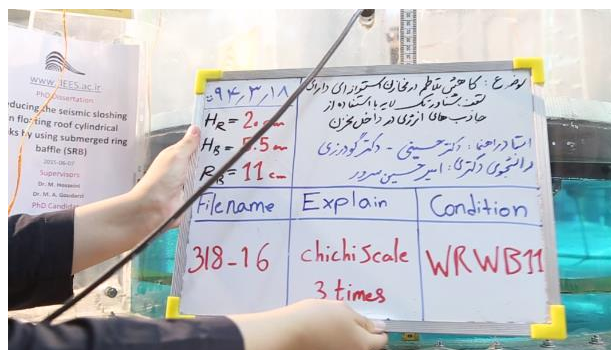
شکل ۱۳- ۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین چهارم، بار دوم تحریک، ۲۷ سانتیمتر



شکل ۱۴- ۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین چهارم، بار سوم تحریک، ۲۷ سانتیمتر

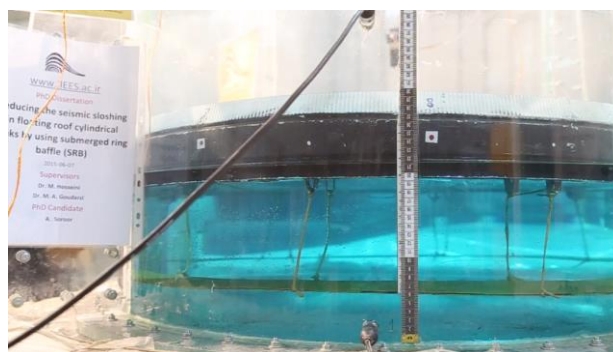
آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر، تحت تحریک زلزله چچی

در این بخش به ارائه تصاویر لحظه حداکثر دامنه تلاطم مربوط به آزمایش تحریک مخزن محتوی سیال به ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، همراه با بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر به ارتفاع ۶ سانتیمتر از کف مخزن، تحت اثر تحریک زلزله چچی^۱ پرداخته شده است.

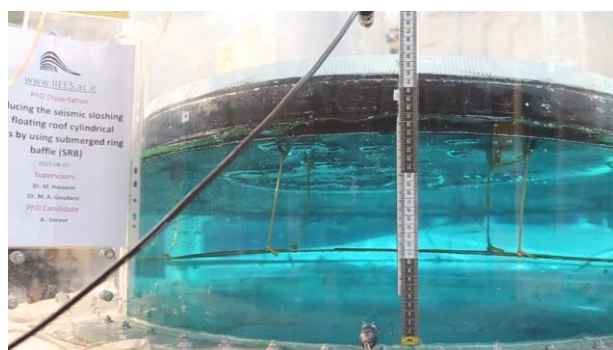


شکل ۱۵- ۰ شروع آزمایش chichi WR20WB11 از دید دورین دوم

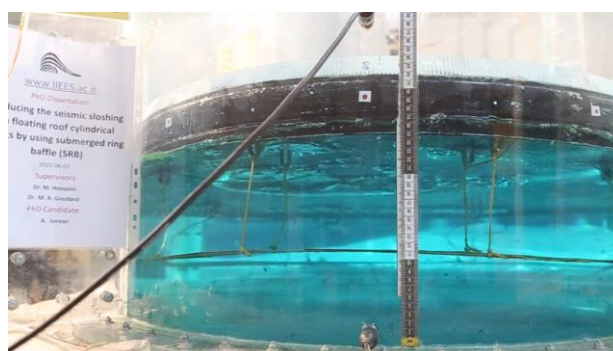
¹ Chichi



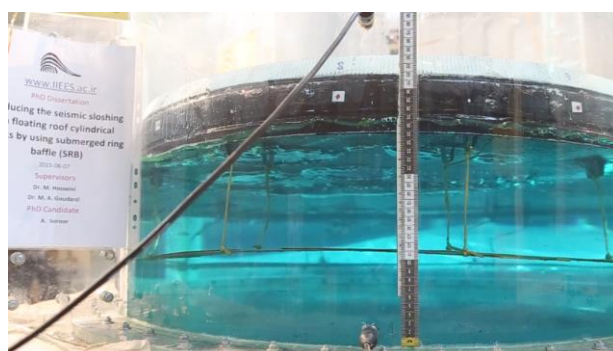
شکل ۱۶- ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۱۹.۵ سانتیمتر از دید دورین دوم



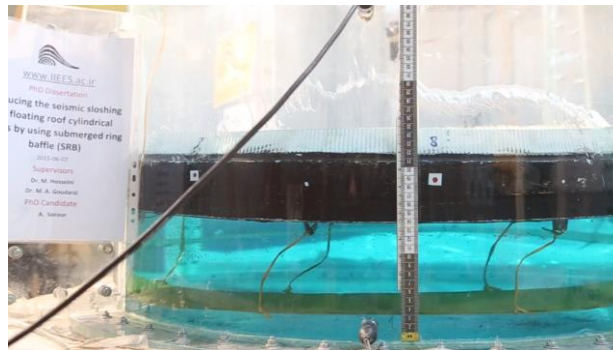
شکل ۱۷- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار اول تحریک، ۲۴.۵ سانتیمتر



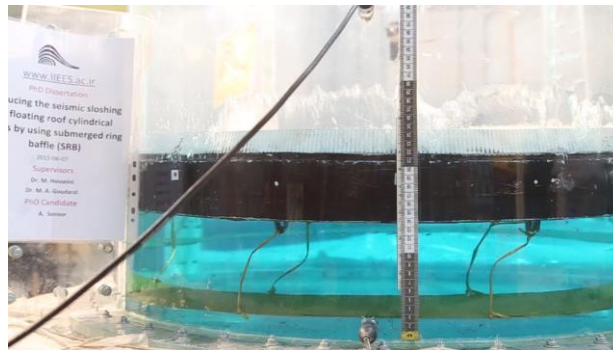
شکل ۱۸- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار دوم تحریک، ۲۵ سانتیمتر



شکل ۱۹- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار سوم تحریک، ۲۵ سانتیمتر



شکل ۲۰- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، بار اول تحریک، ۱۳.۵ سانتیمتر

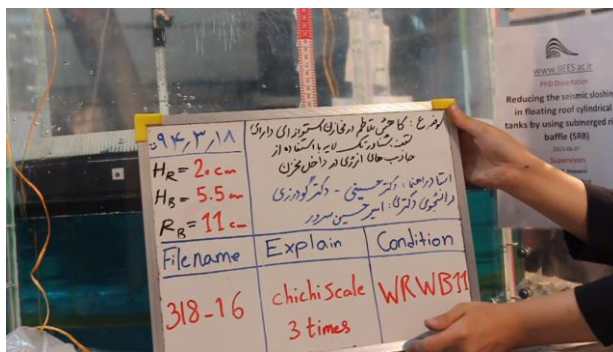


شکل ۲۱- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، بار دوم تحریک، ۱۳.۵ سانتیمتر



شکل ۲۲- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، بار سوم تحریک، ۱۳.۵ سانتیمتر

جهت ثبت نتایج مربوط به آزمایشات تحت اثر زلزله در جداول نهایی، با توجه به آنکه تحریک زلزله سه بار به مخزن اعمال شده است، ابتدا میانگین حداکثر پاسخ (دامنه مثبت ارتفاع تلاطم) در سه تحریک یکسان پی در پی از دیدگاه دوربین دوم بدست آمد (ave max)، سپس میانگین حداقل پاسخ (دامنه منفی ارتفاع تلاطم) در سه تحریک یکسان پی در پی از دیدگاه دوربین دوم بدست آمد (ave min) و در نهایت ماکزیمم این دو عدد در جداول فصل چهارم گزارش شده است. منظور از لغت پاسخ در متن نوشته شده زیر تصاویر فوق، تفاضل ارتفاع قرار گیری سقف شناور در لحظه اوج تلاطم نسبت به ارتفاع سقف شناور در لحظه شروع تحریک می باشد (شکل ۱۶-۱۰).



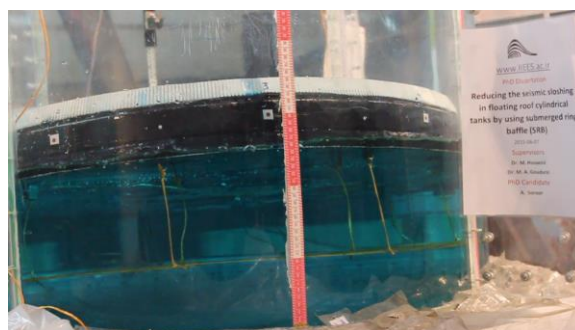
شکل ۲۳-۰ شروع آزمایش chichi WR20WB6R11 از دید دوربین چهارم



شکل ۲۴-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، بار اول تحریک، ۲۵ سانتیمتر



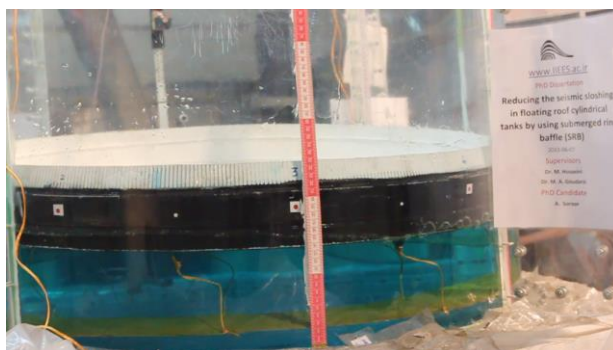
شکل ۲۵-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، بار دوم تحریک، ۲۵.۵ سانتیمتر



شکل ۲۶-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، بار سوم تحریک، ۲۵ سانتیمتر



شکل ۲۷-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، بار اول تحریک، ۱۴ سانتیمتر



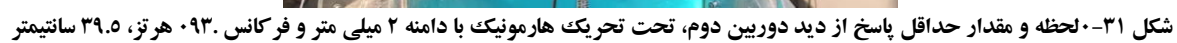
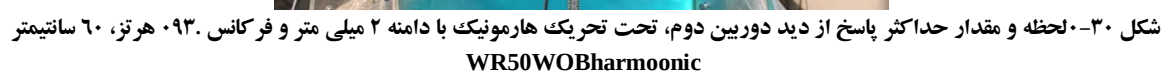
شکل ۲۸-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، بار دوم تحریک، ۱۳.۵ سانتیمتر

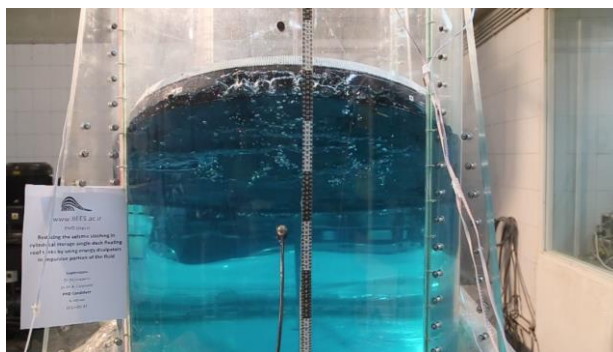


شکل ۲۹-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، بار سوم تحریک، ۱۳.۵ سانتیمتر

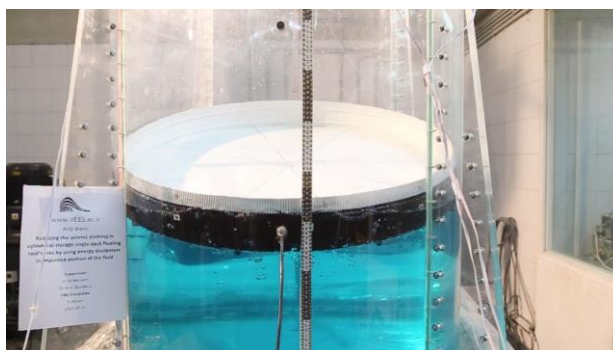
آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، بدون بافل، تحت تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۳ هرتز

در این بخش به ارائه تصاویر لحظه حداکثر دامنه تلاطم مربوط به آزمایش تحریک مخزن محتوی سیال به ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، همراه با بافل به عرض ۷ سانتیمتر به ارتفاع ۶ سانتیمتر از کف مخزن، تحت اثر تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۳ هرتز پرداخته شده است.

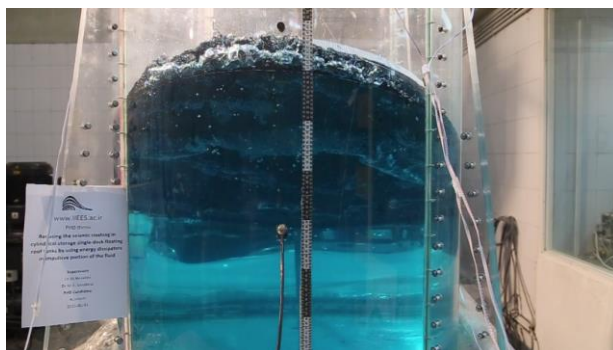




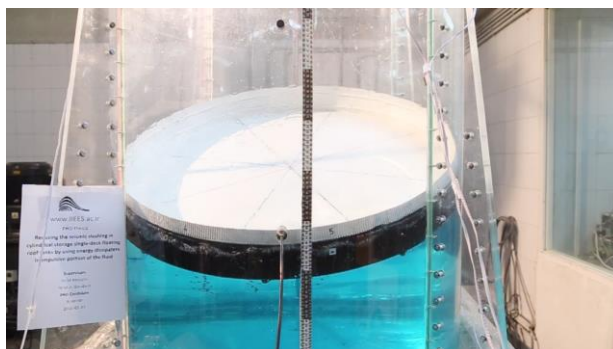
شکل ۳۲-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۶۵ سانتیمتر



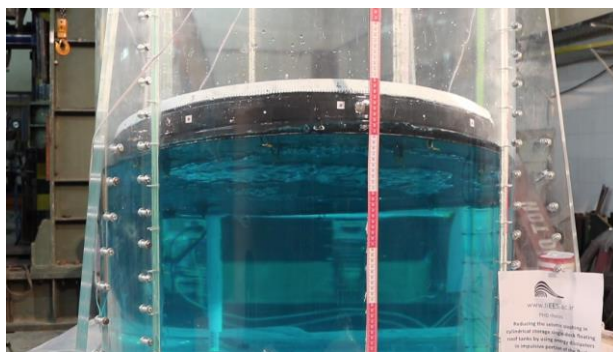
شکل ۳۳-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۳۴ سانتیمتر



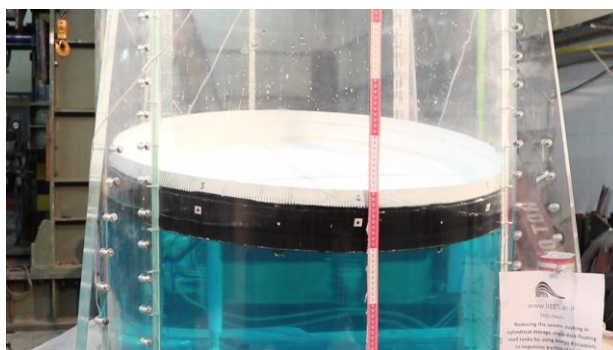
شکل ۳۴-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۶۹.۵ سانتیمتر



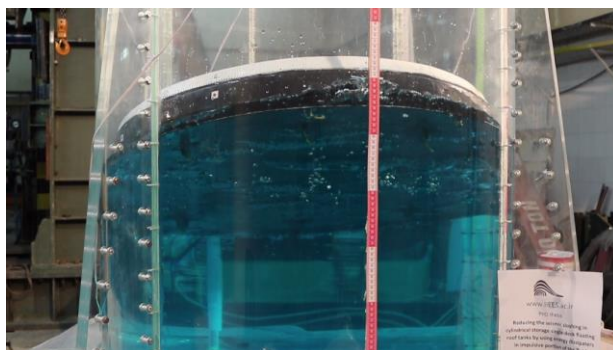
شکل ۳۵-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۲۸.۵ سانتیمتر



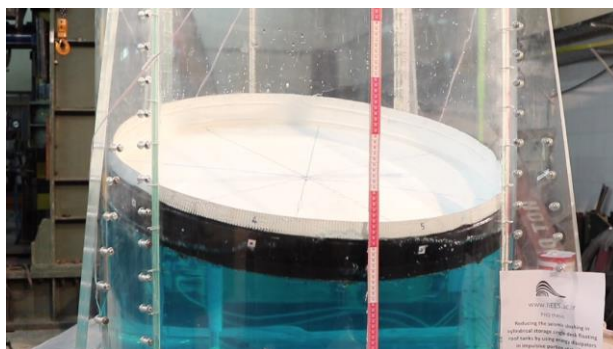
شکل ۳۶-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۶۰ سانتیمتر



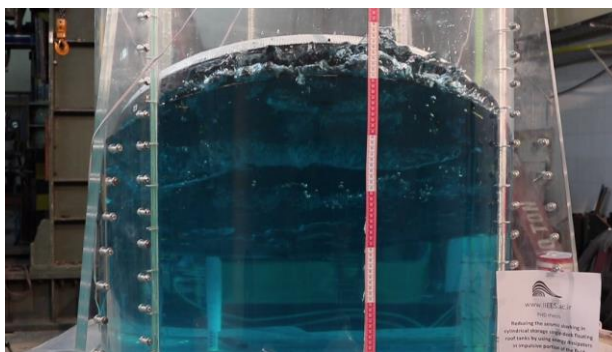
شکل ۳۷-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۳۹.۵ سانتیمتر



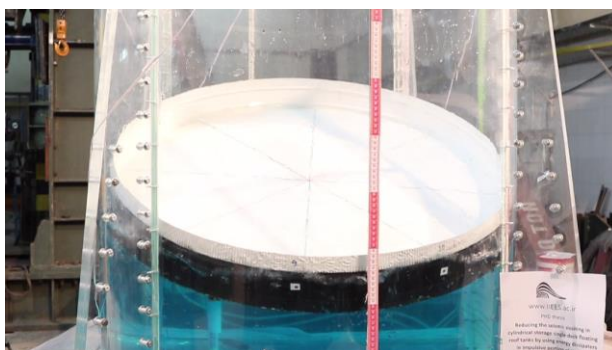
شکل ۳۸-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۶۵ سانتیمتر



شکل ۳۹-۰ لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۳۴ سانتیمتر



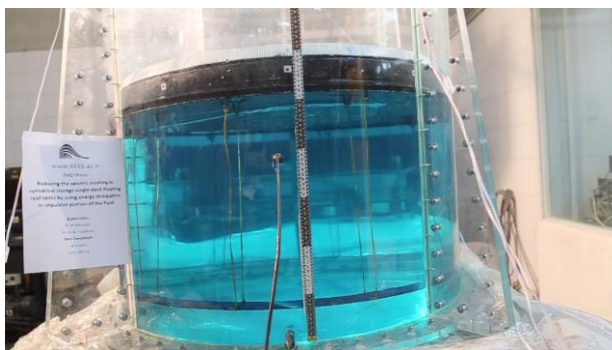
شکل ۴۰- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۷۰ سانتیمتر



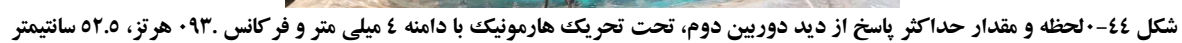
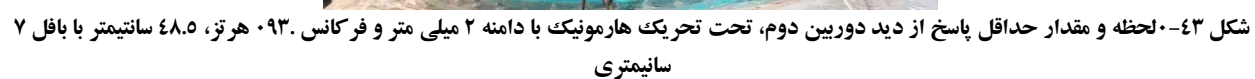
شکل ۴۱- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۲۹ سانتیمتر

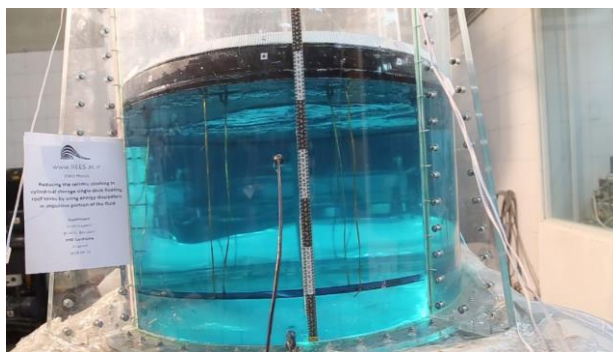
آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۷ سانتیمتر، تحت تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۳ هرتز

در این بخش به ارائه تصاویر لحظه حداکثر دامنه تلاطم مربوط به آزمایش تحریک مخزن محتوی سیال به ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، همراه با بافل به عرض ۷ سانتیمتر به ارتفاع ۶ سانتیمتر از کف مخزن، تحت اثر تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۳ هرتز پرداخته شده است.

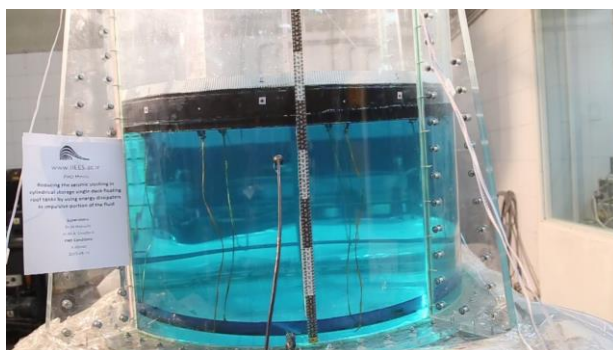


شکل ۴۲- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۱.۵ سانتیمتر با بافل ۷ سانتیمتری WR50WB7harmonic





شکل ۴۶- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۴.۵ سانتیمتر



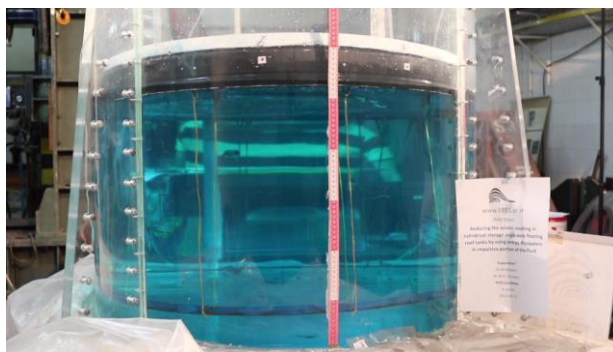
شکل ۴۷- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۵ سانتیمتر



شکل ۴۸- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۱.۵ سانتیمتر



شکل ۴۹- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۸.۵ سانتیمتر



شکل ۵۰- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۲.۵ سانتیمتر



شکل ۵۱- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۷.۵ سانتیمتر



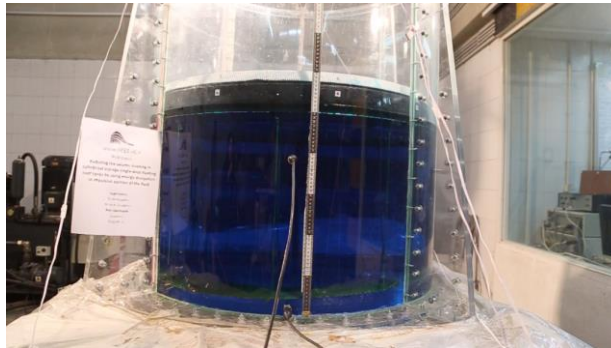
شکل ۵۲- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۵ سانتیمتر



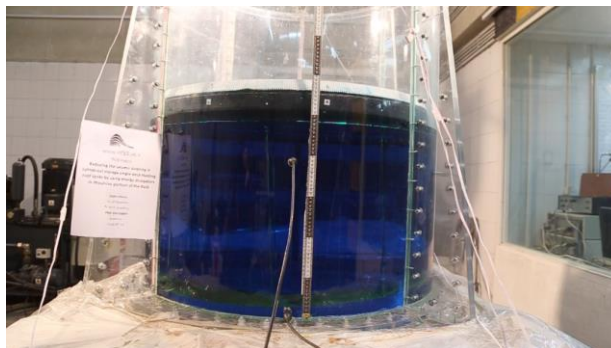
شکل ۵۳- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۵ سانتیمتر

آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر، تحت تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۳ هرتز

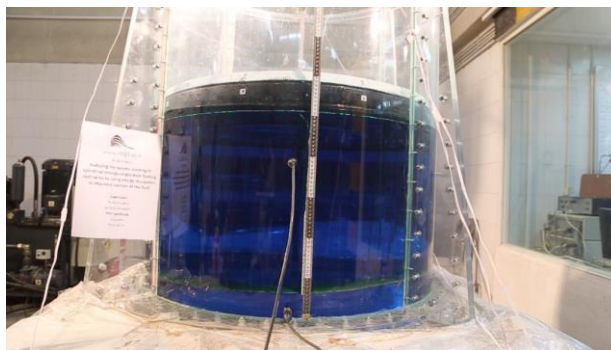
در این بخش به ارائه تصاویر لحظه حداکثر دامنه تلاطم مربوط به آزمایش تحریک مخزن محتوی سیال به ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، همراه با بافل به عرض ۱۱ سانتیمتر به ارتفاع ۶ سانتیمتر از کف مخزن، تحت اثر تحریک هارمونیک با فرکانس ۰.۹۳ هرتز پرداخته شده است.



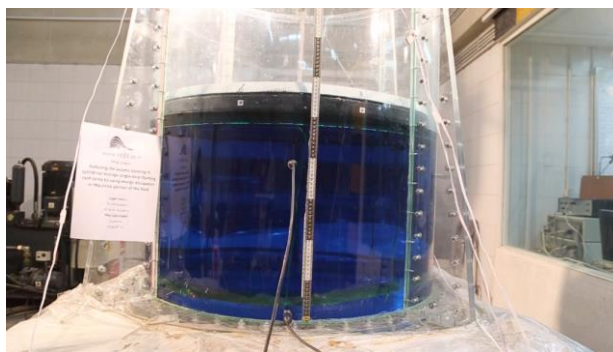
شکل ۵۴- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۹ سانتیمتر WR50WB1harmonic



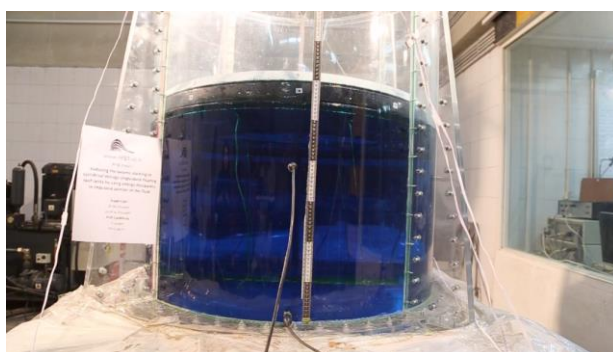
شکل ۵۵- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۸ سانتیمتر



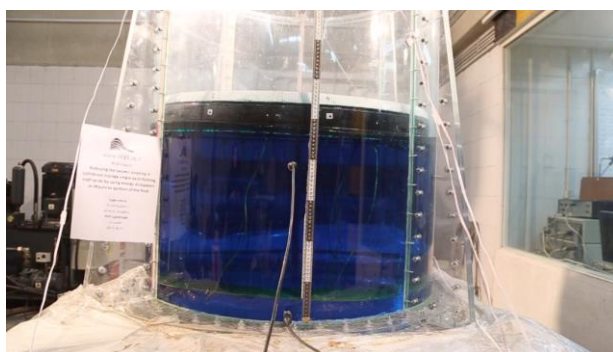
شکل ۵۶- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۳۴ سانتیمتر



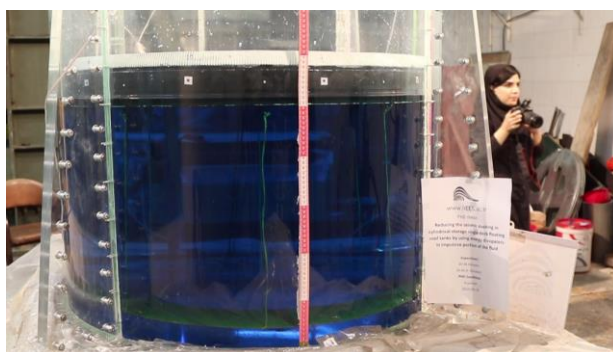
شکل ۵۷- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۸.۵ سانتیمتر



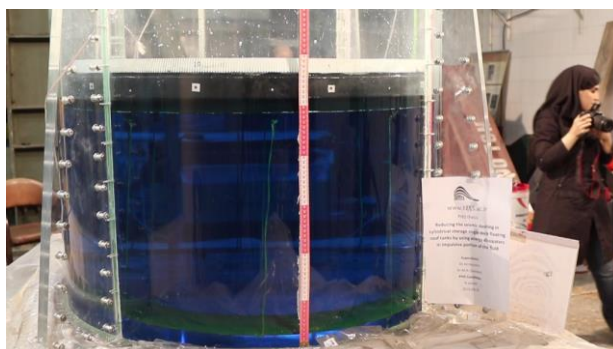
شکل ۵۸- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۳ سانتیمتر



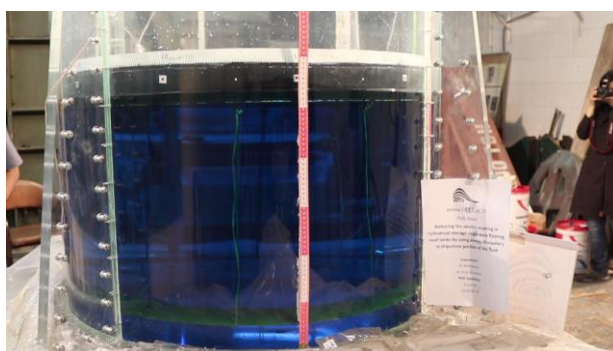
شکل ۵۹- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین دوم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۶.۵ سانتیمتر



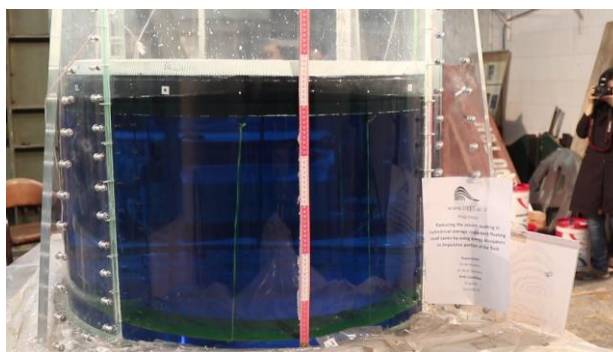
شکل ۶۰- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۱ سانتیمتر



شکل ۶۱- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۲ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۹ سانتیمتر



شکل ۶۲- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۲ سانتیمتر



شکل ۶۳- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۴ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۸.۵ سانتیمتر



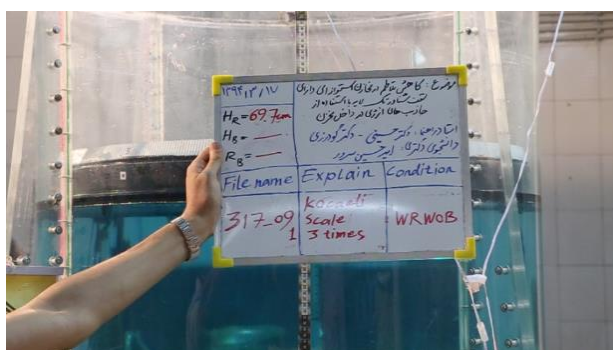
شکل ۶۴- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۵۲ سانتیمتر



شکل ۶۵- لحظه و مقدار حداقل پاسخ از دید دوربین چهارم، تحت تحریک هارمونیک با دامنه ۸ میلی متر و فرکانس ۰.۹۳ هرتز، ۴۶ سانتیمتر

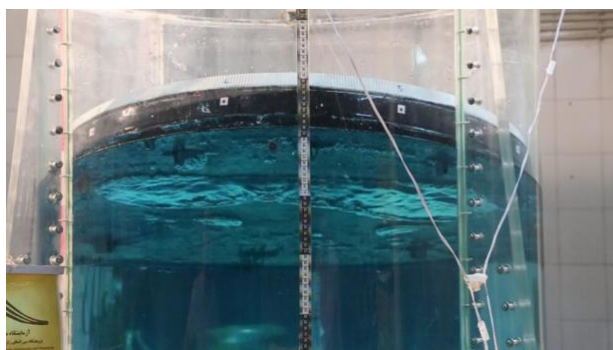
آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، بدون بافل، تحت تحریک زلزله، تحت تحریک زلزله کوجایی^۱

در این بخش به ارائه تصاویر لحظه حداکثر دامنه تلاطم مربوط به آزمایش تحریک مخزن محتوی سیال به ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، بدون بافل، تحت اثر تحریک زلزله پرداخته شده است.

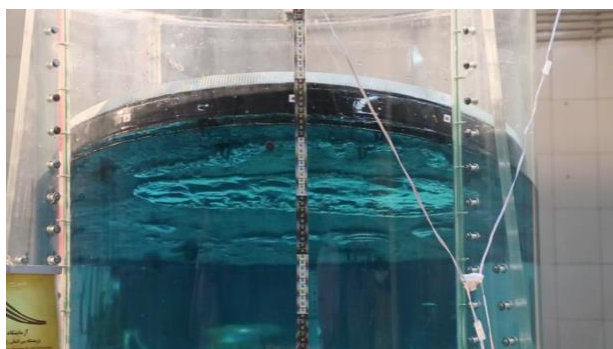


شکل ۶۶- ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۷۰ سانتیمتر از دید دوربین دوم WR70WOBkocaeli

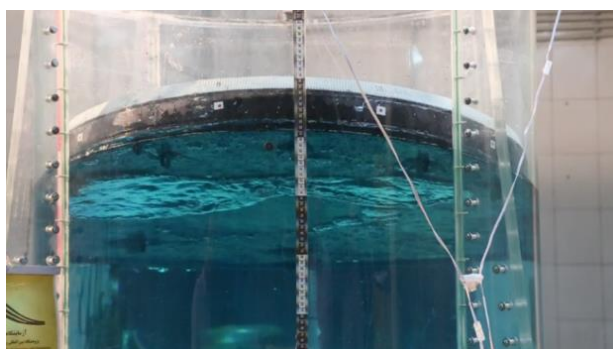
¹ Kocaeli



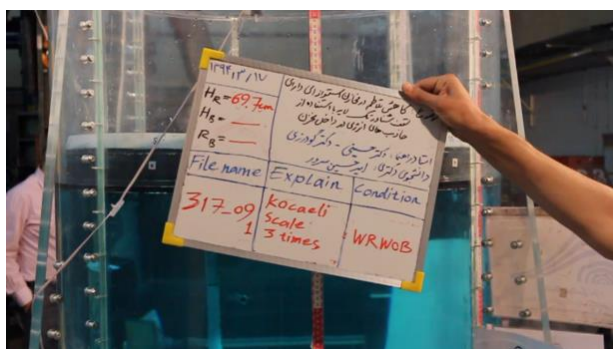
شکل ۶۲-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار اول تحریک، ۸۲.۵ سانتیمتر



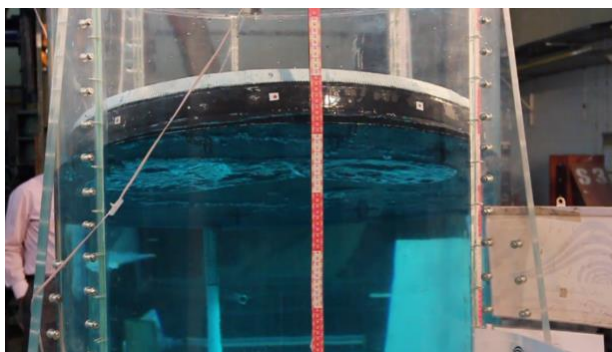
شکل ۶۸-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار دوم تحریک، ۸۲.۵ سانتیمتر



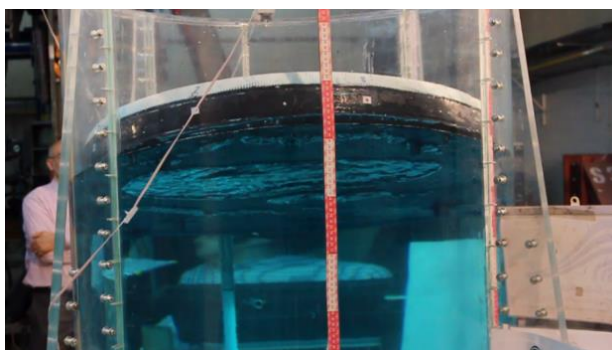
شکل ۶۹-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین دوم، بار سوم تحریک، ۸۲ سانتیمتر



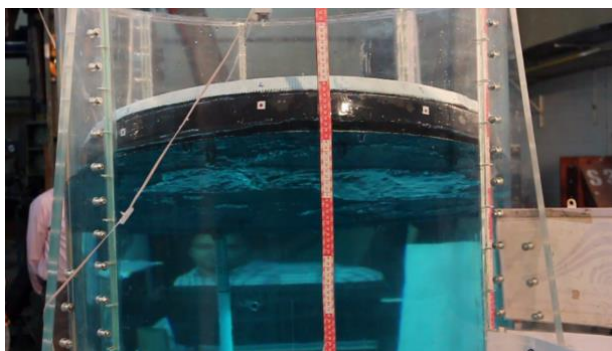
شکل ۷۰-۰ ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۷۰ سانتیمتر از دید دورین چهارم



شکل ۷۱-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین چهارم، بار اول تحریک، ۸۲ سانتیمتر



شکل ۷۲-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین چهارم، بار دوم تحریک، ۸۲.۵ سانتیمتر



شکل ۷۳-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین چهارم، بار سوم تحریک، ۸۱.۵ سانتیمتر

آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، با بافل به عرض ۷ سانتیمتر، تحت تحریک زلزله کوجایی

در این بخش به ارائه تصاویر لحظه حداکثر دامنه تلاطم مربوط به آزمایش تحریک مخزن محتوی سیال به ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، همراه با بافل به عرض ۷ سانتیمتر به ارتفاع ۶ سانتیمتر از کف مخزن، تحت اثر تحریک زلزله کوجایی پرداخته شده است.



شکل ۷۴-۰ ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۷۰ سانتیمتر از دید دوربین دوم WR70WB7kocaeli



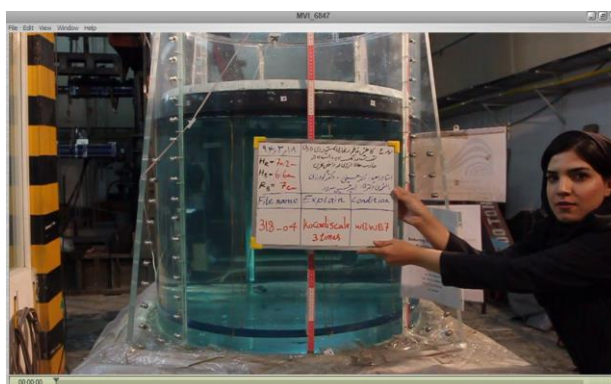
شکل ۷۵-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، بار اول تحریک، ۷۶.۵ سانتیمتر



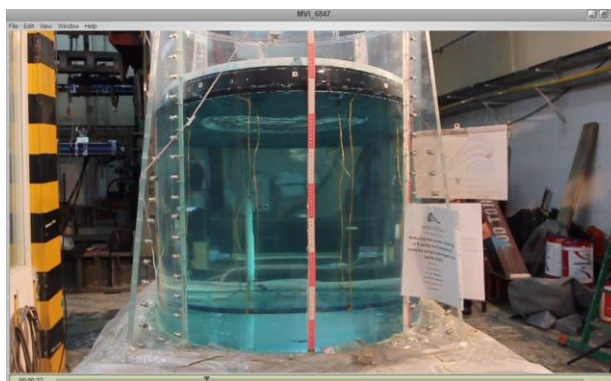
شکل ۷۶-۰ لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، بار دوم تحریک، ۷۶ سانتیمتر



شکل ۷۷- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، بار سوم تحریک، ۷۶ سانتیمتر



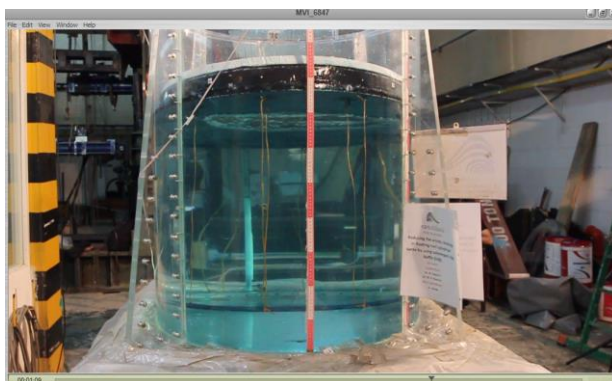
شکل ۷۸- ارتفاع سقف در لحظه شروع آزمایش ۷۰ سانتیمتر از دید دوربین دوم



شکل ۷۹- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دوربین دوم، بار اول تحریک، ۷۶ سانتیمتر



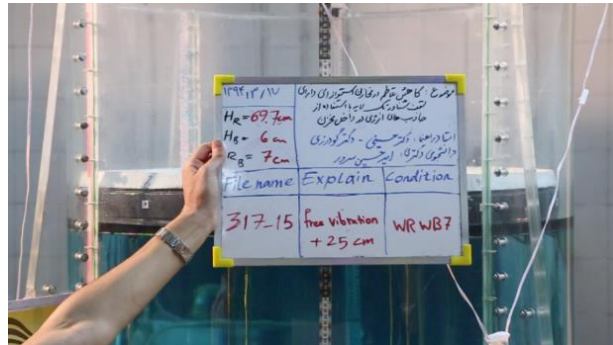
شکل ۸۰- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین چهارم، بار دوم تحریک، ۷۶.۵ سانتیمتر



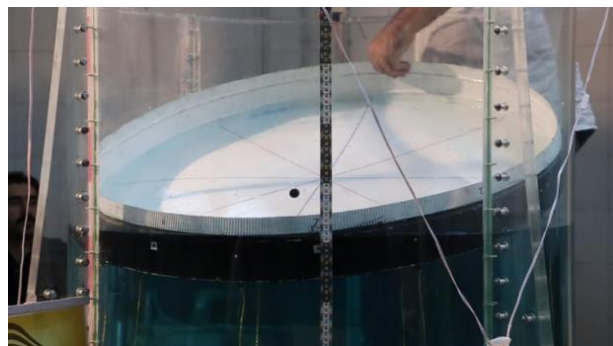
شکل ۸۱- لحظه و مقدار حداکثر پاسخ از دید دورین چهارم، بار سوم تحریک، ۷۶ سانتیمتر

آزمایش سقف شناور در ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، با جابه جایی اولیه ۲۵ سانتیمتر جهت برداشت زمان تناوب

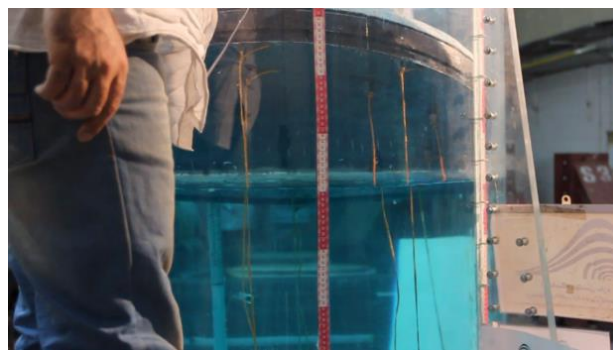
در شکل های زیر تصاویر مربوط به آزمایش اندازه گیری زمان تناوب تلاطم در مخزن دارای سقف شناور با ارتفاع آب ۷۰ سانتیمتر ارائه شده است.



شکل ۸۲- شروع آزمایش ارتعاش آزاد مربوط به ارتفاع ۷۰ سانتیمتر از دید دوربین دوم FVWR70WB7



شکل ۸۳- اعمال جابجایی اولیه ۲۵ سانتیمتر در آزمایش ارتعاش آزاد ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، از دید دوربین دوم



شکل ۸۴- اعمال جابجایی اولیه ۲۵ سانتیمتر در آزمایش ارتعاش آزاد ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، از دید دوربین دوم

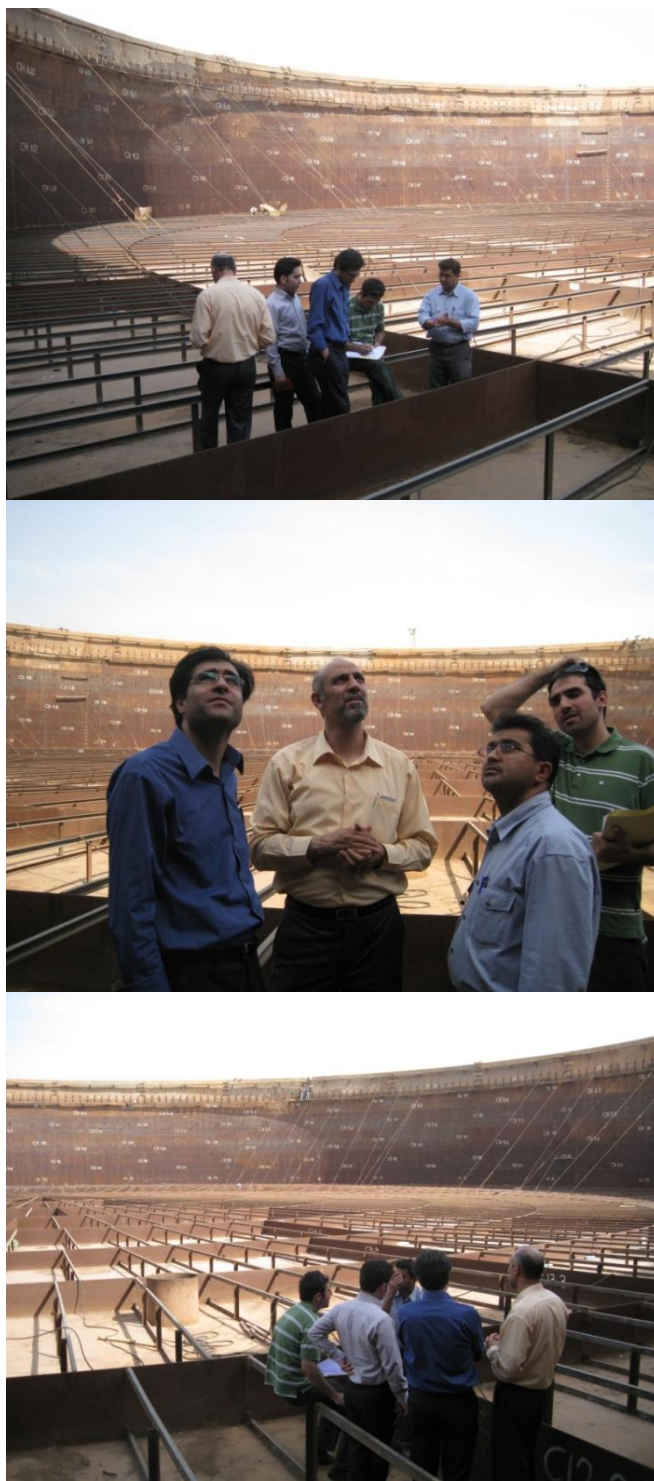
در آزمایش ارتعاش آزاد، ابتدا سقف از ارتفاعی مشخص (۲۵ سانتیمتر) رها شده و سپس فاصله زمانی دو اوج پی در پی پس از برخورد سقف با سیال، به عنوان زمان تناوب ارتعاش آزاد سقف، اندازه گیری شد. نتایج آزمایشاتی که در این فصل نحوه انجام آن ها توضیح داده شد، در فصل چهارم ارائه شده است.

پیوست ب: گزارش بازدید از مخازن سقف شناور

بازدید از مخازن نفتی سقف شناور در حال بهره برداری جزیره خارگ

در راستای پروژه تحقیقاتی جایگزین خدمت سربازی و گسترش رابطه صنعت با دانشگاه و تعریف پروژه‌های پژوهشی در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تیمی متشکل از آقایان محمود حسینی رییس گروه شریان‌های حیاتی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، علی سردار از کارشناسان پژوهش اداره پژوهش و توسعه، امیرحسین سرور (به عنوان نخبه وظیفه) و سید رضا حسینی (به عنوان نخبه وظیفه) در تاریخ ۱۱ و ۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۹ از جزیره خارگ بازدید نمودند. در ادامه شرح مختصری از بازدید ارائه می شود:

با هماهنگی حراست جزیره و همراهی کارشناسی از اداره مهندسی ساختمان، جناب آقای مهندس افکار بازدید از مخازن نفتی در حال ساخت و در حال بهره برداری به عمل آمد. در شکل ۶-۱ نماهایی از ابعاد مخزن در حین بازدید نشان داده شده است.



شکل ۱-۰. نماهایی از بازدید مخزن ۳۸ در جزیره خارگ و نشان دهنده ابعاد نسبی بزرگی مخزن

بازدید از مخزن در حال ساخت (مخزن شماره ۳۸) واقع در جزیره خارگ

مخزن شماره ۳۸ با ظرفیت یک میلیون بشکه در تاریخ ۱۱ و ۱۲ اریبهشت ۱۳۸۹ در جزیره ساخته شد که در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. در مرور مدارک طراحی این مخزن غول‌آسا دیده شد که سقف این مخزن توسط نرم‌افزار SAP مدل-سازی شده است. این تحلیل استاتیکی بوده و سیال زیر سقف با فدر مدل شده است. این موضوع شبهات بسیاری را در زمینه‌ی نحوی طراحی این سقف‌ها و در نتیجه عملکرد واقعی آن‌ها در زمین لرزه ایجاد می نماید. هر بشکه نفت معادل با ۱۵۹ لیتر است، بنابراین هر مخزن معادل با ۱۵۹۰۰۰۰۰ لیتر و یا ۱۵۹۰۰۰ مترمکعب ظرفیت دارد.



شکل ۲-۰: نمای داخلی از مخزن یک میلیون بشکه‌ای شماره ۳۸ در حال ساخت در بازدید از مخازن با سقف شناور جزیره‌ی خارگ

با توجه به توضیحات مهندس افکار، مخازن بر اساس شتاب مبنای طرح $0.4G$ طراحی شده‌اند. قطر مخزن در حال ساخت شماره ۳۸، ۱۰۹ متر، ارتفاع آن ۱۷.۵ متر و سقف آن شناور، از نوع Double Deck می‌باشد. جهت ساخت مخزن ابتدا خاک برداری کرده تا به خاک مناسب و با استحکام کافی برسند. سپس بر اساس نیاز و نوع خاک محل ابتدا Sub Base ریخته و سپس BASE می‌ریزند. جهت زهکش کف مخزن دانه‌های بادامی در لایه اول و در لایه دوم دانه‌های ماسه‌ای جهت زهکشی کف مخزن ریخته می‌شود. ورق‌های پوشش کف مخزن بر روی لایه‌های ماسه‌ای قرار می‌گیرند که از اعوجاج کف مخزن جلوگیری شود. کف مخزن با شیبی کمتر از یک درصد (تقریباً معادل $0.1/8$ درصد) برای زهکش آب شیب بندی می‌شود، به نحوی که ارتفاع مرکز مخزن از جداره‌ها ۴۵ سانتیمتر بالاتر قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که نفت خام حاوی ۳ درصد آب شور می‌باشد که از دریاچه‌هایی که در شکل ۳-۰ نشان داده شده‌اند، پس از نفت گیری مخزن خارج می‌شود.



شکل ۳-۰: دریچه خروجی آب از جداره های مخزن

در مخازن با احجام کم، لوله های ورودی از جداره Shell، به مخزن وارد و از آن خارج می شوند، اما در مخازن با ظرفیت یک میلیون بشکه، این ورودی و خروجی ها از کف مخزن صورت می گیرند. علت این امر جلوگیری از تشکیل شدن رسوب در کف مخزن می باشد. شکل ۴-۰ محل ورود و خروج این لوله ها را به مخازن نشان می دهد. جداره های دیواره بتنی نشان داده شده در شکل ۴-۰ به خاطر جلوگیری از یون کلر عایق بندی می شود.



شکل ۴-۰: حوضچه های ورودی و خروجی لوله ها به مخازن

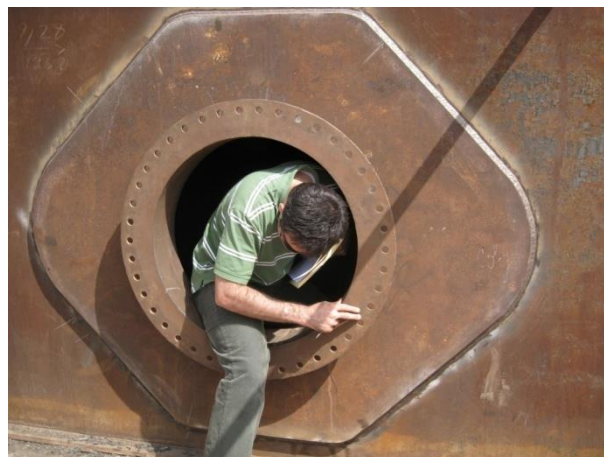
بر روی بستر مناسب جهت احداث مخزن ابتدا یک حلقه Ring بتنی به عرض ۴۰ الی ۷۰ و ارتفاع ۹۰ سانتی متر ایجاد می شود که در آن میلگردهایی به قطر ۳۲ میلیمتر قرار میگیرد. بر روی این حلقه بتنی یک لایه بتن به نام بتن مگر با ارتفاع ۱

سانتی متر ریخته می شود تا بستر مناسب جهت احداث ورق‌ها آماده شود. ابعاد صفحه های جداره مخزن که بر روی این حلقه بتنی قرار می گیرند برابر با ۱۲/۵ در ۲/۵ متر می باشند که در شکل ۵-۰ نشان داده شده اند. جهت جوش این ورق ها از جوش های نفوذی با استحکام بیشتر از خود ورق ها استفاده می شود. قبل از جوشکاری لبه صفحات کاملاً به صورت ۴۵ درجه بریده می شوند.



شکل ۵-۰ نمایی از پوسته مخزن که نشان دهنده ابعاد ورق‌های مخزن می باشد

در چهار سمت جداره مخزن، ورودی هایی با نام Manhole جهت ورود و خروج نیروهای انسانی به مخزن برای سرویس های لازم قرار گرفته است، که در شکل ۶-۰ با توجه به مقیاس انسانی ابعاد آن نشان داده شده است. ضخامت جوش های بین صفحات دور Manhole و جداره در شکل ۷-۰ نشان داده شده است. این ضخامت تقریباً برابر با ۶ سانتی متر می باشد.



شکل ۶-۰ ورودی آدم رو MAHOLE در جداره مخزن



شکل ۷-۰ ضخامت جوش صفحات تقویت کننده به جداره مخزن جهت احداث MANHOLE

داخل مخزن در محاذات (روبروی) دریچه خروجی آب که در شکل ۳-۰ نشان داده شد، چاهکی Sump جهت جمع آوری آب شور کف مخزن در نظر گرفته شده است، آب به صورت سیستم سیفون بدون اعمال نیروی خارجی از این چاهکها تخلیه می شود.

سقف مخازن شناور در سه نوع طراحی و اجرا می شود:

۱- سقف های ثابت با یک جداره SINGLE DECK

۲- سقف های دو جداره DOUBLE DECK

۳- سقف ها با قطعات کمک کننده شناوری PONTOON

سقف مخزن شماره ۳۸ از نوع Double Deck می باشد. در مراحل اولیه ساخت، سقف این مخازن بر روی پایه های موقت قرار می گیرد تا عملیات های لازم جهت ساخت سقف انجام شود، این عمل در اصطلاح درختکاری نامید می شود. سپس از سوراخ هایی که داخل سقف در نظر گرفته شده اند، پایه هایی به نام Leg رد می شوند و این پایه ها همراه با سقف مخزن بالا و پایین می روند، به نحوی که هنگام سرویس مخزن سقف در ارتفاع تقریباً دو متری و در هنگام خالی کردن مخزن سقف حداقل تا ارتفاع یک و نیم متر پایین می آید.



شکل ۸-۰ قرار گرفتن مخزن بر روی پایه هایی به نام درخت (عملیات مرسوم به درختکاری)



شکل ۹-۰ قرار گرفتن سقف تاج شکل مخزن بر روی پایه های سقف LEG



شکل ۱۰-۰ سوراخ های تعبیه شده در سقف جهت گذراندن پایه‌ها LEG

سقف مخزن که در شکل ۹-۰ تصویر آن توسط مهندس افکار برروی دیواره مخزن نشان داده شده است (ایشان در این شکل در حال توضیح در مورد سقف مخازن نفتی می باشند)، در واقع یک سازه می باشد که شامل صفحات Lower و Upper می باشد. بین دو صفحه بالایی و پایینی حلقه هایی به نام Rim وجود دارد، بین این حلقه ها با صفحاتی به نام Compart جداسازی شده است (ضخامت این صفحات ۵ میلی متر می باشد)، در این حالت سقف به شکل لانه زنبور می شود، در این صورت هنگامی که نفت به داخل سقف شناور وارد شود، تنها وارد یک لانه زنبوری می شود و در این صورت دیگر نفت به لانه های کناری منتقل نمی شود و از غرق شدن سقف جلوگیری می شود. در واقع این Compart ها به صورت یکسری جداکننده Divider در سقف عمل می کنند. در واقع اگر از ورود نفت توسط این جداکننده ها جلوگیری نشود، بعد از مدتی سقف در نفت غرق می شود. (زیرا جرم آن بواسطه ورود سیال به آن افزایش می یابد)

سازه سقف شامل موارد ذکر شده، در شکل ۱۱-۰ نشان داده شده است. جهت پایداری سقف در آن المان های خرابایی نصب می شود. (به صورت Truss). سازه سقف تحت نیروهای مطرح شده در نرم افزار SAP مدل می شود و تحت بحرانی ترین حالت که در دو سلول (خن) کنار هم نفت وارد شود، به نحوی که بتوانند این نیروها و همچنین نیروهای ناشی از خلأ، تغییر شکل، تغییر حرارت و شناوری سقف را تحمل کنند، طراحی می شوند.



شکل ۱۱-۰ سقف شناور شامل جداکننده ها و سلول ها (خن)

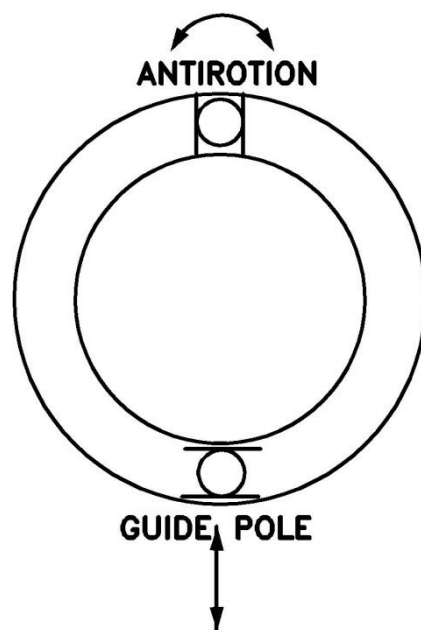
فاصله بین جدار خارجی مخزن و دیواره داخلی مخزن با پرکننده هایی به نام Tube Seal پر می شود، این فاصله ۲۰ سانتی متر می باشد که در شکل ۱۲-۰ نشان داده شده است. شایان ذکر است در صورتیکه بخواهیم در فعالیت های آزمایشگاهی برای مثال با مقیاس ۱ به ۱۰۰ مخزن را مدل نماییم، این فاصله معادل با ۲ میلی متر می شود، که رعایت دقت در این مقیاس بسیار سخت می باشد. بنابراین در مدلسازی آزمایشگاهی بیش از هر چیز به تمهیدات مربوط به اجرایی بودن مدل دقت می

نماییم و سپس در نرم افزار های عددی به راستی سنجی نتایج می پردازیم و سپس نتایج بدست آمده را به مخازن با مقیاس واقعی تعمیم می دهیم.



شکل ۱۲-۰ فاصله بین دیواره خارجی سقف مخزن و جدار داخلی مخزن که با Tube seal پر می شود

دو میله بلند که حد فاصل سقف مخزن و دیواره داخلی مخزن می باشند، از جابه جایی سقف و ضربه سقف به دیواره داخلی مخزن جلوگیری می کنند. یکی از این میله ها به نام Anti rotation و دیگری به نام Guide Pole می باشد. همانطور که در شکل ۱۳-۰ نشان داده شده است، Anti rotation از حرکت های گردشی (مماسی) یا در واقع حرکت Vortex سقف جلوگیری کرده و Guide Pole از حرکات جانبی (شعاعی) سقف مخزن و برخورد آن با دیواره جلوگیری می نماید. این حرکات بواسطه نیروی باد و زلزله و حرکت بار های زنده بر روی سقف ایجاد می شوند. در واقع GUIDE POLE همانند یک کنسول گیردار عمل می کند و نقش میراکننده ضربه سقف به دیواره را خواهد داشت.



شکل ۱۳-۰ میله‌های نگهدارنده ضربه سقف در دو جهت دورانی و عمودی



شکل ۱۴-۰ استفاده از *guide pole* جهت بهره برداری و نجسیدن سقف به جداره ها (محسن سلطانی، حسین زینلی، ساخت مخازن سقف شناور)

از نظر مهندس افکار هنگام زلزله حرکت های مایع نفتی به دلیل وجود اصطکاک بین ذرات جامد نفت Slug سبب ایجاد گرما شده و نفت گرم شده که استعداد شعله ور شدن را دارد در مجاورت هوا آتش می گیرد. از نظر دکتر محمود حسینی اگر بتوانیم بین سقف و دیواره داخلی یک لایه تشکیل بدهیم که بتواند همراه با سقف بالا و پایین برود و از وارد شدن اکسیژن به نفت جلوگیری کند، در این صورت می توان از آتش سوزی جلوگیری نمود. البته در پاسخ، مهندس افکار مطرح کردند که این لایه در اثر تماس با مواد نفتی Slug پس از مدتی خشک و شکننده می شود و در عمل کاربردی نخواهد بود. از نظر مهندس افکار بهترین راه جهت جلوگیری از آتش سوزی در هنگام زلزله آن است که هنگام شروع زلزله سنسورهای حساس حرکت زمین را در ابتدا تشخیص داده و بلافاصله بر روی سقف Foam تزریق کنند. از نظر کارمندان اداره عملیات علت آتش سوزی برخورد سقف با shell و ایجاد جرقه می باشد. در نظر آن ها ضربه هایی که در هنگام سرویس به سقف وارد می شود، از نیرویی که هنگام زلزله به سقف وارد می شوند، بیشتر است!؟

بازدید از پالایشگاه نفت تهران

مورخ ۹۳۱۲۱۳ بوسیله هماهنگی های که توسط دکتر عشقی (عضو هیئت علمی پژوهشگاه زلزله زلزله) انجام شد، بازدیدی از پالایشگاه نفت تهران صورت گرفت. به گفته کی از افراد راهنما، در طول ۲۰۰۰ کیلومتر نفت از جنوب (اهواز) با استفاده از لوله های انتقال به پالایشگاه منتقل می شود. یکی از مشکلات اصلی پالایشگاه نفت تهران آن است که در بافت شهری قرار دارد (باقر آباد، شهر ری) و به صورت شبانه روزی مشغول فعالیت است. جهت مقاوم سازی المان های موجود در آن می بایست در اکثر موارد حین بهره برداری مقاوم سازی صورت پذیرد. به گفته مدیر قسمت فنی مهندسی پالایشگاه نفت تهران، در زلزله ترکیه علت اصلی آتش سوزی ها و خسارات وارده، رفتار نامناسب سقف مخازن نفتی با سقف شناور بوده است. عمر مخازن در این پالایشگاه همانند مخازن واقع در جزیره خارگ بعضاً به ۵۰ سال می رسد. این مخازن با آیین نامه API طراحی شده اند. روزانه ۲۵۰۰۰۰ مترمکعب در پالایشگاه نفت خام پالایش می شود. ۱۲۵۰۰۰ مترمکعب قسمت شمالی و ۱۲۵۰۰۰ مترمکعب قسمت جنوبی. به بیان دیگر در پالایشگاهی که ۲۴ ساعته مشغول به کار است، ۲۴ ساعته بهره برداری، تعمیر و نگه داری انجام می شود.

پالایشگاه نفت تهران دارای مخازنی با قطر تقریباً ۶۳ متر و ارتفاع ۱۴ تا ۱۵ متر مکعب می باشد با ظرفیت تقریباً ۳۰۰۰۰۰ هزار بشکه همچنین مخازن با همان ارتفاع اما به قطر ۸۰ متر به ظرفیت ۵۰۰۰۰۰ بشکه که در مقایسه با مخازن یک میلیون بشکه ای جزیره خارگ کوچکتر هستند.



شکل ۱۵-۰۰ نمای از سقف شناور مخزن ۳۰۰۰۰۰ بشکه ای همراه با نردبان دسترسی به سقف، واقع در پالایشگاه نفت تهران



شکل ۱۶- تصویری از مخازن ۳۰۰۰۰ بشکه ای همراه با نردبان دسترسی به سقف از نمای بیرونی، واقع در پالایشگاه نفت تهران

پیوست ج: برنامه متلب حل معادله دیفرانسیل مرتبه دو به روش رانگ کوتا

جهت حل معادله ۰-۱ با استفاده از روش رانگ کوتا، به نحوی که در ادامه ارائه شده است اقدام میکنیم [۵۳].

معادله ۰-۱

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F(t)$$

معادله ۰-۲

$$\begin{cases} x_1 = u \\ x_2 = \dot{u} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m}(F(t) - cx_2 - kx_1) \end{cases}$$

معادله ۰-۳

$$X_{dot}(x_1, x_2, t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F(t)}{m} \end{bmatrix}$$

در روش رانگ کوتا با استفاده از پاسخ گام n (به صورت u_n و $\dot{u}_n$ یا به عبارت دیگر x_{1n} و x_{2n}) پاسخ گام

بعدی u_{n+1} و $\dot{u}_{n+1}$ با استفاده از معادلات زیر، بدست می آید:

خواهیم داشت:

معادله ۰-۴

$$K_1 = \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{21} \end{bmatrix} = x_{dot} \left(\begin{bmatrix} x_{1n} \\ x_{2n} \end{bmatrix}, t_n \right) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1n} \\ x_{2n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F(t_n)}{m} \end{bmatrix}$$

معادله ۰-۵

$$\begin{aligned} K_2 &= \begin{bmatrix} k_{21} \\ k_{22} \end{bmatrix} = x_{dot} \left(\begin{bmatrix} x_{1n} \\ x_{2n} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{21} \end{bmatrix}, t_n + \frac{dt}{2} \right) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} x_{1n} \\ x_{2n} \end{bmatrix} + \frac{dt}{2} \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{21} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F(t_n + \frac{dt}{2})}{m} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

معادله ۰-۶

$$\begin{aligned} K_3 &= \begin{bmatrix} k_{31} \\ k_{32} \end{bmatrix} = x_{dot} \left(\begin{bmatrix} x_{1n} \\ x_{2n} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} k_{21} \\ k_{22} \end{bmatrix}, t_n + \frac{dt}{2} \right) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} x_{1n} \\ x_{2n} \end{bmatrix} + \frac{dt}{2} \begin{bmatrix} k_{21} \\ k_{22} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F(t_n + \frac{dt}{2})}{m} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

معادله ۰-۷

$$\begin{aligned} K_4 &= \begin{bmatrix} k_{41} \\ k_{42} \end{bmatrix} = x_{dot} \left(\begin{bmatrix} x_{1n} \\ x_{2n} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} k_{31} \\ k_{32} \end{bmatrix}, t_n + dt \right) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} x_{1n} \\ x_{2n} \end{bmatrix} + dt \begin{bmatrix} k_{31} \\ k_{32} \end{bmatrix} \right) + \\ &\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F(t_{n+1})}{m} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

معادله ۸-۰

$$\begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1(n+1)} \\ \dot{x}_{1(n+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1n} \\ \dot{x}_{1n} \end{bmatrix} + \frac{1}{6} \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{21} \end{bmatrix} + 2 \begin{bmatrix} k_{21} \\ k_{22} \end{bmatrix} + 2 \begin{bmatrix} k_{31} \\ k_{32} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{41} \\ k_{42} \end{bmatrix}$$

در معادلات فوق، ماتریس ها با حروف بزرگ لاتین نشان داده شده اند.

در ادامه برنامه متلب رانگ کوتا (در راستای حل یک معادله ارتعاش آزاد سیستم یک درجه آزاد با جرم ۱ کیلوگرم، سختی ۱۰ نیوتن بر متر، میرایی ۵ درصد با جابه جایی اولیه ۰۱ متر، با استفاده از منطق نوشتاری معادلات فوق، ارائه شده است. از این برنامه به عنوان یک زیر برنامه، در برنامه اصلی، جهت حل معادله دیفرانسیل غیرخطی تلاطم، در برنامه اصلی پایان نامه استفاده شده است.

MATLAB Code:

```

clear all
clc
M=1;%Mass e.g Kg
K=100;%Stiifness e.g N/m
wn=sqrt(K/M);
T=2*pi/wn;
kissi=0.05;
C=2*M*wn*kissi;%Damping e.g N.sec/m
t=0:0.01:10;%step time
pt=sin(t)*0;%Ft excitation
pu=[0;1]*pt;
in=[.1;0];%e.g m
x=ode4u(@dxdt,t,in,pu,M,K,C);
disp=x(1,:);% khode motoghaer
velo=x(2,:);%moshtaghe marhale avale motoghayer
figure('Name','disp based on runge kutta
ode4u','NumberTitle','off')
plot(t,disp,'color','blue');
xlabel('Time (sec)');
ylabel('Disp (m)');
grid

```

پیوست د: مقاله های برگرفته از رساله

Abstract

Reducing the seismic sloshing in cylindrical storage floating roof tanks subjected to earthquake by using energy dissipators

Sloshing is the oscillation of liquid because of excitations such as sudden motion and acceleration induction, and due to this oscillation some forces and moments are exerted to the container of the liquid or the structures inside the liquid. Sloshing causes damage to tanks during earthquake. Various techniques have been used for reduction of sloshing, of which the major one is using baffles. Single layer floating roof tanks have had remarkable losses due to recent earthquakes, and this is while there are several ones of these oil tanks in Iran (only around 40 in Kharg island) and other parts of the world (1-million barrel tanks with 100 meters' diameter and 20 meters' height). Regarding the several cases of fire in these tanks and sinking of their roofs in past earthquakes, studying the seismic response of these tanks is of paramount importance strategically and economically. Furthermore, most of the existing tanks in Iran are very old, and in some cases it is more than 50 years since the start of their operation. In the reference code of the US for design of steel tanks it has stated that design of this type of tanks is out of the scope of that code. Regarding these facts, the main goal of this project is proposing a novel technique for reducing the sloshing and preventing the floating roof from sinking or from fire. In the proposed technique by using the inherent damping of the liquid through installation of a suspended annular baffle (SAB), which is located near the tank's bottom, it is tried to reduce the sloshing amplitude. First, the efficiency of the proposed technique was evaluated by applying it to a test tank by considering three different values for the liquid depth in it, once without SAB and once more with it, subjected to both harmonic and seismic excitations. Then, the dynamic equations which govern the sloshing phenomenon in a floating roof tank with and without SAB along were derived based on Lagrange equations, by using velocity potential function and considering the liquid drag force. It should be mentioned that in this formulation derivation the floating roof and the baffle were both assumed to be rigid. In the next step, a computer program was developed in MATLAB environment and by using it and doing many many cases of computations with modifications, and comparing the test results with the analytical results, a good agreement was achieved between the experimental and analytical values of the sloshing periods as well as the experimental and analytical time histories of sloshing subjected to both harmonic and seismic excitations, in both without and with SAB cases. The developed computer program can be used by the corresponding engineering community for preliminary analyses for prediction of the sloshing amplitude in cylindrical tanks. The results have shown that using the SAB reduces the maximum sloshing amplitude around 40% in average. It can be concluded from comparison of analytical and experimental results that with the existing nonlinearities due to the liquid damping and complexities of the slackness of the holding strings of the SAB, as well as the different behavior of the SAB in upward and downward motions, an average agreement of more than 95% for harmonic excitations and more than 90% for seismic excitations is observed between the experimental and analytical results.

Keywords: Earthquake induced sloshing in floating roof tanks, Suspended Annular Baffle (SAB), Shaking table test, Convective damping ratio, Seismic passive control in cylindrical tank, Swirling of the floating roof, Lagrange equations, Velocity potential function, Analytical solution for sloshing.



International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES)
PHD Thesis

Reducing the Seismic Sloshing in Cylindrical Floating Roof Storage Tanks by Using Energy Absorbers

By
Amirhossein. Soroor

Supervisor
Dr. Mahmood Hosseini

Advisor
Dr. Mohammadali Goudarzi

October 2018