

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک

رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تجربی و ارزیابی عددی فشار اعمال شده بر دیوار مخزن در حال تلاطم

نگارنده: مجید آقامحمدی

استاد راهنما:

دکتر علی سررشته‌داری

شهریور ۱۳۹۵



## فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم/ آقای مجید آقامحمدی به شماره دانشجویی ۹۱۰۰۷۷۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی تجربی و ارزیابی عددی فشار اعمال شده بر دیوار مخزن در حال تلاطم که در تاریخ ۹۵/۶/۱۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: **بسیار** امتیاز: **۱۸٫۵**)   دفاع مجدد  مردود

نوع تحقیق: نظری  عملی

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر علی سررشته داری	۱- استاد راهنمای اول
	_____	_____	۲- استاد راهنمای دوم
	_____	_____	۳- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر محسن نظری	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر محمد محسن شاهمردان	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر علی خالقی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاهمردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

# پدر و مادر عزیزم

به پاس زحماتشان...

# و آنان که دوست میدارند مرا

## تقدیر و سپاس

منت خدای را غزوّ جل که سیر زندگی ام را با چراغ دانش روشن کرد، بر خود لازم می‌دانم که از استاد گرامی جناب آقای دکتر علی

سررشته‌داری که در به انجام رساندن این پژوهش مرا یاری فرمودند، سپاسگزاری نمایم. همچنین از جناب آقای مهندس رسول قرایی بخاطر

ساخت سیستم آزمایشگاهی و همچنین از کمک‌های بی‌منت جناب آقای دکتر حمید احمدی، نهایت سپاس‌گذاری را دارم.

مجید آقا محمدی - شهریور ماه ۹۵

## تعهدنامه

این جانب مجید آقامحمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه " بررسی تجربی و ارزیابی عددی فشار اعمال شده بر دیوار مخزن در حال تلاطم" تحت راهنمایی دکتر علی سررشته‌داری متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج بانام " دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "Shahrood university of technology" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

### تاریخ:

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

پدیده تلاطم (Sloshing) یکی از پدیده‌های مهم مکانیک سیالات است که در طراحی مجموعه‌های سازه-سیالی (که سیال و سطح آزاد در آن‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کنند)، کاربرد فراوانی دارد. از جمله کاربردهای این پدیده می‌توان به کپسول‌های گاز LNG، جابه‌جایی‌های هوایی، جابه‌جایی‌های دریایی و کشتی‌ها اشاره کرد. نیروهای سیالی وارد بر مخزن‌های حاوی سیال منجر به انتخاب جنس و شکل هندسی مناسب برای این تجهیزات می‌شوند. به عبارت دیگر، به واسطه پدیده تلاطم، فشارهای فراوانی به ساختار مخزن‌های حاوی سیال وارد می‌شود. در بسیاری از موارد از تیغه میرا کننده جهت کاهش امواج تلاطم استفاده می‌شود.

هدف در این پژوهش این است که با بررسی تجربی فشار وارد از جانب سیال به دیواره‌های مخزن حامل سیال تحت تحریک جانبی را ارزیابی کنیم. نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر حضور تیغه میرا کننده (Baffle) جهت کاهش امواج تلاطم مورد بررسی قرار گرفته است. نهایتاً، ارتفاع بهینه تیغه میرا کننده را برای کمینه کردن فشار وارد بر دیواره، مشخص کنیم.

برای این منظور، یک مخزن مکعب مستطیل نیمه پر را که توسط منبع نیروی خارجی، تحت تحریک جانبی قرار گرفته است، مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای این منظور، یک سیستم آزمایشگاهی طراحی شده است که در آن یک مخزن مکعب مستطیل شکل تا ارتفاع مشخصی از مایع پر شده است. این مخزن توسط یک مکانیسم محرک مکانیکی (که به منبع مولد نیروی خارجی متصل شده است) تحت تحریک جانبی قرار می‌گیرد. تغییرات پارامترهایی نظیر سرعت چرخش موتور الکتریکی به عنوان منبع مولد نیرو، دامنه نوسان مخزن، ارتفاع سیال در داخل مخزن و همچنین ارتفاع تیغه میرا کننده تعبیه شده در مخزن، بررسی شده‌اند.

تیغه میرا کننده در وسط مخزن و به صورت عرضی در کف مخزن تعبیه شده است. ضخامت این تیغه نازک در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن ارتفاع تیغه میرا کننده ( $h_b$ ) و ارتفاع سیال ( $h$ )، بازه مورد بررسی به صورت  $0 \leq h_b/h \leq 1.66$  است. جهت ارزیابی دقیق‌تر، نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی تلاطم سیال در داخل یک مخزن با تیغه میرا کننده با داده‌های حال از شبیه‌سازی عددی مورد ارزیابی

قرار گرفته شده است و در مواردی که تیغه میرا کننده وجود دارد، مطابقت خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می شود.

**کلمات کلیدی:** تلاطم سیال، روش کسر حجمی محدود، تیغه میرا کننده، روش عددی



## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه، مفاهیم و مروری بر پژوهش های انجام شده	
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ تاریخچه	۸
۳-۱ تعریف مساله	۱۵
۴-۱ مروری بر فصل ها	۱۸
<b>فصل دوم: روش های مطالعه</b>	
۱-۲ دیدگاه تجربی	۲۰
۲-۲ دیدگاه تحلیلی	۲۰
۳-۲ دیدگاه عددی	۲۱
۱-۳-۲ بررسی دیدگاه های عددی با روش FE و FD و FV و SPH	۲۲
<b>فصل سوم: بررسی آزمایشگاهی</b>	
۱-۳ ساخت سیستم آزمایشگاهی	۳۴
۱-۱-۳ سیستم مولد نیرو	۳۵
۲-۱-۳ سیستم انتقال نیرو	۳۶
۳-۱-۳ محل قرارگیری مخزن و صفحه MDF	۳۹
۴-۱-۳ مخزن و تیغه های میراکننده	۴۰
۵-۱-۳ مانومتر	۴۲
۲-۳ نحوه قرارگیری مایع در مانومترها	۴۴
۳-۳ انجام آزمون های آزمایشگاهی	۴۶
۴-۳ بررسی تاثیرات تکان خوردن های مانومتر	۶۵
<b>فصل چهارم: شبیه سازی محاسباتی</b>	
۱-۴ نرم افزار OpenFOAM	۷۲
۲-۴ معادله های حاکم و ساختار عددی	۷۳
۳-۴ مدل سازی عددی	۷۸
۱-۳-۴ شبکه بندی و بررسی استقلال از شبکه	۷۸
۲-۳-۴ ایجاد حرکت هارمونیک	۸۳

## فصل پنجم: بررسی و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی

- ۱-۵ ساخت سیستم آزمایشگاهی..... ۸۶
- ۲-۵ رابطه بین تحریک و پاسخ در مانومتر..... ۹۱
- ۳-۵ بررسی داده های آزمایشگاهی با استفاده از نمودار نسبت تفاضل دامنه ..... ۹۷
- ۱-۳-۵ ترسیم نمودار های بی بعد..... ۱۰۲
- ۲-۳-۵ ترسیم نمودارهای مقایسه ای بی بعد..... ۱۰۷
- ۴-۵ بررسی داده های حاصل از شبیه سازی عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی .... ۱۱۱
- ۱-۴-۵ ترسیم نمودار های مقایسه ای بی بعد..... ۱۱۶

## فصل ششم: تحلیل نتایج ، نتیجه گیری و پیشنهادها

- ۱-۶ تحلیل نتایج ..... ۱۲۲
- ۱-۱-۶ تغییرات دامنه پاسخ با فرکانس تحریک در ارتفاع تیغه و ارتفاع مایع ثابت ..... ۱۲۴
- ۲-۱-۶ بررسی تاثیرات حضور تیغه روی دامنه تغییرات بی بعد در ارتفاع ثابت مایع .... ۱۲۸
- ۳-۱-۶ بررسی تاثیرات حضور تیغه روی دامنه تغییرات بی بعد در ارتفاع ثابت تیغه .... ۱۳۰
- ۴-۱-۶ بررسی و مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی..... ۱۳۱
- ۲-۶ پیشنهادها..... ۱۳۲
- پیوست ۱..... ۱۳۳
- پیوست ۲..... ۱۳۴
- پیوست ۳..... ۱۳۵
- مراجع ..... ۱۳۷

## فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: تلاطم مایع در مخزن .....	۲
شکل ۲-۱: تلاطم در مخازن کامیون های بارکش .....	۳
شکل ۳-۱: مخازن حاوی سیال مایع در فضاپیماها .....	۴
شکل ۴-۱: (الف) تلاطم شدید(ب) تلاطم آرام .....	۵
شکل ۱-۲: شبکه بندی(الف) مخزن صلب(ب) مخزن کشسان .....	۲۳
شکل ۲-۲: مقادیر متفاوت $\alpha$ در سلول های محاسباتی .....	۲۵
شکل ۳-۲: (الف) شکل دقیق(ب) استفاده از المان های قایم .....	۲۷
شکل ۴-۲: بردار نرمال بر سطح المان تقریب زده شده .....	۲۸
شکل ۵-۲: (الف) شکل دقیق(ب) استفاده از المان های شیب دار .....	۲۹
شکل ۶-۲: بردار نرمال شیب دار بر سطح المان تقریب زده شده .....	۲۹
شکل ۷-۲: شبیه سازی تلاطم با استفاده از روش SPH .....	۳۰
شکل ۱-۳: طرح کلی مجموعه آزمایشگاهی .....	۳۵
شکل ۲-۳: (الف) موتور AC استفاده شده(ب) مشخصات موتور .....	۳۶
شکل ۳-۳: (الف) اینورتر(ب) مشخصات موتور .....	۳۷
شکل ۴-۳: نمایش راستای یکسان پولی موتور و شیار پولی آلومینیومی .....	۳۷
شکل ۵-۳: طرح سیستم انتقال قدرت .....	۳۸
شکل ۶-۳: (الف) مکانیسم انتقال قدرت(ب) چیدمان مکانیسم انتقال قدرت .....	۳۸
شکل ۷-۳: (الف) نحوه اتصال شاتون به صفحه آلومینیومی(ب) شاتون به همراه پین های اتصالی و مهره .....	۳۹
شکل ۸-۳: محل قرارگیری مخزن روی صفحه متحرک .....	۴۰
شکل ۹-۳: نحوه اتصال سازه فلزی صفحه متحرک شاتون .....	۴۰
شکل ۱۰-۳: (الف) نحوه قرارگیری صفحه متحرک روی صفحه ثابت(ب) صفحه ثابت به همراه ریل ها .....	۴۱
شکل ۱۱-۳: (الف) مخزن بدون امکان نصب تیغه میراکننده (ب) مخزن با امکان نصب تیغه میراکننده .....	۴۲
شکل ۱۲-۳: مخزن به همراه درپوش پلاستیکی تعبیه شده .....	۴۲
شکل ۱۳-۳: سیستم آزمایشگاهی نصب شده بر روی صفحه تخت .....	۴۳
شکل ۱۴-۳: آزمون تراز بودن مخزن .....	۴۳
شکل ۱۵-۳: صفحه عمودی به همراه مانومترهای تعبیه شده روی آن .....	۴۴
شکل ۱۶-۳: صفحه مانومتری عمود شده به وسیله پایه .....	۴۴
شکل ۱۷-۳: مخزن به همراه صفحه مانومتری و مانومترهای تعبیه شده .....	۴۵
شکل ۱۸-۳: شمای کلی مخزن به همراه مانومتر در حالت ارتفاع یکسان مایع در مانومتر .....	۴۵
شکل ۱۹-۳: (الف) ارتفاع یکسان مایع در مانومترها (ب) ارتفاع متفاوت مایع در مانومترها .....	۴۶
شکل ۲۰-۳: نمودار انحراف معیار .....	۵۰
شکل ۱-۴: نمایش تمام حرکت های یک جسم شناور .....	۷۴
شکل ۲-۴: ریوس و بلوک های مخزن بدون تیغه میراکننده .....	۷۷
شکل ۳-۴: ریوس و بلوک های مخزن با تیغه میراکننده .....	۷۷
شکل ۴-۴: شبکه بندی مخزن بدون وجود تیغه میراکننده .....	۷۹

- شکل ۴-۵: شبکه بندی مخزن با وجود تیغه میراکننده ..... ۷۹
- شکل ۴-۶: نمودار بررسی استقلال از شبکه ..... ۸۰
- شکل ۴-۷: محل قرار گیری تیغه در وسط مخزن ..... ۸۰
- شکل ۴-۸: حرکت نوسانی رفت و برگشتی متقارن مخزن ..... ۸۱
- شکل ۵-۱: رفتار استاتیک مایع درون مانومتر ..... ۸۴
- شکل ۵-۲: طرح کلی سیستم آزمایشگاهی ..... ۸۵
- شکل ۵-۳: صفحه دوار تعبیه شده ..... ۸۶
- شکل ۴-۵: صفحه متصل به موتور الکتریکی ..... ۸۶
- شکل ۵-۵: نصب صفحه دوار روی پولی موتور ..... ۸۷
- شکل ۶-۵: صفحه دوار به همراه مخزن شامل مایع ..... ۸۷
- شکل ۵-۷: مخزن به همراه صفحه اندازه گذاری شده عمودی ..... ۸۸
- شکل ۵-۸: نمای کلی سیستم آزمایشگاهی ساخته شده ..... ۸۸
- شکل ۹-۵: نمودار تغییرات نسبت تفاضل دامنه بر حسب دامنه پاسخ در فرکانس تحریک  $0.2$  هرتز ..... ۹۲
- شکل ۱۰-۵: نمودار تغییرات نسبت تفاضل دامنه بر حسب دامنه پاسخ در فرکانس تحریک  $0.35$  هرتز ..... ۹۲
- شکل ۱۱-۵: نمودار تغییرات نسبت تفاضل دامنه بر حسب دامنه پاسخ در فرکانس تحریک  $0.62$  هرتز ..... ۹۳
- شکل ۱۲-۵: نمودار تغییرات نسبت تفاضل دامنه بر حسب فرکانس های تحریک در دامنه  $0.5$  سانتی متر ..... ۹۳
- شکل ۱۳-۵: نمودار تغییرات نسبت تفاضل دامنه بر حسب فرکانس های تحریک در دامنه  $1/4$  سانتی متر ..... ۹۴
- شکل ۱۴-۵: نمودار تغییرات نسبت تفاضل دامنه بر حسب فرکانس های تحریک در دامنه  $2/5$  سانتی متر ..... ۹۴
- شکل ۱۵-۵: نمودار ۳ بعدی تغییرات نسبت تفاضل دامنه بر حسب تغییرات دامنه پاسخ و فرکانس تحریک ..... ۹۵
- شکل ۱۶-۵: نمودارهای بی بعد نسبت دامنه ها بر حسب نسبت فرکانس ها در حالت عدم وجود تیغه میراکننده ..... ۱۰۱
- شکل ۱۷-۵: نمودارهای بی بعد نسبت دامنه ها بر حسب نسبت فرکانس ها در حالت وجود تیغه ۶ سانتی متر ..... ۱۰۲
- شکل ۱۸-۵: نمودارهای بی بعد نسبت دامنه ها بر حسب نسبت فرکانس ها در حالت وجود تیغه ۸ سانتی متر ..... ۱۰۳
- شکل ۱۹-۵: نمودارهای بی بعد نسبت دامنه ها بر حسب نسبت فرکانس ها در حالت وجود تیغه ۱۰ سانتی متر ..... ۱۰۴
- شکل ۲۰-۵: نمودار مقایسه‌ای بی بعد در ارتفاع‌های متفاوت تیغه و ارتفاع مایع ۶ سانتی متر ..... ۱۰۵
- شکل ۲۱-۵: نمودار مقایسه‌ای بی بعد در ارتفاع‌های متفاوت تیغه و ارتفاع مایع ۱۰ سانتی متر ..... ۱۰۶
- شکل ۲۲-۵: نمودار مقایسه‌ای بی بعد در ارتفاع‌های متفاوت تیغه و ارتفاع مایع ۱۴ سانتی متر ..... ۱۰۶
- شکل ۲۳-۵: نمودار مقایسه‌ای بی بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و حالت عدم وجود تیغه میراکننده ..... ۱۰۷
- شکل ۲۴-۵: نمودار مقایسه‌ای بی بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و وجود تیغه ۶ سانتی متر ..... ۱۰۷
- شکل ۲۵-۵: نمودار مقایسه‌ای بی بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و وجود تیغه ۸ سانتی متر ..... ۱۰۸
- شکل ۲۶-۵: نمودار مقایسه‌ای بی بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و وجود تیغه ۱۰ سانتی متر ..... ۱۰۸
- شکل ۲۷-۵: نمودارهای مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی در حالت عدم وجود تیغه میراکننده ..... ۱۱۰
- شکل ۲۸-۵: نمودارهای مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی در حالت وجود تیغه ۶ سانتی متر ..... ۱۱۱
- شکل ۲۹-۵: نمودارهای مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی در حالت وجود تیغه ۸ سانتی متر ..... ۱۱۲
- شکل ۳۰-۵: نمودارهای مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی در حالت وجود تیغه ۱۰ سانتی متر ..... ۱۱۳
- شکل ۳۱-۵: نمودارهای مقایسه‌ای بی بعد در ارتفاع‌های متفاوت تیغه و ارتفاع مایع ۶ سانتی متر ..... ۱۱۴
- شکل ۳۲-۵: نمودارهای مقایسه‌ای بی بعد در ارتفاع‌های متفاوت تیغه و ارتفاع مایع ۱۰ سانتی متر ..... ۱۱۵
- شکل ۳۳-۵: نمودارهای مقایسه‌ای بی بعد در ارتفاع‌های متفاوت تیغه و ارتفاع مایع ۱۴ سانتی متر ..... ۱۱۵
- شکل ۳۴-۵: نمودارهای مقایسه‌ای بی بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و حالت عدم وجود تیغه ..... ۱۱۶

- شکل ۵-۳۵: نمودارهای مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و حالت وجود تیغه ۶ سانتی‌متر..... ۱۱۶
- شکل ۵-۳۶: نمودارهای مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و حالت وجود تیغه ۸ سانتی‌متر..... ۱۱۷
- شکل ۵-۳۷: نمودارهای مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و حالت وجود تیغه ۱۰ سانتی‌متر..... ۱۱۷
- شکل ۶-۱: نمودار لگ (تاخیر) زمانی و اختلاف دامنه بین تحریک و پاسخ..... ۱۲۲
- شکل ۶-۲: نمودار بی‌بعد تغییرات نسبت دامنه بر حسب نسبت فرکانس..... ۱۲۵

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۷.....	جدول ۱-۱: تحقیق حاضر.....
۳۱.....	جدول ۱-۲: مدل های عددی تلاطم.....
۵۰.....	جدول ۱-۳: گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حالت عدم وجود تیغه میراکننده.....
۵۴.....	جدول ۲-۳: گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حالت وجود تیغه میراکننده ۶ سانتی متر.....
۵۸.....	جدول ۳-۳: گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حالت وجود تیغه میراکننده ۸ سانتی متر.....
۶۲.....	جدول ۴-۳: گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حالت وجود تیغه میراکننده ۱۰ سانتی متر.....
۶۸.....	جدول ۵-۳: دامنه تغییرات ارتفاع مایع در حالت مخزن خالی.....
۷۴.....	جدول ۱-۴: ضرایب به کار رفته در حرکت مخزن.....
۹۰.....	جدول ۱-۵: حالات متفاوت در نظر گرفته شده از بین تمامی داده ها.....
۹۱.....	جدول ۲-۵: تحریک های مرتبط به پاسخ های در نظر گرفته شده.....
۹۸.....	جدول ۳-۵: موارد قابل قبول داده ها به همراه کمیت های بی بعد در حالت وجود تیغه میراکننده.....
۹۸.....	جدول ۴-۵: موارد قابل قبول داده ها به همراه کمیت های بی بعد در حالت وجود تیغه میراکننده ۶ سانتی متر.....
۹۹.....	جدول ۵-۵: موارد قابل قبول داده ها به همراه کمیت های بی بعد در حالت وجود تیغه میراکننده ۸ سانتی متر.....
۹۹.....	جدول ۶-۵: موارد قابل قبول داده ها به همراه کمیت های بی بعد در حالت وجود تیغه میراکننده ۱۰ سانتی متر.....

## فهرست علائم و اختصارات

عنوان	علامت اختصاری	عنوان	علامت اختصاری
سطح مقطع	$A$	لزجت	$\mu$
تابع کسر حجمی	$\alpha$	مختصات مرکز نوسان	$CofG$
حجم سیال مورد نظر	$V_i$	نسبت مقیاس مدل	$Imada$
حجم سیال	$V$	بیشترین دامنه چرخش	$rollA\ max$
خاصیت سیال	$\varphi$	کمترین دامنه چرخش	$rollA\ min$
بردار نرمال بر سطح	$m$	حرکت بالا و پایین	$heaveA$
مولفه افقی بردار نرمال	$m_x$	حرکت چپ و راست	$SwayA$
مولفه عمودی بردار نرمال	$m_y$	ضریب میرایی	$Q$
چگالی سیال	$\rho$	زمان تناوب	$T_p$
چرخش سینوسی	$\theta$	تناوب طبیعی مخزن	$T_{pn}$
دامنه چرخش سینوسی	$\theta_0$	تناوب چرخش جریان	$T_{pi}$
زمان	$t$	گام زمانی مرجع	$dT_i$
فرکانس تحریک	$\omega$	افزایش زمان تناوب برحسب گام زمانی مرجع	$dT_p$
شعاع	$r$	فرکانس جریان	$\omega_r$
فشار	$P$	سرعت	$u$
فشار هوا	$P_0$	فاز جریان برای چرخش	$ph_r$
شتاب گرانش زمین	$g$	فاز جریان در حرکت به چپ و راست	$ph_s$
ارتفاع سیال	$h$	فاز جریان در حرکت به بالا و پایین	$ph_h$
سرعت	$U$	کواتر نیون چرخش	$R$

عنوان	علامت اختصاری	عنوان	علامت اختصاری
سپترنیون چرخش	$TR$	قطر داخلی مانومتر	$d$
دامنه تحریک	$d_1$	نیروی اصطکاک	$F_f$
دامنه پاسخ	$d_2$	نیروی حاصل از فشار	$F_s$
فرکانس تشدید	$\omega_n$	نسبت میرایی	$\zeta$
طول شامل مایع در مانومتر	$L$	زمان بی بعد	$\tau$
دامنه پاسخ	$Amp_{out}$	دامنه تحریک سینوسی	$H$
دامنه تحریک در مخزن	$Amp_{in}$	تاخیر زمانی	$T_{lag}$
نیروی حاصل از شتاب	$F_a$	وزن مایع	$W$
نسبت تفاضل دامنه	$R.A.D$	گرادیان	$\Delta$
ماکزیمم نسبت تفاضل دامنه	$M.R.A.D$		

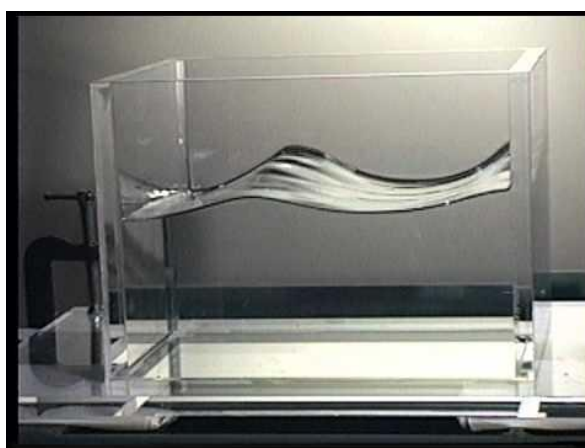


فصل اول

مقدمه، مفاهیم و مروری بر پژوهش‌های انجام شده

## ۱-۱ مقدمه

هنگامی که مخزنی شامل سیال مایع، تحت تحریکی نظیر جابجایی قرار گیرد، مایع درون آن شروع به نوسان نموده، در اثر این حرکت نوسانی، نیرو و گشتاوری از طرف مایع به ظرف آن اعمال می‌شود. این حرکت نوسانی که به اصطلاح تلاطم<sup>۱</sup> سیال خوانده می‌شود در اثر تغییر عوامل مؤثر در آن، می‌تواند اثرات مختلفی بر سازه یا یک مخزن متحرک داشته باشد.



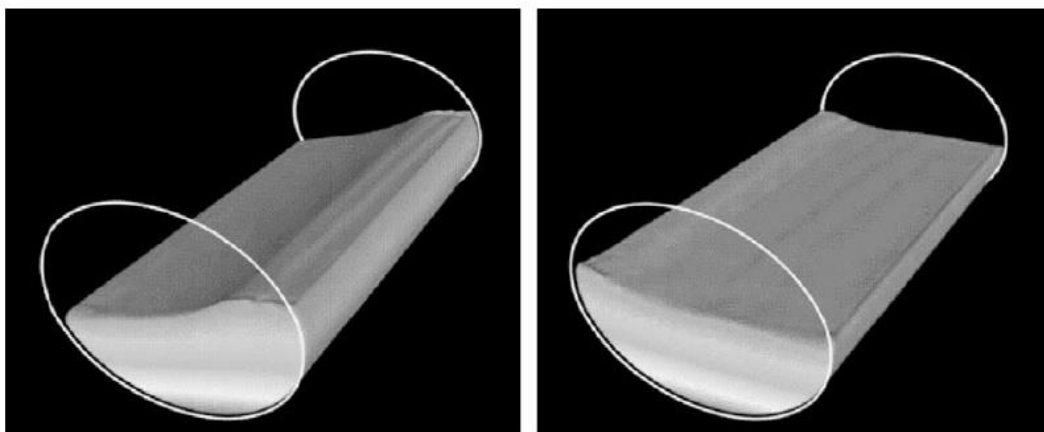
شکل (۱-۱) تلاطم مایع در مخزن

تلاطم سیال در مخزن یکی از پدیده‌های مهم در مکانیک سیالات است که کاربرد فراوانی را در طراحی مجموعه‌های سازه-سیالی دارد. به‌طور مثال نیروهای ناشی از تلاطم در طراحی مخازن و کشتی‌های حامل گاز طبیعی مایع<sup>۲</sup> (LNG) [۱،۲] بسیار مهم است. وجود حرکات نوسانی و تحریک‌های مختلف جابجایی در خودروها و کشتی‌ها، نیروهای نوسانی زیادی در مخازن حاوی مایع ایجاد می‌کند که سبب شکل‌گیری تلاطم در سطح آزاد مایع شده و فشارهای دینامیکی قابل‌ملاحظه‌ای بر ساختار مخزن وارد می‌سازد [۳]. به‌علاوه سرریز شدن مخازن با سطح آزاد مایع در برخی از کاربردهای صنعتی، یک مشکل اساسی در طراحی ساختار مخزن و ظروف حاوی مایع به‌ویژه در حامل‌های متحرک است.

<sup>۱</sup> Sloshing<sup>۲</sup> Liquefied Natural Gas

پدیده حرکت مایع در مخزن یا تلاطم آن که گاهی اثر ضربانی مایع نامیده می‌شود، نوعی حرکت نوسانی<sup>۱</sup> است که در موارد مختلف صنعتی و کاربردی اهمیت یافته است و شناخت دقیق این پدیده را حیاتی می‌سازد. از جمله موارد کاربردی که این پدیده در آن‌ها مشاهده می‌گردد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- دستگاه‌های خودکار و خطوط بسته‌بندی مایع‌ها نظیر مواد آشامیدنی
- روبات‌های حامل سیال که در موارد مختلفی مانند ذوب فلزها و یا انتقال مایع‌های سمی و خطرناک بکار می‌روند.
- مخازن ثابتی که تحت تحریک نوسانی قرار می‌گیرند. نظیر منابع ذخیره آب تحت زمین‌لرزه [۴-۶].
- صنعت خودرو و مسابقات اتومبیل‌رانی [۷، ۸، ۹].
- مسئله شکست مانع<sup>۲</sup> و ریزش مایع که تا حدی می‌تواند به تلاطم وابسته شود [۱۰].
- مخازن یا تانکرهای متحرک حامل سیال‌های مایع اعم از کامیون‌های بارکش و کشتی‌های حمل سوخت مایع [۱۱، ۱۲، ۱۳].

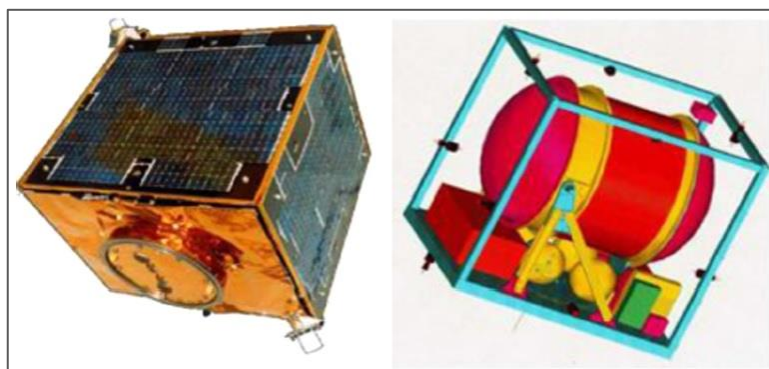


شکل (۱-۲) تلاطم در مخازن کامیون‌های بارکش [۷]

<sup>۱</sup> منظور از حرکت نوسانی همان تلاطم و حرکت حجمی مایع است که در مقاله‌ها و منابع به‌عنوان *sloshing* از آن نام‌برده می‌شود. در اینجا از هر دو لفظ تلاطم و حرکت نوسانی استفاده می‌شود. در ضمن این اصطلاح، اثر ضربانی مایع نیز نام‌برده شده است.

<sup>۲</sup> Dam Break

- وسایل نقلیه هوایی نظیر هواپیماها، موشک‌ها، فضاپیماها و ماهواره‌ها [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷].



شکل (۱-۳) مخزن حاوی سیال مایع در فضاپیما [۱۷]

این پدیده از دو منظر متفاوت و در دوشاخه از علوم مطرح می‌گردد. یکی از این مباحث علم هیدرودینامیک<sup>۱</sup> است که به این اثر از دید هیدرودینامیکی پرداخته، تنها بحث سیال و نحوه رفتار سیالاتی آن را مطرح می‌سازد. دیدگاه دیگر به این موضوع از نظر هیدروالاستیسیت<sup>۲</sup> است که در آن تداخل یا برخورد دینامیکی بین تغییر شکل‌های الاستیک مخزن و حرکت مایع درونی آن مدنظر قرار می‌گیرد.

این دیدگاه از نظر ویژگی تداخلی آن دارای ماهیتی پیچیده است. لذا نیاز به دقت و بررسی بیشتری دارد و تنها در مواردی مورد استفاده قرار می‌گیرد که به علت وجود سختی اندک جداره ظرف یا سازه تشکیل دهنده مخزن، نتوان از فرض تداخل دینامیکی بین تغییر شکل‌های مخزن و حرکت مایع داخل آن صرف نظر نمود و یا به عبارت دیگر نتوان ظرف محتوی مایع یا مخزن را صلب فرض کرد. اگر درون هر جسم الاستیک نظیر یک ظرف یا مخزن مایعی به هر دلیلی حرکت یا شتاب پیدا کند الزاماً تغییر شکل‌هایی به صورت الاستیک روی می‌دهد که این تغییر شکل‌ها سبب ایجاد تغییر در چگونگی حرکت و شتاب مایع داخل مخزن شده، در نتیجه این امر به صورت یک تداخل دینامیکی بین جسم الاستیک و مایع داخلی آن نمود می‌یابد. حال اگر جسم مورد نظر دارای سختی سازه‌ای کمی باشد تغییر شکل‌های آن زیادتر بوده است، اثرات این تداخل دینامیکی شدیدتر خواهد بود.

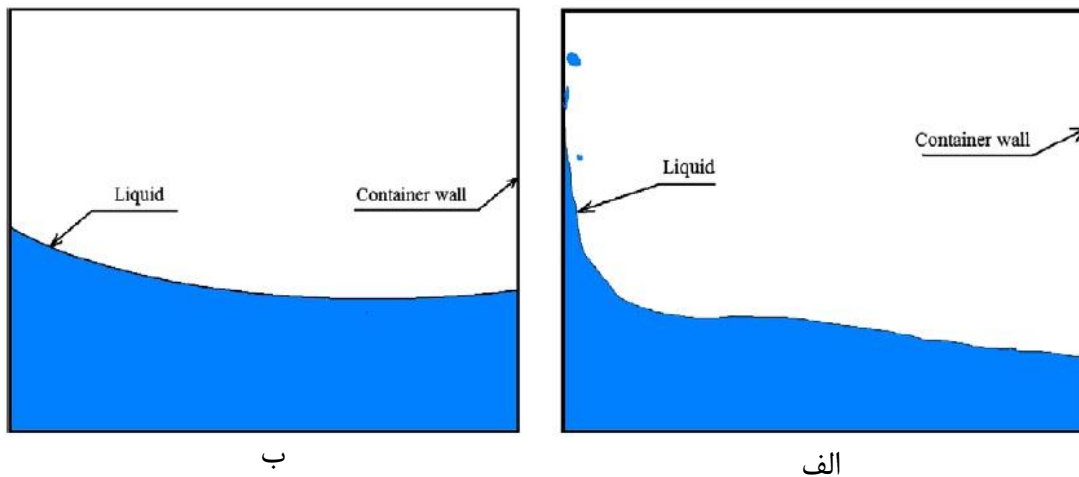
<sup>1</sup> Hydro Dynamic

<sup>2</sup> Hydro Elasticity

در صورتی که اگر سختی سازه‌ای جسم زیاد باشد، به علت محدودیت تغییر شکل‌های سازه‌ای، اثر این تداخل کم می‌گردد به طوری که در نهایت تنها اثر باقیمانده از این تداخل دینامیکی در یک ظرف صلب، اثرات ضربه و برخورد مایع به جداره‌های ظرف است.

در مورد اجسام متحرکی که مخازن حامل مایع‌ها را حمل می‌کنند مسئله تا حدودی متفاوت است. در این مورد، اثرات لرزش‌های الاستیک این جسم، سبب ایجاد نوعی تداخل دینامیکی بین حرکت مایع داخلی مخزن و چگونگی حرکت جسم و تغییر شکل‌های الاستیک بدنه آن خواهد شد؛ بنابراین مسئله وجود حرکت در مایع داخلی مخزن، در طراحی سازه جسم و نیز دینامیک حرکت آن مؤثر است.

پدیده تلاطم را می‌توان از دیدگاه‌های دیگری نیز دسته‌بندی نمود. یکی از این دیدگاه‌ها که تلاطم را به دو نوع تقسیم می‌کند عبارت است از: تلاطم آرام<sup>۱</sup> (دامنه کوچک) و تلاطم شدید<sup>۲</sup> (دامنه بزرگ) که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۱-۴) (الف) تلاطم شدید (ب) تلاطم آرام [۱۸]

به طور کلی برای تلاطم با دامنه کوچک، نتایج عددی به دست آمده در تحقیق‌ها مطابقت نسبتاً خوبی با تئوری‌های خطی دارد. همچنین با افزایش دامنه تلاطم، اختلاف بین نتایج عددی و حل‌های تحلیلی به دلیل امواج شدید غیرخطی در فرایند تلاطم، افزایش می‌یابد [۱۹].

<sup>1</sup> Smooth Sloshing

<sup>2</sup> Violent Sloshing

دیدگاه دیگری که می‌توان از آن برای دسته‌بندی پدیده تلاطم استفاده کرد، بررسی این پدیده در شرایط گرانشی متفاوت است. از این منظر تلاطم به دودسته تلاطم در میدان گرانشی کم<sup>۱</sup> و تلاطم در میدان گرانشی زیاد<sup>۲</sup> تقسیم می‌گردد. در این دسته‌بندی وسایلی نظیر ماهواره‌ها در میدان گرانشی کم و مخازن متحرکی چون تانکرهای حمل‌ونقل مایع‌ها، کشتی‌های حمل سوخت و موشک‌های سوخت مایع که مشخصاً میدان گرانشی حاکم بر آن‌ها برابر با میدان گرانشی زمین و یا بیشتر از آن است، در میدان گرانشی زیاد بررسی می‌گردد. نکته مهمی که سبب این تفاوت بوده است و باعث این‌گونه دسته‌بندی نیز است، تأثیر جاذبه کم در تلاطم است که با مشخصه‌هایی به نحوه برخورد سیال مایع با سطح جامد، مرتبط است.

این مشخصه‌ها عبارت‌اند از: نیروهای تنش سطحی، زاویه برخورد و منحنی سطح آزاد سیال، در نتیجه در چنین تحلیلی اثر نیروهای کشش سطح سیال اهمیت یافته و در معادله‌های حاکم قابل توجه می‌شوند و نمی‌توان از اثر چنین نیروهایی در مقایسه با دیگر نیروها نظیر لزجت صرف‌نظر نمود. تحلیل چنین اثری در مخازن به پارامترها و عوامل مختلفی بستگی دارد که از آن‌ها می‌توان به شکل هندسی، ویژگی‌های سیال درون مخزن، میرایی مؤثر، ارتفاع سیال در مخزن میدان شتاب و حرکت اغتشاشی مخزن اشاره کرد [۲۰].

مخازن نیمه‌پر در معرض تلاطم شدید، تحت شرایط دینامیکی خاصی قرار می‌گیرند. برای مثال وقتی فرکانس حرکت مخزن نزدیک به فرکانس طبیعی برهم‌کنش بین سیال متلاطم و سازه باشد، حرکت سیال افزایش می‌یابد و باعث ایجاد فشار ضربه‌ای شدید و متمرکز بر روی دیوارها و سقف مخزن می‌گردد که می‌تواند باعث خرابی مخزن شود [۲۱]. علاوه بر این تلاطم وقتی به وسیله تشدید افزایش می‌یابد، می‌تواند تأثیر مخربی بر پایداری وسیله حمل‌ونقل بگذارد [۲۲، ۲۳]؛ بنابراین بایستی پدیده تلاطم و رفتار برهم‌کنش سازه سیال در طراحی مخازن بررسی شود. طراحی مخازن اعم از

<sup>1</sup> Low or Micro Gravity

<sup>2</sup> High Gravity

شکل مورد استفاده شده با رفتار کشسان<sup>۱</sup>، ویسکوالاستیک<sup>۲</sup> و الاستوپلاستیک<sup>۳</sup> می‌تواند تأثیر مهمی در تضعیف دینامیکی امواج تلاطم داشته باشد [۲۴]. در بسیاری از موارد، تیغه‌های میرا کننده (بافل) در داخل مخازن استفاده شده است که در کاهش امواج تلاطم مؤثر است [۲۵].

بررسی مسئله اثرهای حرکت مایع داخل مخازن در اجسام متحرک پرنده از حساسیت زیادی برخوردار است. در این موارد ظریف بودن بیش از حد سازه در صورت عدم تغییر جنس، به علت نیاز به کاهش وزن در این وسایل امری الزامی است سبب کاهش سختی سازه‌ای در این مخازن می‌گردد. در حالات دیگر می‌توان با استفاده از جنس‌های دیگر نظیر فیبر کربن با ضخامت ناچیز مقاومت خیلی زیادی را در مخازن ایجاد کرد. در نتیجه تغییر شکل‌های نسبتاً بزرگی در آن‌ها روی می‌دهد. همچنین این اجسام اغلب مخازن بزرگی از سوخت مایع را حمل می‌کنند؛ که این مسئله عامل مهمی در تأثیر پدیده حرکت مایع درونی مخازن در عمل کرد آن‌ها است. علاوه بر این حرکت این نوع وسایل اغلب همراه با شتاب، جابجایی و تغییرهای ناگهانی در حرکت است که این امر به نوبه خود سبب تحریک مایع داخلی مخازن سوخت و ایجاد تلاطم در آن‌ها می‌گردد. این تحریک‌ها در یک وسیله پرنده ممکن است در اثر مواردی چون تندبادها، تغییر برنامه‌ای در وضعیت وسیله مورد نظر، پالس‌های کنترلی وضعیت پایداری و ضربه‌های ناشی از جدایش ایجاد گردد.

مهم‌ترین زمانی که اثر حرکت مایع درونی، در دینامیک حرکت سازه مؤثر باشد، زمانی است که اولاً فرکانس تحریک مایع داخلی مخزن کوچک باشد [۲۶] (بین ۰ تا ۱۰ هرتز)، ثانیاً ارتفاع پرشدگی مخزن مورد مطالعه کم باشد. ولی در مجموع باید جرم مایع داخلی مخزن نسبت به جرم کل جسم زیاد باشد. به علاوه در طراحی وسایل پرنده، بررسی پدیده حرکت مایع درونی مخزن، هنگامی که تعادل نیرویی، سطح پایینی از پایداری را برای این وسیله ایجاد کرده باشد و باهدف حداقل نمودن استفاده از مکانیسم‌های کنترلی<sup>۴</sup> جهت کاهش مقدار مانورهای پروازی لازم برای کنترل جسم در مسیر

<sup>1</sup> Elastic

<sup>2</sup> Viscoelastic

<sup>3</sup> Elastoplastic

<sup>4</sup> Optimal Design of Control System

معین شده باشد، الزامی می‌شود.

## ۲-۱ تاریخچه

در مورد بررسی پدیده تلاطم مراجع و منابع مختلفی وجود دارد و پژوهش‌های ارزشمندی در این زمینه انجام شده است که به بیان برخی از این موارد در زیر می‌پردازیم:

از جمله تحقیقات پیشرو در زمینه دیدگاه‌های تحلیلی مایع متلاطم می‌توان به تحقیقات آبرامسون<sup>۱</sup> [۲۷] اشاره کرد و با وجود گذشت چندین سال از این پژوهش هنوز به‌عنوان یک مرجع اساسی در مطالعه‌های بسیاری استفاده می‌شود. از معادله‌های ریاضی، ارزیابی‌های آزمایشگاهی و مدل‌های محاسباتی آن در برآورد تقریبی مقادیر فرکانس‌های تلاطم و همچنین تعیین ارتفاع بیشینه مایع متلاطم و نیز الگوی سطح آزاد استفاده می‌شود. از جمله پژوهش‌هایی که در آن راه‌حل‌های تحلیلی برای یافتن معادله‌های دینامیکی مایع متلاطم جهت استخراج شکل موده‌های سطح آزاد ارائه شده است می‌توان به تحقیقات ابراهیم<sup>۲</sup> [۲۸] اشاره داشت.

در یک مطالعه تجربی- عددی از هاکان آکیلدیز<sup>۳</sup> [۲۹] تلاطم سیال مایع در یک مخزن مستطیلی شکل با تیغه‌های میرا کننده<sup>۴</sup> با استفاده از الگوریتم عددی روش کسر حجمی سیال<sup>۵</sup> (VOF) مورد بررسی قرار داده شده است تا رفتار غیرخطی سیال متلاطم را مورد بررسی قرار دهد. میزان نسبت ارتفاع تیغه میرا کننده به ارتفاع اولیه مایع درون مخزن در بازه ۰ تا ۱/۲ تغییر می‌کند. مشاهدات نشان می‌دهد که گرداب‌های ایجاد شده به وسیله جدایی جریان سیال از نوک تیغه، با افزایش ارتفاع تیغه ضعیف‌تر می‌شود و نتایج حاصل از حل عددی با نتایج حاصل از بررسی تجربی مورد مقایسه قرار گرفته و مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

در تحقیقی دیگر از مارکیو میچیهارو تسوکاماتو<sup>۶</sup> و همکاران [۳۰] به مطالعه تحلیلی و عددی

<sup>1</sup> Abramson

<sup>2</sup> Ibrahim

<sup>3</sup> Hakan Akyildiz

<sup>4</sup> Baffle

<sup>5</sup> Volume of Fluid

<sup>6</sup> Marchio Michiharu Tsukamoto



تأثیرهای اتصال جسم کشسان بر تلاطم در داخل مخزن پرداخته شده است. دیدگاه تحلیلی بر اساس روش ذرات متحرک نیمه ضمنی<sup>۱</sup> است و در پایان نتایج حاصل از هر دو دیدگاه باهم مقایسه شده است.

از جمله مطالعات دیگر می‌توان به فعالیت تجربی - عددی برن هارد دریک<sup>۲</sup> و همکاران [۳۱] که در آن به بررسی تلاطم عرضی مخزن نیمه پر با استفاده از مدل چند فازي ناهمگن<sup>۳</sup> پرداخته شده است. بررسی سرعت نسبی در سطح مشترک سیال تأیید می‌کند که مدل ناهمگن با استفاده از برخی از فرض‌ها، مدل مناسبی برای شبیه‌سازی جریان متلاطم است.

در این زمینه در یک پژوهشی از سید محمد هاشمی نژاد و مصطفی آقا بیگی [۳۲]، تأثیرات تیغه‌های عمودی متصل شده در کف ظرف بر روی مشخصه‌های تلاطم دوبعدی سیال در یک مخزن استوانه‌ای شکل غیرقابل تغییر شکل پذیر و با مقطع بیضی شکل بررسی و همچنین تأثیر تیغه‌های عمودی بر روی مودهای فشار هیدرودینامیکی جریان متلاطم مورد بررسی قرار گرفته است.

از جمله فعالیت‌های تجربی - عددی دیگر از سید محمد هاشمی نژاد و مصطفی آقا بیگی [۳۳] می‌توان به شبیه‌سازی عددی تلاطم گذرا در مخازن استوانه‌ای که تحت تحریک عرضی قرار دارند، اشاره کرد که در آن تأثیر نسبت ابعاد مخزن، زمان ورودی تحریک و موقعیت تیغه در داخل مخزن بر روی ویژگی‌های تلاطم مورد بررسی قرار گرفته است.

در یک مطالعه تجربی - عددی دیگر چی هووا وو<sup>۴</sup> و بنگ فو چن<sup>۵</sup> [۳۴] به بررسی امواج تلاطم و مودهای تشدید سیال در یک مخزن مستطیلی به روش تفاضل محدود مستقل از زمان<sup>۶</sup> پرداخته شده است و نتایج حاصل در آن با مطالعه‌های قبلی مقایسه گردیده است.

<sup>1</sup> *Moving Particle semi-implicit*

<sup>2</sup> *Bernhard Godderidge*

<sup>3</sup> *Inhomogeneous Multiphase Model*

<sup>4</sup> *Chih Hua Wu*

<sup>5</sup> *Bang Fuh Chen*

<sup>6</sup> *Time Independed Finite Difference*

در نمونه‌ای دیگر از تحقیق‌های تجربی - عددی فالتینسن<sup>۱</sup> و تیموخا<sup>۲</sup> [۳۵] به محاسبه نیروهای ناشی از تلاطم برای طراحی تجهیزات در صنایع دریایی پرداخته شده است. در این کارها تمرکز اصلی بر یافتن نیروهای ناشی از تلاطم و به‌ویژه توزیع فشار ناگهانی بر روی بدنه سازه‌های مورد مطالعه بوده است.

در مطالعه پال و همکاران [۳۶] با روش بدون شبکه‌بندی محلی پتروو - گالرکین<sup>۳</sup> به محاسبه پاسخ غیرخطی تلاطم مایع در مخزن صلب دوبعدی پرداخته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نتایج عددی و آزمایشگاهی مطابقت خوبی باهم دارند و نتایج عددی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی است.

نمونه‌ای دیگر از مطالعه عددی - آزمایشگاهی پژوهش پیرکر<sup>۴</sup> و همکاران [۳۷] است که به بررسی پدیده تلاطم در یک مخزن مستطیلی که بر روی یک سیستم فنری-کنترلی نصب شده، پرداخته شده است. برای شبیه‌سازی از روش کسر حجمی سیال<sup>۵</sup> (VOF) و برای محاسبه حرکت مخزن از دیدگاه اوپلری لاگرانژی قراردادی<sup>۶</sup> استفاده شده است.

در یک شبیه‌سازی عددی و ارزیابی تجربی توسط علی سررشته‌داری و همکاران [۳۸]، تلاطم سطح آزاد مایع تحت تحریک عرضی در یک مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش سطح آزاد مایع متلاطم تحت تأثیر تحریک عرضی در یک مخزن مستطیلی شکل به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل از آن با استفاده از مطالعه تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته است. شبیه‌سازی عددی بر اساس روش کسر حجمی سیال (VOF) انجام شده است که امکان استخراج سطح آزاد را در چنین مسئله‌ای فراهم می‌سازد. در این پژوهش، در مطالعه آزمایشگاهی، از یک مخزن با دیواره‌های شفاف برای بررسی سطح آزاد مایع استفاده شده است که دامنه و فرکانس حرکت متناوب آن به وسیله یک سیستم مکانیکی رفت و برگشتی کنترل می‌گردد. سطح آزاد مایع

<sup>1</sup> Faltinsen

<sup>2</sup> Timokha

<sup>3</sup> Meshless local Petrov – Galerkin

<sup>4</sup> S.Pirker

<sup>5</sup> Volume of Fluid

<sup>6</sup> Arbitrary Lagrangian Eulerian

متلاطم در مخزن مستطیلی با تصویربرداری و استفاده از پردازش تصویر استخراج شده است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که برای تحریک‌ها با فرکانس و دامنه پایین، مطابقت خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. ولی با افزایش دامنه حرکت، اختلاف بین نتایج افزایش می‌یابد.

از جمله بررسی‌های عددی در این زمینه می‌توان به پژوهش عددی آدام مارش<sup>۱</sup> و همکاران [۳۹] اشاره نمود که در آن پراکنده‌سازی انرژی به وسیله یک جذب‌کننده تلاطم برای مایع کم‌عمق با استفاده از روش هیدرودینامیک ذره روان<sup>۲</sup> (SPH) پرداخته شده است.

هاکان آکیلدیز<sup>۳</sup> و همکاران [۴۰]، در یک تحقیق تجربی بر روی تأثیرات تیغه‌های رینگی بر روی تلاطم سیال در یک مخزن استوانه‌ای صلب، تحقیق کرده‌اند و تلاطم مایع در یک مخزن استوانه‌ای با سطوح مختلف مایع و تیغه‌های حلقوی زیر تحریک حرکت رولینگ مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش، یک سیستم آزمایشگاهی طراحی شده است تا رفتار غیرخطی تلاطم مایع در مخزن استوانه‌ای نیمه‌پر در دو حالت بدون تیغه میرا کننده و با تیغه مورد مطالعه قرار دهد. نتیجه حاصل از این پژوهش این است که نحوه قرارگیری تیغه‌ها تأثیر زیادی روی بارهای ناشی از تلاطم سیال دارد.

نمونه دیگری از مطالعات عددی در این زمینه می‌توان به بررسی عددی لاکیس<sup>۴</sup> و همکاران [۴۱] اشاره کرد که در آن تأثیر حرکت سطح آزاد سیال بر روی رفتار دینامیکی مخازن استوانه‌ای افقی پرداخته شده است. در این تحقیق با استفاده از روش نیمه‌تحلیلی و دیدگاه المان محدود<sup>۵</sup> (FE)، تحلیل دینامیکی سیال و برهم‌کنش سازه - سیال بین سازه انعطاف‌پذیر و جریان غیر لزج و تراکم‌ناپذیر مورد بررسی قرار گرفته است.

<sup>1</sup> Adam Marsh

<sup>2</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics

<sup>3</sup> Hakan Akyildiz

<sup>4</sup> A.A.Lakis

<sup>5</sup> Finite Element

در مطالعه چونگ<sup>۱</sup> و همکاران [۴۲] تأثیرات حضور تیغه میرا کننده عمودی بر روی تلاطم سیال تحت تحریک عرضی در یک مخزن مستطیلی شکل ۳ بعدی مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای شبیه‌سازی یک جریان دوفازی ویسکوز غیرقابل تراکم پذیر ۳ بعدی در یک تانک نیمه‌پر مایع، از روش کسر حجمی سیال استفاده شده است. نسبت ارتفاع تیغه به ارتفاع اولیه مایع در مخزن در بازه ۰ تا ۱/۲ در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل در این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع تیغه باعث کاهش موج ایجاد شده در نوک تیغه می‌شود.

در یک بررسی تجربی دیگر سوتو ایگلسیاس<sup>۲</sup> و همکاران [۴۳] به بررسی آزمایشگاهی پدیده تلاطم و پردازش داده‌ها پرداخته شده است. از نمونه‌های فعالیت‌های تجربی دیگر می‌توان به مطالعات ناسار<sup>۳</sup> و همکاران [۴۴] اشاره کرد که در آن به مطالعه آزمایشگاهی دینامیک مایع متلاطم در مخزنی که توسط قایق حمل می‌گردد و در معرض موج‌های منظم قرار دارد پرداخته شده است.

در مطالعه‌ای از لین لوو<sup>۴</sup> و همکاران [۴۵]، شبیه‌سازی عددی تلاطم سیال ویسکوز در یک مخزن مستطیلی در حالت وجود و عدم وجود تیغه میرا کننده مورد بررسی قرار گرفته است و دقت مدل عددی با حل‌های نظری موجود مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در پژوهشی تجربی - عددی از کوه<sup>۵</sup> و همکاران [۴۶]، با استفاده از روش ذرات سازگار<sup>۶</sup> (CPM)، حل عددی انجام شده و حل عددی مربوطه با یک نمونه آزمایشگاهی که در آن از یک تیغه شناور مقید شده در کف مخزن استفاده شده است، مورد مقایسه قرار گرفته است. فشار وارد شده بر نقاط معینی از مخزن در نمونه آزمایشگاهی توسط حس‌گرهای با دقت بالا، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل در نمونه آزمایشگاهی مطابقت خوبی با نتایج عددی داراست.

از جمله فعالیت‌های تجربی - عددی دیگر می‌توان به پژوهش عباس ملکی و منصور ضیاعی

<sup>1</sup> J.G Jung

<sup>2</sup> A.Souto-Iglesias

<sup>3</sup> T.Nasar

<sup>4</sup> Lin Lu

<sup>5</sup> Koh C.G

<sup>6</sup> Consistent Particle Method

فر [۴۷] اشاره نمود که در آن به تأثیر تیغه میرا کننده در کاهش تلاطم در مخازن استوانه‌ای پرداخته شده است. برای بررسی تأثیر تیغه‌های حلقوی و عمودی در کاهش تلاطم از حل معادله دیفرانسیل لاپلاس استفاده شده است و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در این بررسی مشخص شده است که در این گونه مخازن وجود تیغه‌های حلقوی تأثیر زیادتری بر تلاطم دارد.

در مطالعه‌ای دیگر از هاکان آکیلدیز<sup>۱</sup> و یونال اریدم<sup>۲</sup> [۴۸]، تأثیرات ۳ بعدی بارهای ناشی از تلاطم در مخزن و همچنین رفتار غیرخطی و پارامترهای دمپ شده در مخزن نیمه پر مورد بررسی قرار گرفته است..

گوریندر سین برار<sup>۳</sup> و سیم ران جیت سین<sup>۴</sup> [۴۹]، در یک مطالعه تجربی-عددی به بررسی تعامل ساختار سیال در مخزن بیضوی شکل پرداخته این که در این مطالعه فشار اعمال شده توسط مایع بر روی دیوار مخزن بیش از یک دوره معینی از زمان محاسبه شده است و همچنین پاسخ دینامیکی مخزن ذخیره مایع مورد مطالعه کامل قرار گرفته است. تأثیر شکل و محل تیغه‌ها تحت تأثیر تحریک مشخص شده است و نقش ترکیبی از تیغه افقی و عمودی پیداشده است.

در تحقیقی دیگر از سید محمد هاشمی نژاد و محمدی [۵۰]، با استفاده از نظریه پتانسیل خطی به بررسی تأثیر ارتفاع تیغه و نحوه قرارگیری آن و همچنین عمق مایع بر تلاطم سیال داخل مخزن استوانه‌ای پرداخته که در آن مایع تراکم ناپذیر و غیر لزج در نظر گرفته شده است.

بررسی پدیده تلاطم از اهمیت بسیار بالایی در صنایع کشتی‌رانی و بهبود امنیت و مقاومت کشتی دارد. از این رو چائو<sup>۵</sup> و همکاران [۵۱]، به بررسی تلاطم مایع در یک مخزن مستطیلی شکل بر اساس شبیه‌سازی هیدرودینامیک ذرات هموار<sup>۶</sup> (SPH) پرداخته‌اند. در این بررسی قوانین فشار ضربه‌ای در

<sup>1</sup> Hakan Akyildiz

<sup>2</sup> Unal Eridem

<sup>3</sup> Gurinder Singh Brar

<sup>4</sup> Simrajit Singh

<sup>5</sup> X.Y Chao

<sup>6</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics

یک مخزن دوبعدی، تحت نیرو با فرکانس‌های تحریک مختلف در زوایای تحریک متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. سپس تأثیر حضور تیغه میرا کننده<sup>۱</sup> روی سیال متلاطم داخل مخزن مورد بررسی قرار گرفته شده است.

در یک مطالعه تجربی - عددی دیگر، ژاو<sup>۲</sup> و همکاران [۵۲]، به شبیه‌سازی و تحلیل مایع متلاطم غیرخطی در مخازن همراه با جسم متخلخل<sup>۳</sup> با استفاده از روش المان مرزی چند دامنه‌ای پرداخته شده است. نتایج حاصله با اعمال فرض‌هایی مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای دیگر از ریس زارد سیگولسکی<sup>۴</sup> [۵۳] شکل مودهای مایع متلاطم در مخازن مستطیلی و استوانه‌ای بدون تیغه و تیغه دار با استفاده از روش المان مرزی مورد بررسی قرار داده شده است. مایع مورد نظر غیر لزج و تراکم ناپذیر و دامنه نوسان‌ها کوچک فرض شده است.

در یک مطالعه تجربی از هنگ - جین<sup>۵</sup> و همکاران [۵۴]، بر روی تلاطم مایع در یک مخزن مستطیلی شکل که در آن برای افزایش اتلاف انرژی و کاهش دادن نیروهای وارد بر سازه از صفحه‌های افقی نصب شده در کف ظرف استفاده شده است، ارتفاع سطح آزاد مایع در سمت دیواره مخزن و فرکانس رزونانس به دقت بررسی شده است. نتایج تجربی حاصل در این پژوهش نشان می‌دهد که صفحه افقی نصب شده در کف مخزن به میزان قابل توجهی نوسانات شدید موجود را کاهش می‌دهد.

فعالیت‌های بیسوال<sup>۶</sup> و باتاچاریا<sup>۷</sup> [۵۵]، در زمینه مطالعه تقابل سازه و سیال در شرایط سیال متلاطم اشاره کرد که در آن با استفاده از روش المان محدود به بررسی برهم‌کنش مایع و تیغه کامپوزیتی مخزن پرداخته شده است. در این بررسی مایع تراکم ناپذیر و غیر لزج و جریان غیر چرخشی در نظر گرفته شده است. نمونه دیگر از بررسی‌های تجربی می‌توان به مطالعه زهرایی و همکاران [۵۶] اشاره کرد که در آن به مطالعه آزمایشگاهی تأثیر تیغه‌های قابل چرخش بر کاهش

<sup>1</sup> Baffle

<sup>2</sup> H.E Zhao

<sup>3</sup> Porose

<sup>4</sup> Ryszard Sygulski

<sup>5</sup> Heng Jin

<sup>6</sup> K.C. Biswal

<sup>7</sup> S.K. Bhattacharyya

تلاطم در مخازن مستطیلی پرداخته شده است.

نمونه‌ای دیگر از پژوهش‌های عددی کاری از تیاگاراگان<sup>۱</sup> و همکاران [۵۷] است که در آن مایع متلاطم در مخزن مستطیلی شکل مورد بررسی عددی قرار گرفته است. برای بررسی عددی از روش کسر حجمی سیال (VOF) استفاده شده است و برای ارزیابی نتایج از مقایسه با نتایج مقالات دیگر استفاده شده است.

### ۱-۳ تعریف مسئله

همان‌طور که در قسمت تاریخچه مشاهده شد مطالعات بسیاری با روش‌های مختلف تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی در زمینه تلاطم سیال (Sloshing) در مخازن با ابعاد و اشکال هندسی متفاوت انجام شده است. ولی با توجه به اهمیت موضوع و گستردگی مسئله و همچنین رفتار پیچیده فیزیکی، بررسی پارامترهای مرتبط همچون فشار، نیرو و سایر پارامترها، در شرایط مرزی متفاوت نظیر ارتفاع مایع و تیغه متفاوت، دامنه، فرکانس و اشکال متفاوت حرکت و همچنین بهبود تأثیرات ناشی از تلاطم از اهمیت بالایی برخوردار است. برای این منظور، یک مطالعه تجربی- عددی انجام شده است که در آن یک مخزن مکعب مستطیل نیمه پر توسط منبع نیروی خارجی، تحت تحریک جانبی قرار گرفته و در فرکانس‌های متفاوت اعمالی بر مخزن و ارتفاع‌های متفاوت سیال در دو حالت وجود و عدم وجود تیغه میرا کننده<sup>۲</sup> در ارتفاع‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای بررسی تجربی یک سیستم آزمایشگاهی ساخته شده است که در آن یک مخزن مکعب مستطیل شکل تا ارتفاع مشخصی از مایع پر شده است، توسط یک مکانیسم محرک مکانیکی به منبع مولد نیروی خارجی متصل شده و تحت تحریک جانبی قرار می‌گیرد. پارامترهایی نظیر فرکانس اعمالی خارجی به مخزن از جانب منبع مولد نیرو، دامنه نوسان، ارتفاع سیال در داخل مخزن و همچنین ارتفاع تیغه میرا کننده تعبیه شده در مخزن، برای بررسی دقیق‌تر تغییر داده می‌شوند. تیغه

<sup>1</sup> K.P.Thiagarajan

<sup>2</sup> Baffle

میرا کننده در وسط مخزن و به صورت عرضی در کف مخزن تعبیه شده و ضخامت آن نازک در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن ارتفاع تیغه میرا کننده ( $h_b$ ) و ارتفاع سیال ( $h$ )، بازه مورد بررسی به صورت  $0 \leq h_b/h \leq 1.66$  است.

جهت ارزیابی دقیق تر، نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی تلاطم سیال در داخل یک مخزن با تیغه میرا کننده با داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. حل عددی با استفاده از نرم‌افزار منبع باز OpenFoam و حل گر interDyMFoam انجام می‌پذیرد که به بررسی جریان دوفازی ویسکوز تراکم ناپذیر دوبعدی بر اساس روش حجم محدود (VOF)، می‌پردازد. روش حجم محدود (VOF) یکی از متداول ترین روش‌ها در شبیه‌سازی چنین جریان‌هایی است.

در بررسی پژوهش‌های پیشین مشاهده شده که در اکثر موارد یک پارامتر مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر تغییرات پارامتر مزبور مورد بررسی نبوده است. به طور مثال وجود و یا عدم وجود تیغه مورد بررسی قرار گرفته ولی تغییرات ارتفاع آن مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش علاوه بر بررسی تأثیر حضور تیغه (که در مطالعات پیشین نیز بررسی شده بود)، امکان بررسی تأثیرات تغییر ارتفاع تیغه میرا کننده روی تأثیرات ناشی از تلاطم مایع روی دیوار مخزن نیز مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر آن، تأثیر عواملی همچون تغییر ارتفاع مایع، طول مخزن و فرکانس حرکت مخزن روی تأثیرات ناشی از تلاطم روی دیوار مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع با بررسی تأثیر تمام پارامترهای موجود، هدف بهبود فشار ناشی از تلاطم روی دیواره مخزن است. از طرفی استفاده از مانومتر به عنوان ابزار بررسی فشار دینامیکی، امکان بررسی رفتار دینامیک مایع در مانومتر را ایجاد می‌کند.

پارامترهای مورد بررسی به همراه شرایط هندسی مسئله در این پژوهش را می‌توان در قالب یک

جدول ارائه کرد. (جدول (۱-۱))



جدول (۱-۱) تحقیق حاضر

<p>دو مخزن مکعب مستطیل، یکی ساده و برای بررسی اثرات ناشی از تلاطم در حالت عدم وجود تیغه میرا کننده و دیگری با امکان نصب تیغه میرا کننده به ابعاد:</p> <p>Dimension: 50cm×30cm×20cm</p>	<p>ابعاد مخزن</p>
<p>بررسی‌ها در دو حالت وجود و عدم وجود تیغه میرا کننده انجام شده است.</p> <p>تیغه از نوع Vertical که در کف و میانه مخزن تعبیه شده است. دارای جنس صلب و ضخامت 1cm است.</p> <p>ارتفاع تیغه:</p> <p>h=6cm, 8cm, 10cm</p> <p><math>0 \leq h_b/h \leq 1.66</math></p> <p>ارتفاع مایع: <math>h</math> ارتفاع تیغه میرا کننده: <math>h_b</math></p> <p>ارتفاع بی‌بعد تیغه به صورت ارتفاع تیغه به ماکزیمم ارتفاع تیغه: B</p> <p>B=0,0.6,0.8,1</p>	<p>ابعاد تیغه میرا کننده</p>
<p>h=6 cm, 10 cm, 14 cm</p>	<p>ارتفاع مایع</p>
<p>f=0.222, 0.256, 0.289, 0.384, 0.416, 0.444, 0.526, 0.555, 0.625</p> <p><math>0.2 &lt; \frac{f}{f_n} &lt; 0.78</math> , <math>f_n</math>: فرکانس تشدید مایع درون مخزن</p>	<p>فرکانس‌های اعمالی بر مخزن</p>
<p>حرکت خطی رفت و برگشتی:</p> <p><math>A = 4 \text{ cm}, 7.5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}</math> , <math>X = A \sin(\omega t)</math></p>	<p>دامنه حرکت مخزن</p>

## ۴-۱ مروری بر فصل‌ها

در فصل دوم این پایان‌نامه، شرح مختصری از روش‌های موجود در بررسی پدیده تلاطم ارائه شده است که شامل روش‌های عددی، تجربی و تحلیلی است.

در فصل سوم به تفصیل به مطالعه آزمایشگاهی، روش آزمایش و شرایط آزمایشگاهی پرداخته می‌شود.

در فصل چهارم این پایان‌نامه به توضیح شبیه‌سازی عددی مایع متلاطم که شامل معرفی مختصری از نرم‌افزار OpenFoam، معادله‌های حاکم و ساختار حل عددی است، پرداخته شده است.

در فصل پنجم این پایان‌نامه نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده و نتایج حاصل از حل عددی مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرد و دقت روش عددی مذکور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل ششم و پایانی، به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی نتایج حاصل از بخش‌های قبلی و بیان پیشنهادها می‌پردازیم.

فصل دوم

روش های مطالعه

تمامی پدیده‌های فیزیکی را می‌توان از سه دیدگاه عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی (تجربی) مورد بررسی قرار داد. در زیر پدیده تلاطم را با این سه دیدگاه مورد بررسی قرار داده و روش‌های موجود برای بررسی پدیده تلاطم در دیدگاه‌های مختلف معرفی می‌شود.

## ۱-۲ دیدگاه تجربی

روش تجربی یا آزمایشگاهی با توجه به اینکه مبتنی و برگرفته از خود واقعیت هست، جزء یکی از پرکاربردترین روش‌های مورداستفاده در حل مسائل مهندسی است. ضعف عمده روش آزمایشگاهی، پرهزینه و زمان‌بر بودن آن است. در حالی که در روش حل عددی این چنین نیست. در این روش با استفاده از ساخت دستگاه‌های آزمایشگاهی متفاوت، امکان بررسی پدیده‌های متفاوت فیزیکی وجود دارد. در زمینه پدیده تلاطم، می‌توان با طراحی و ساخت دستگاه‌های آزمایشگاهی متفاوت، شرایط متفاوتی را برای حرکت مخزن حامل سیال مایع، اعم از حرکت خطی و یا دورانی ایجاد کرد و به بررسی پارامترهای مرتبط به آن پرداخت. در فصل سوم این پایان‌نامه، دیدگاه تجربی در بررسی پدیده تلاطم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۲ دیدگاه تحلیلی

در حل دقیق یا تحلیلی، همان‌طور که از نام آن مشخص است، به محاسبه دقیق پارامتری معادلات دیفرانسیل حاکم بر میدان‌های فیزیکی همچون میدان حرارتی، میدان تنش، میدان الکتریکی و غیره، می‌پردازند. در حل مسائلی نیز که شرایط مرزی کمی پیچیده می‌شود، حل دقیق ناتوان است و تنها روش‌های مرسوم عددی در حل این نوع مسائل به کار می‌رود؛ مثل تحلیل استحکامی پره توربین بادی در اثر بارهای آئرودینامیکی وارد بر آن.

در این روش با استفاده از فرض‌ها و روابط ریاضی سعی می‌گردد، مدلی ریاضی برای تلاطم تهیه گردد؛ و بر اساس این روابط پارامترهای مطلوب استخراج شود. پژوهش‌های تحلیلی در زمینه پدیده تلاطم نشان می‌دهد که با افزایش دامنه حرکت، حرکت متلاطم به شدت غیرخطی می‌گردد و استفاده از روش تحلیلی در این حالت مشکل می‌شود و تأثیرهای آشفتگی و لزجت رعایت نمی‌گردد. در حالت

کلی، روش تحلیلی یا دقیق از تحلیل مدل‌هایی با هندسه پیچیده و در اکثر مسائل غیرخطی به‌خصوص در مواردی که درجه غیرخطی بودن معادلات بالا است، عاجز است. لذا استفاده از روش‌های تحلیلی فقط در زمان‌هایی که دامنه حرکت کوچک بوده و امواج تلاطم آرام و کوچک است (فرکانس حرکت مایع درون مخزن کمتر از ۵۰٪ فرکانس تشدید مایع درون مخزن) با استفاده از نتایج پژوهش حاضر))، قابلیت استفاده را دارد.

## ۲-۳ دیدگاه عددی

روش‌های حل عددی جزء پرکاربردترین روش‌های حل مسئله در مطالعات مهندسی به شمار می‌آید. در مسائلی که حل تحلیلی در آن‌ها ناتوان است مثل مواردی که در آن شرایط مرزی کمی پیچیده می‌شود یا مسائل غیرخطی، روش‌های مرسوم عددی در این موارد کاربرد خواهند داشت. به‌منظور شبیه‌سازی جریان سیال و حل معادلات حاکم بر سیال دو دیدگاه معتبر به نام‌های دیدگاه اویلری و لاگرانژی وجود دارد، که هر یک با توجه به فرضیات و روش‌های به‌کاررفته معادلات اساسی حاکم بر سیال را به‌گونه‌ای خاص ساده‌سازی کرده و بکار می‌برند. در دیدگاه اویلری سیستم دستگاه مختصات بر روی یک حجم کنترل از سیال گذاشته‌شده و تغییرات ایجادشده در جریان سیال به هنگام عبور از این حجم کنترل موردبررسی قرار می‌گیرد، اما در دیدگاه لاگرانژی سیستم دستگاه مختصات و درواقع دستگاه ناظر بر روی ذرات قرار گرفته و به همراه ذرات حرکت می‌کند و تغییرات جریان را در مسیر حرکت ذرات موردبررسی قرار می‌دهد.

از روش‌های متفاوت عددی که در پدیده تلاطم استفاده می‌شود می‌توان به موارد زیر اشاره کرد

[۱۷]:

روش لاگرانژی - اویلری اختیاری<sup>۱</sup> (ALE)

روش تفاضل محدود<sup>۲</sup> (FD)

روش المان محدود<sup>۳</sup> (FE)

روش حجم محدود<sup>۴</sup> (VOF)

روش هیدرودینامیک ذرات هموار<sup>۵</sup> (SPH)

روش حرکت ذرات نیمه ضمنی<sup>۶</sup> (MPS)

روش شبیه‌سازی گرداب بزرگ<sup>۷</sup> (LES)

در میان روش‌های عددی ذکر شده روش المان محدود (FE)، روش تفاضل محدود (FD) و روش

کسر حجمی سیال (VOF)، از کاربرد بیشتری در حل مسئله تلاطم برخوردار است.

### ۲-۳-۱ بررسی دیدگاه عددی با روش‌های FE و FD و VOF و SPH

در روش المان محدود (FE)، غالباً مسائل فیزیکی به کمک معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم

و با کمینه نمودن انرژی پتانسیل حل می‌شوند. روش کار بدین صورت است که کل مدل هندسی به

اجزاء کوچک‌تری به نام المان تقسیم می‌شود، هر المان خود دارای گره‌هایی است که مقادیر ورودی

(بارگذاری و شرایط مرزی) و خروجی (نتایج) به آن‌ها اختصاص داده می‌شود. اساس کار این روش با

حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی که با روش‌های

عددی مثل اویلر حل می‌شوند، است زیرا در بسیاری از مسائل مهندسی همچون انتقال حرارت و

مکانیک سیالات، ارتعاشات و ... پس از مدل شدن، تبدیل به یک معادله دیفرانسیلی پاره‌ای

<sup>1</sup> Arbitrary Lagrangian-Euler

<sup>2</sup> Finite-Difference

<sup>3</sup> Finite-Element

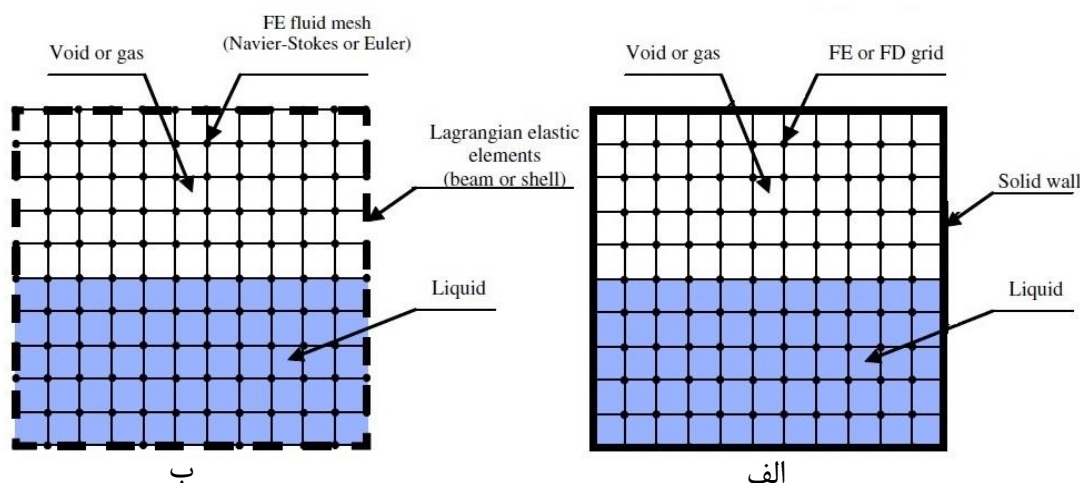
<sup>4</sup> volume Of Fluid

<sup>5</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics

<sup>6</sup> Moving Particle Semi-Implicit

<sup>7</sup> Large Eddy Simulation

می‌شوند که حل آن‌ها به صورت جبری بسیار وقت‌گیر و پیچیده است. روش تفاضل محدود (FD) یکی از روش‌های عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل است. در این روش مشتق توابع با تفاضلات معادل آن‌ها تقریب زده می‌شود. اساس این روش برای حل معادلات استفاده از تقریب تابع با روش تیلور است. نمایش رایج برای حالت دوبعدی در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل (۱-۲) شبکه‌بندی (الف) مخزن صلب (ب) مخزن کشسان [۱۷].

در میان روش‌های مذکور، روش کسر حجمی سیال<sup>۱</sup> (VOF)، از کاربرد بسیاری در شبیه‌سازی چنین جریان‌هایی برخوردار است [۷، ۲۰، ۳۱]. در این روش از حل معادله‌های انتقال برای به دست آوردن جزء حجمی سیال استفاده شده است و معادلات ناویر استوکس بر روی شبکه ثابت اویلری حل می‌گردد. این روش به طور موفقیت‌آمیزی برای طیف وسیعی از وسایل کاربردی مرتبط با سطح آزاد استفاده شده است.

روش‌های گوناگونی در تعیین سطح آزاد استفاده می‌شود که نسبت به دیدگاه حاکم بر حل میدان جریان متفاوت می‌باشند. در میدان جریان با شبکه ثابت، تعیین سطح آزاد بر اساس دیدگاه اویلری نسبت به جریان مشخص می‌شوند.

<sup>1</sup> Volume Of Fluid

تعیین سطح مشترک دو فاز سیال در بسیاری از مسائل هیدرودینامیکی مطرح بوده است. در پدیده‌های هیدرولیکی نیز تعیین سطح آزاد جریان در حل میدان جریان از اهمیت خاصی برخوردار است.

در کل می‌توان گفت که از مزایای این روش، پایستاری جرم بسیار قوی این روش است که این مزیت، آن را کامل برتر از دیگر روش‌ها کرده است که از این لحاظ زیر سؤال‌اند. از طرف دیگر، انتخاب این روش زمانی ترجیح داده می‌شود که استراتژی مرز تغییر می‌کند؛ زیرا VOF هیچ نیازی به فرضیات اولیه روی طبیعت مرز سیال و همچنین هیچ تکنیک خاصی برای در نظر گرفتن این تغییرات در مرز ندارد. نکته‌ی دیگر این است که VOF از لحاظ محاسباتی سریع است، چون در هنگام محاسبات تنها و تنها با مقدار متغیر  $\alpha$  سرکار دارد که این امر سبب می‌شود که فضای موردنیاز جهت ذخیره‌سازی اطلاعات کم‌حجم باشد. باین‌حال معایب استفاده از این روش در نقاط با تغییر شکل‌های ناگهانی و نقاط پراکنده است.

$\alpha$  یک تابع اسکالر بین صفر و یک به نام تابع کسر حجمی<sup>۱</sup> تعریف شده است و برای تشخیص هر یک از دو فاز از آن استفاده می‌شود. رابطه  $\alpha$  در زیر نشان داده شده است.

$$\alpha = \frac{V_i}{V} \quad (1-2)$$

در این رابطه  $V_i$  حجم سیال موردنظر است و  $V$  حجم کل سیال است.

به کمک این تابع می‌توان خواص فیزیکی سیال را در هر نقطه از دامنه حل تعریف نمود. اگر  $\varphi$  را به‌عنوان یک خاصیت مانند چگالی، لزجت و ... در نظر بگیریم برای این خاصیت در کل میدان داریم:

$$\varphi = \varphi_2 + \alpha(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2-2)$$

که در رابطه بالا  $\alpha$  به‌صورت حجم سیال ۱ به حجم سیال ۲ است.

<sup>1</sup> Volume fraction



با توجه به رابطه (۳-۲) مشخص است که  $\alpha$  را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{مایع} \\ 0 & \text{گاز} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{سطح مشترک} \end{cases} \quad (3-2)$$

نکته مهم این است که باید توجه داشته باشیم  $\alpha$  نسبت حجم یک سیال به حجم کل یک سلول محاسباتی است؛ یعنی در این روش  $\alpha$  در هر سلول محاسباتی جداگانه حساب می‌شود. مشخص است که در سلول‌هایی که تمام حجم آن را سیال یک (مایع) در بر گرفته است مقدار  $\alpha$  برابر با یک است و در سلول‌های که تمام حجم آن را سیال دو (گاز) در بر گرفته است، مقدار این کمیت صفر خواهد بود. در سلول‌هایی که هر دو فاز مایع و گاز حضور داشته باشند مقدار کمیت  $\alpha$  بین صفر و یک خواهد بود.

در شکل (۲-۲) مقادیر متفاوت  $\alpha$  در سلول‌های محاسباتی نشان داده شده است.

0	0	0	0	0	0	0
1	0.9	0.6	0.10	0	0	0
1	1	1	0.85	0.12	0	0
1	1	1	1	0.7	0	0
1	1	1	1	1	0.27	0
1	1	1	1	1	0.6	0
1	1	1	1	1	0.8	0

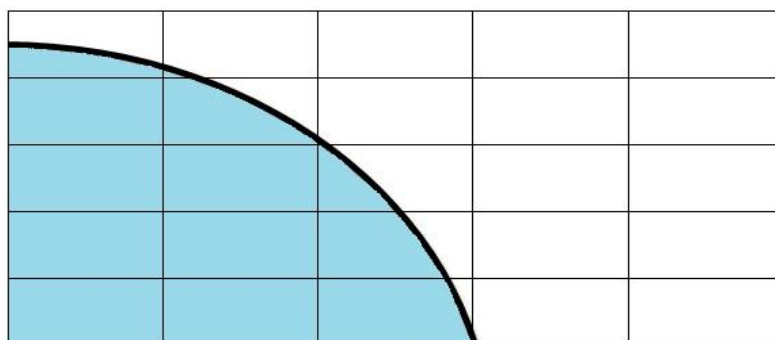
شکل (۲-۲) مقادیر متفاوت  $\alpha$  در سلول‌های محاسباتی

در شکل (۲-۲) ناحیه‌های بارنگ تیره مربوط به سیال ۱ (مایع) و ناحیه‌های روشن مربوط به سیال ۲ (گاز) است. نواحی تیره دارای مقدار  $\alpha$  برای ۱ و نواحی روشن دارای مقدار صفر برای  $\alpha$  می‌باشند. سایر نواحی که همان سطح مشترک بین سیال ۱ و ۲ هستند دارای مقادیر غیر صفر و یک هستند و مقدار  $\alpha$  در این نواحی بین صفر و یک است.

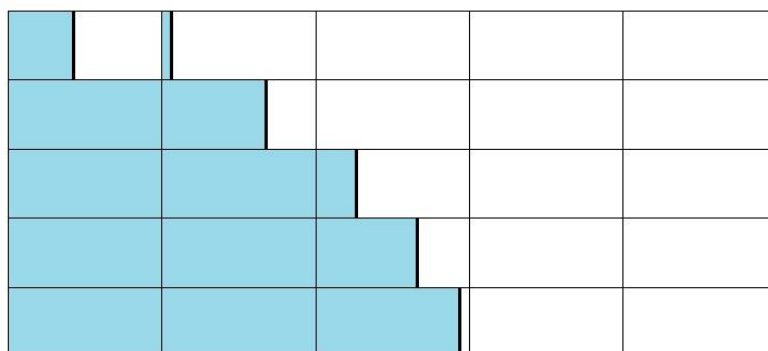
ناحیه دارای اهمیت در جریان‌های با سطح آزاد، همین ناحیه سطح مشترک بین دو سیال است که در آن ناحیه هر دو سیال وجود دارد؛ یعنی سلول‌های حاوی هر دو نوع سیال از اهمیت بررسی برخوردار هستند. برای بررسی سلول‌های حامل هر دو سیال از تقریب‌هایی استفاده شده است که در آن، یک تقریب هندسی در نظر گرفته شده است. این یک روش ساده کننده است که در آن، جابجایی  $\alpha$  در میدان حل به کمک میدان سرعت، شار عبوری از سطوح سلول با دقت بیشتری محاسبه می‌شود. در این روش‌ها محاسبه شار به سطح مقطع سیال مرتبط می‌شود. در ادامه به معرفی روش‌های موجود برای تقریب‌های هندسی در سلول‌های ناحیه سطحی پرداخته شده است.

- روش SLIC<sup>1</sup>:

یکی از اولین روش‌هایی که برای تقریب هندسی سطوح مشترک از آن استفاده شده است، روش SLIC است. در این تقریب سطوح مشترک می‌تواند به صورت عمودی یا افقی در نظر گرفته شود. در شکل (۲-۳)، این تقریب هندسی به خوبی نشان داده شده است.



الف

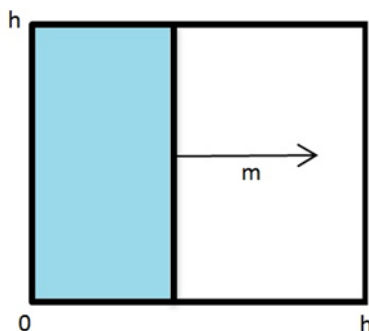


ب

شکل (۲-۳) (الف) شکل دقیق (ب) استفاده از المان‌های قائم

باید توجه داشت که در این روش المان‌ها به هر دو صورت افقی و عمودی می‌توانند باشند که در شکل (۲-۳) از المان‌های قائم استفاده شده است. در این روش اگر بردار نرمال وارد بر سطح المان‌های تقریب زده شده را  $m$  در نظر بگیریم، این بردارها به شکل افقی یا عمودی خواهند بود (شکل (۲-۴)).

<sup>1</sup> Simplified Line Interface Calculation



شکل (۴-۲) بردار نرمال بر سطح المان تقریب زده شده

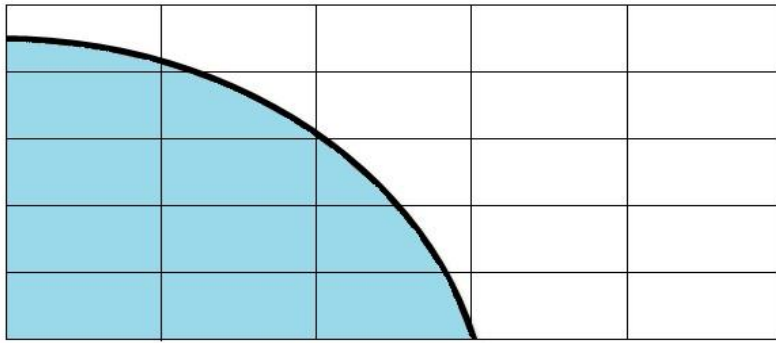
• روش<sup>۱</sup> PIIC:

در این روش بجای در نظر گرفتن سطوح افقی یا عمودی، با استفاده از خطوط شیب‌دار، سطح مشترک در هر سلول تقریب زده می‌شود. مشخصاً این روش نسبت به روش قبلی بسیار دقیق‌تر بوده و تقریب مناسب‌تری برای بررسی هر سلول است و کاستی‌های روش سابق را پوشش می‌دهد. بردار نرمال عمود بر سطح تقریب زده شده ( $m$ ) در این حالت به صورت زیر خواهد بود:

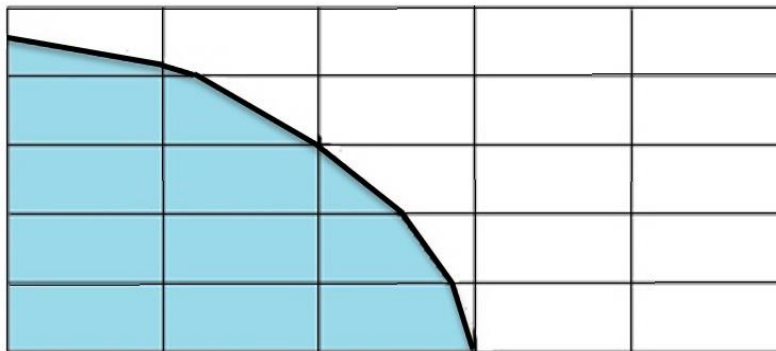
$$m_x x + m_y y = c \quad m = [m_x, m_y] \quad (۴-۲)$$

همان‌طور که در شکل (۵-۲) نشان داده شده است، بجای استفاده از خطوط افقی و قائم، از خطوط شیب‌دار استفاده شده است که نقطه ابتدایی و انتهایی منحنی ایجاد شده در هر سلول محاسباتی را، به هم وصل کرده است.

<sup>1</sup> Piece-wise linear Interface Calculation

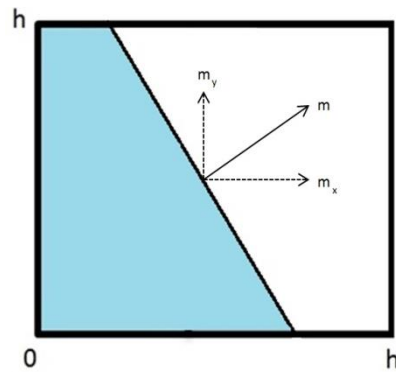


الف



ب

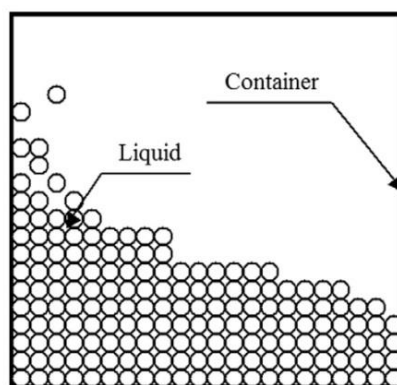
شکل (۲-۵) (الف) شکل دقیق (ب) استفاده از المان‌های شیب‌دار



شکل (۲-۶) بردار نرمال شیب‌دار بر سطح المان تقریب زده شده

- روش هیدرودینامیک ذرات هموار<sup>1</sup> (SPH)

روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)، یک روش کاملاً لاگرانژی است. این روش بدون نیاز به شبکه بوده و با استفاده از یک مکانیسم درون‌یابی نقطه‌ای خواص جریان سیال را محاسبه می‌کند، در این روش به هر ذره جرمی نسبت داده می‌شود که متناسب بافاصله ذرات از یکدیگر و خواص سیال است، بنابراین می‌توان این ذرات را به ذرات فیزیکی و مادی تعبیر کرد که خواص میدان سیال نظیر دما، سرعت، فشار و ... به همراه خود جابجا می‌کنند و مقدار این خواص در هر ذره متحرک تابعی از متوسط این خواص در ذرات مجاور است و تابعی وزنی (هموارساز) به نام تابع کرنل این متوسط‌گیری را با احتساب برخی پارامترهای لازم انجام می‌دهد. در روش SPH اعمال شرایط مرزی به‌آسانی انجام می‌گیرد زیرا تمام میدان با ذرات متحرک تخمین زده می‌شود و برای ذرات مرزی نیز می‌توان با اعمال چند شرط خاص دیواره‌ها را شبیه‌سازی کرد. ازجمله مزایای اصلی روش هیدرودینامیک ذرات هموار می‌توان به مدل‌سازی سطح آزاد بسیار پیچیده، فیزیک‌های پیچیده نظیر مسائل چند فازی، جریان در محیط متخلخل، اشاره کرد.



شکل (۲-۷) شبیه‌سازی پدیده تلاطم با استفاده از روش SPH

<sup>1</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics

جدول (۱-۲) مدل‌های عددی تلاطم

۳۱	۲۴	۶	شماره مقاله
مکعب مستطیل ۱/۲×۰/۶ متر	مکعب مستطیل ۰/۸×۰/۵×۰/۴ متر	مکعب مستطیل با اندازه و ابعاد متفاوت	شکل و ابعاد مخزن
صلب	صلب	صلب	جنس مخزن
ندارد	ندارد	ندارد	تیغه
آب‌وهوا	آب‌وهوا	مشخص نشده است	سیال
FEM 2D	FDM	FDM 2D	روش
چند فاز، تراکم پذیر، لزج	غیر لزج، تراکم ناپذیر، دو فاز، ناویراستوکس، اوپلر	تراکم ناپذیر، دو فاز، لزج	نوع سیال
مخزن نیمه‌پر، چرخش سینوسی با گرانش	مخزن نیمه‌پر، حرکت رفت و برگشتی خطی و چرخشی	مخزن نیمه‌پر، شتاب سپس ترمز، گرانش	شرایط مرزی
-	-	-	کوپلینگ
در مدل غیر همگن مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد	مطابقت خوب با نتایج آزمایشگاهی	مطابقت خوب با نتایج آزمایشگاهی	مقایسه نتایج
LNG کشتی‌های حمل‌کننده	LNG کشتی‌های حمل‌کننده	وسایل حمل‌ونقل جاده‌ای	کاربرد
۵۶	۱۰	۱۲	شماره مقاله
مکعب مستطیل ۰/۶×۰/۶×۰/۶ متر هشت‌ضلعی ۰/۳۹×۰/۵۶ متر	استوانه‌ای، طول برابر شعاع، سرپوش‌های نیم‌کره‌ای، ۸۶/۹۱ مترمکعب	مکعب مستطیل ۱۹/۶×۱۲/۳ متر	شکل و ابعاد مخزن
صلب	صلب	کف صلب و دیواره‌های الاستیک	جنس مخزن
دارد از نوع معلق	ندارد	ندارد	تیغه
آب	آب	آب	سیال
CPM	FEM 2D/3D VOF	FEM 2D	روش
نیوتونی، لزج، تراکم ناپذیر	تراکم ناپذیر، دو فاز، لزج	غیر لزج، تراکم پذیر، همگن	نوع سیال
مخزن نیمه‌پر، تحریک به صورت لرزش، گرانش	مخزن نیمه‌پر، چرخش، بدون گرانش	مخزن نیمه‌پر، تحریک لرزشی، همگن	شرایط مرزی
-	دارد	دارد	کوپلینگ
مطابقت خوب با نتایج آزمایشگاهی	مطابقت خوب با نتایج آزمایشگاهی	مطابقت خوب با پژوهش‌های دیگر	مقایسه نتایج
مخازن حمل سیال مایع	FLEVO فضاپیمای	کانتینر آب آشامیدنی	کاربرد

ادامه جدول (۱-۲) مدل‌های عددی تلاطم

۵	۲۲	۲	شماره مقاله
مکعب مستطیل ۰/۶۴×۰/۱۴×۰/۲۵ متر	مکعب مستطیل ۰/۹۲×۰/۶۲×۰/۴۶ متر	بیضی‌گون ۱/۴×۲ متر، طول ۴ متر	شکل و ابعاد مخزن
صلب	صلب	صلب	جنس مخزن
ندارد	دارد. با اشکال متفاوت	ندارد	تیغه
آب	آب	بنزین	سیال
SPH 2D	FDM 3D, VOF	FEM 3D	روش
تک فاز، لزج	همگن، ایزوتروپیک، لزج و نیوتونی	اشاره نشده است	نوع سیال
مخزن نیمه‌پر، چرخش سینوسی، گرانش	مخزن نیمه‌پر، چرخش سینوسی با گرانش	مخزن نیمه‌پر، شتاب خطی به‌صورت ترمز، گرانش	شرایط مرزی
-	-	-	کوپلینگ
مطابقت با نتایج آزمایشگاهی	مطابقت خوب با نتایج آزمایشگاهی	مطابقت با مدل‌های دیگر بسته به شرایط متفاوت است	مقایسه نتایج
کشتی‌ها و صنایع دریایی	اشاره نشده است	کامیون‌های نفت‌کش	کاربرد
۴۹	۱۹	۱۶	شماره مقاله
مکعب مستطیل ۰/۳×۰/۶×۰/۶ متر	مخزن استوانه‌ای، ارتفاع ۵/۱ متر، قطر ۰/۵ متر	مکعب مستطیل ۱×۰/۶ متر	شکل و ابعاد مخزن
صلب	صلب	صلب	جنس مخزن
دارد	ندارد	ندارد	تیغه
آب	آب	آب‌وهوا	سیال
SPH	FLOW-3D	FDM 2D, VOF	روش
تراکم پذیر ضعیف، دو فاز	تراکم ناپذیر، دو فاز، لزج	دوفازی لزج	نوع سیال
مخزن نیمه‌پر، تحریک به‌صورت چرخش سینوسی <sup>۱</sup> ، گرانش	مخزن نیمه‌پر، شتاب به‌صورت خطی	مخزن نیمه‌پر، چرخش سینوسی	شرایط مرزی
-	-	-	کوپلینگ
مطابقت خوب با نتایج آزمایشگاهی	مطابقت خوب با نتایج آزمایشگاهی	مطابقت خوب با نتایج آزمایشگاهی	مقایسه نتایج

$$^1 \theta = \theta_0 \sin(\omega, t)$$



فصل سوم

بررسی آزمایشگاهی

در بررسی تجربی زیادی در زمینه تلاطم مایع<sup>۱</sup> در مخزن انجام شده است که بخشی از این پژوهش‌ها در فصل اول معرفی شد. برای ایجاد تلاطم در مخزن نیاز به تحریک خارجی به مخزن وجود دارد که باعث ایجاد این تلاطم می‌شود.

در حالت کلی برای ایجاد تلاطم در مخزن از دو نوع تحریک عرضی و طولی می‌توان استفاده کرد. در تحریک عرضی، مخزن حامل سیال مایع، با استفاده از یک طناب آویزان می‌شود و نیرویی به آن وارد می‌شود. در این حالت ظرف حامل مایع، یک حرکت مشابه حرکت پاندول را تجربه خواهد کرد. در این حالت مایع درون مخزن شروع به تلاطم می‌کند. این آزمایش را می‌توان با استفاده از محکم کردن مخزن بر روی یک تاب و به حرکت درآوردن تاب، نیز انجام داد. در این حالت نیرو به صورت افقی به ظرف وارد می‌شود. حرکت خطی رفت و برگشتی متقارن در یک بعد برای مخزن، نیز مشابه این نوع حرکت است، با این تفاوت که در این نوع حرکت شعاع دوران مخزن بینهایت در نظر گرفته می‌شود. در یک نوع حرکت دیگر، برای اولین بار، مخزن حامل مایع بر روی یک ماشین لباسشویی قرار می‌گیرد و مایع داخل مخزن شروع به نوسان می‌کند. در این حالت نیروی وارد بر ظرف به صورت عمودی بوده و باعث ایجاد نوسان‌های طولی در ظرف می‌شود.

در این پژوهش، مایع که آب در نظر گرفته شده است در داخل یک مخزن مستطیلی شکل به ابعاد بیرونی  $20 \times 30 \times 50$  سانتیمتر، تحت تحریک عرضی قرار می‌گیرد و شروع به تلاطم می‌کند. منبع مولد نیرو برای این سیستم آزمایشگاهی، یک موتور AC است که دور حرکت آن، با استفاده از یک Inverter، قابل تغییر است که امکان ایجاد فرکانس‌های متفاوت برای حرکت مخزن ایجاد می‌شود. در این پژوهش فرکانس‌های اعمالی به مخزن از  $0/2$  تا  $0/62$  هرتز است. نیرو از موتور، توسط یک مکانیسم مکانیکی به مخزن منتقل می‌شود و باعث حرکت مخزن می‌شود. به واسطه این حرکت خطی مخزن، مایع در داخل ظرف شروع به نوسان می‌کند.

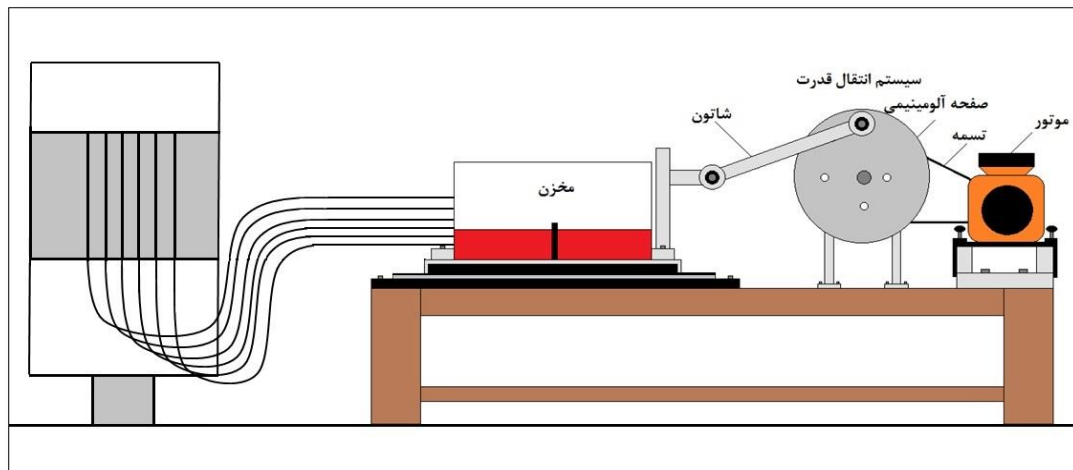
برای بررسی فشار بر روی دیواره مخزن، از مانومتر استفاده شده است. لوله مانومتر از جنس

<sup>1</sup> Sloshing

پلاستیک انعطاف پذیر بوده و در نقاط مشخصی بر روی دیواره مخزن نصب شده است. این نقاط مشخص دارای ارتفاع‌های ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۲ و ۱۵ سانتی‌متر از کف مخزن هستند. تعداد نقاط مورد بررسی بر روی دیواره مخزن، ۶ نقطه است. این مانومترها در سمت دیگر، بر روی یک صفحه عمودی در کنار یکدیگر نصب شده‌اند. با نوسان مایع در داخل مخزن، مایع در داخل مانومتر شروع به نوسان می‌کند و امکان مشاهده تغییر فشار در نقاط مشخص شده ایجاد می‌شود. بررسی‌های آزمایشگاهی، در حالت وجود تیغه میرا کننده<sup>۱</sup> با اندازه‌های مختلف و عدم وجود تیغه مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های آزمایشگاهی در ۳ دامنه متفاوت حرکت مخزن، ۳ ارتفاع متفاوت مایع، ۳ تحریک متفاوت از جانب منبع مولد نیرو انجام شده است. تمامی این بررسی‌ها در حالت عدم وجود تیغه و ۳ ابعاد متفاوت برای تیغه‌ها، انجام شده است. لذا برای بررسی تمامی حالات در نظر گرفته شده، از ۱۰۸ آزمون متفاوت استفاده شده است. در هر یک از تست‌ها، تغییرات فشار مایع ۶ نقطه مورد نظر روی دیواره مخزن، بررسی می‌شود.

### ۳-۱- ساخت سیستم آزمایشگاهی

طرح کلی سیستم آزمایشگاهی در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۳-۱) طرح کلی مجموعه آزمایشگاهی

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، برای تبدیل حرکت دورانی موتور به حرکت خطی

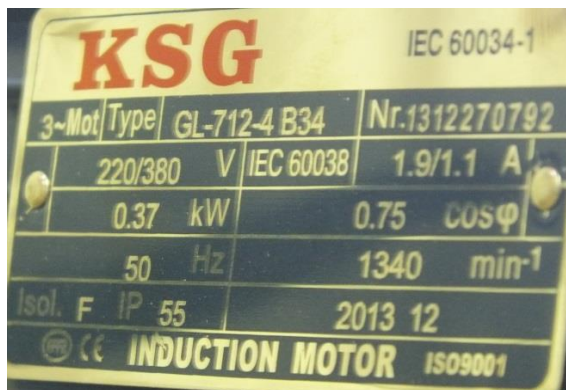
<sup>۱</sup> Baffle

رفت و برگشتی، از یک مکانیسم انتقال قدرت با میل‌لنگ استفاده شده است.

اجزا سیستم آزمایشگاهی را از سمت راست یک‌به‌یک مورد بررسی قرار می‌دهیم.

### ۳-۱-۱ سیستم مولد نیرو

برای راه انداختن این مجموعه از موتور الکتریکی<sup>۱</sup> جریان متناوب (AC) استفاده شده است (شکل (۳-۲)). موتور الکتریکی نوعی ماشین الکتریکی است که الکتریسیته را به حرکت مکانیکی تبدیل می‌کند. موتور جریان متناوب AC از دو قسمت اصلی تشکیل شده است. استاتور که هسته خارجی و معمولاً ثابت که با استفاده از جریان متناوب، میدان مغناطیسی دوار ایجاد می‌کند. روتور که هسته داخلی و متحرک که به محور خروجی متصل شده و با توجه به میدان مغناطیسی دوار تولیدشده توسط استاتور، گشتاور تولید می‌کند.



ب



الف

شکل (۳-۲) (الف) موتور AC استفاده شده (ب) مشخصات موتور

مشخصات دقیق‌تر موتور در پیوست ۱ موجود است. توان این موتور ۳۷۰ وات است که از توان موردنیاز برای حرکت دادن مخزن بیشتر است. برای تخمین توان موتور موردنیاز، می‌توان با استفاده از نیروسنج، بیشترین نیروی لازم برای حرکت مخزن را به دست آورد و با توجه به بیشترین دامنه و فرکانس حرکت مخزن (کمترین دوره تناوب حرکت مخزن)، توان موتور را حساب کرد. برای تغییر دور حرکت موتور موردنظر از یک اینورتر<sup>۲</sup> استفاده شده است (شکل (۳-۳)). اینورتر یک دستگاه

<sup>1</sup> Electric motor

<sup>2</sup> Inverter

الکتريکی است که می تواند جريان مستقيم (DC) را به جريان متناوب (AC) تبديل کند. مشخصات دقيق تر در پيوست ۲ آمده است.



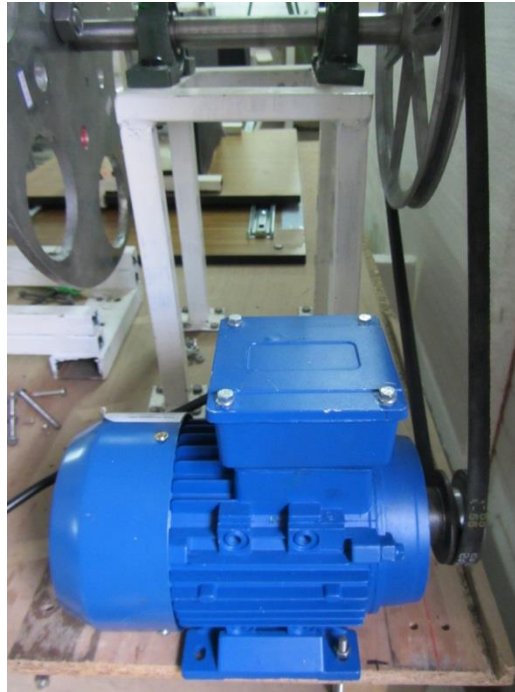
ب

الف

شکل (۳-۳) (الف) اینورتر (ب) مشخصات اینورتر مورد استفاده

### ۳-۱-۲ سیستم انتقال قدرت

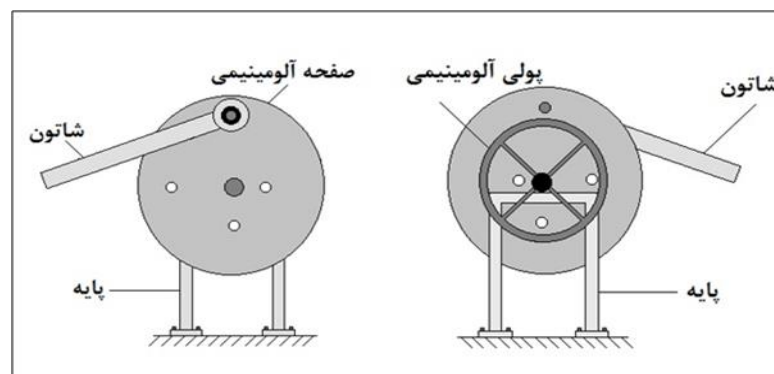
برای انتقال قدرت ایجاد شده توسط موتور به مخزن، از یک مکانیسم میل لنگ استفاده شده است و برای انتقال حرکت دورانی ایجاد شده توسط موتور به مکانیسم انتقال از یک تسمه استفاده شده است که در آن شیار پولی موتور و شیار پولی آلومینیومی با محکم کردن موتور روی صفحه، در یک راستا قرار گرفته اند (شکل (۳-۴)).



شکل (۳-۴) نمایش راستای یکسان پولی موتور و شیار پولی آلومینیومی

با استفاده از این مکانیسم حرکت دورانی موتور به حرکت رفت و برگشتی تبدیل می‌شود.

همچنین امکان ایجاد دامنه‌های متفاوت برای حرکت مخزن نیز امکان‌پذیر می‌شود. در شکل (۳-۵) طرحی از سیستم انتقال قدرت ارائه شده است.



شکل (۳-۵) طرح سیستم انتقال قدرت [۶۰]

برای ساخت این وسیله از یک میله آهنی توپر استفاده شده است که در یک سمت آن پولی

آلومینیومی و در سمت دیگر آن صفحه دایره‌ای از جنس آلومینیوم نصب شده است. میله به کمک دو

یاتاقان بر روی پایه تعبیه شده قرار گرفته است. میله از جنس آهن و پولی و صفحه دایره‌ای هر دو از

جنس آلومینیوم می‌باشند. علت استفاده از آلومینیوم برای پولی و صفحه دایره‌ای، سبکی و استحکام بالای آن است (شکل (۳-۶)).



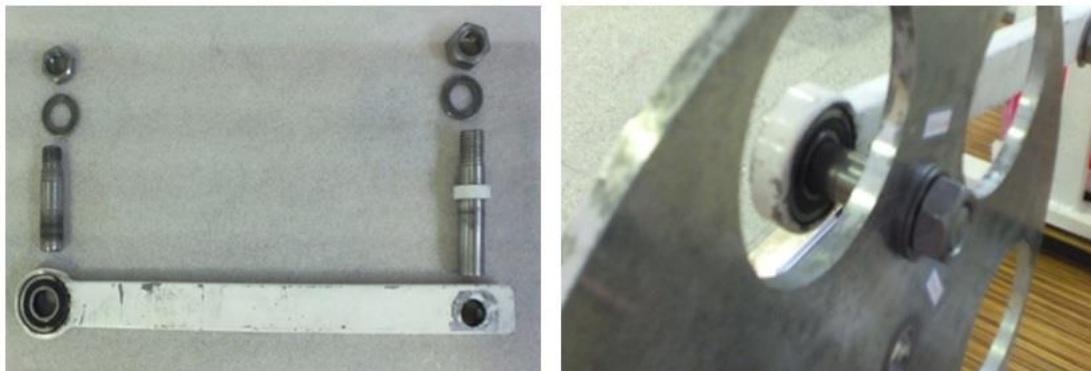
ب

الف

شکل (۳-۶) (الف) مکانیسم انتقال قدرت (ب) چیدمان مکانیسم انتقال قدرت [۶۰]

همان‌طور که در شکل (۳-۶) دیده می‌شود، روی صفحه آلومینیومی سوراخ‌هایی ایجاد شده است که امکان نصب شاتون روی هر یک از این سوراخ‌ها وجود دارد. با نصب شاتون روی هر یک از این سوراخ‌ها که در فواصل متفاوت از مرکز ایجاد شده‌اند، امکان ایجاد دامنه‌های متفاوت حرکت مخزن ایجاد می‌شود.

حرکت دورانی صفحه آلومینیومی به وسیله شاتون به حرکت رفت و برگشتی در مخزن تبدیل می‌شود. برخلاف میله آهنی که پولی و صفحه آلومینیومی را به هم متصل می‌کند برای ساخت این شاتون از میله توخالی آهنی استفاده شده است که علاوه بر وزن کم مقاومت خوبی را هم در برابر نیروهای دینامیکی داشته باشد و وزن آن روی حرکت دورانی صفحه آلومینیومی تأثیری را نگذارد. برای حرکت روان شاتون بر روی صفحه آلومینیومی، از بلبرینگ استفاده شده است. پین آهنی در یک سمت به وسیله مهره محکم شده است و در طرف دیگر در داخل بلبرینگ شاتون قرار گرفته است.



ب

الف

شکل (۷-۳) (الف) نحوه اتصال شاتون و صفحه آلومینیومی (ب) شاتون به همراه پین‌های اتصالی و مهره با توجه به توضیحات بیان شده حرکت دورانی موتور با استفاده از تسمه به پولی آلومینیومی انتقال می‌یابد و با توجه به اینکه قطر پولی آلومینیومی ۶ برابر قطر پولی موتور است، سرعت دورانی موتور به  $1/6$  در پولی آلومینیومی کاهش می‌یابد (رابطه (۳-۱)). استفاده از این سیستم مکانیکی این شرایط را ایجاد می‌کند که نیازی به کاهش زیاد دور توسط اینورتر و کاهش توان انتقالی، نباشد.

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (۳-۱)$$

### ۳-۱-۳ محل قرارگیری مخزن و صفحه MDF

در این مرحله برای ایجاد امکان حرکت رفت و برگشتی برای مخزن از یک صفحه ثابت و یک صفحه متحرک از جنس MDF استفاده شده است. صفحه متحرک در واقع محل قرارگیری مخزن است که با استفاده از یک سازه فلزی به سیستم انتقال قدرت متصل شده است. از طرفی وجود این سازه فلزی به استحکام صفحه MDF کمک می‌کند. در شکل (۳-۸) محل قرارگیری مخزن روی صفحه متحرک به همراه سازه فلزی نشان داده شده است.





شکل (۸-۳) محل قرارگیری مخزن روی صفحه متحرک

سازه فلزی موجود روی صفحه متحرک با استفاده از بلبرینگ و پین مشابه اتصال صفحه

آلومینیومی و شاتون که پیش تر توضیح داده شد، به شاتون متصل شده است (شکل (۹-۳)).



شکل (۹-۳) نحوه اتصال سازه فلزی صفحه متحرک به شاتون

صفحه متحرک با استفاده از چهار ریل امکان حرکت خطی را بر روی صفحه ثابت پیدا می کند.



ب



الف

شکل (۱۰-۳) (الف) نحوه قرارگیری صفحه متحرک روی صفحه ثابت (ب) صفحه ثابت به همراه ریلها

## ۳-۱-۴ مخزن و تیغه‌های میرا کننده

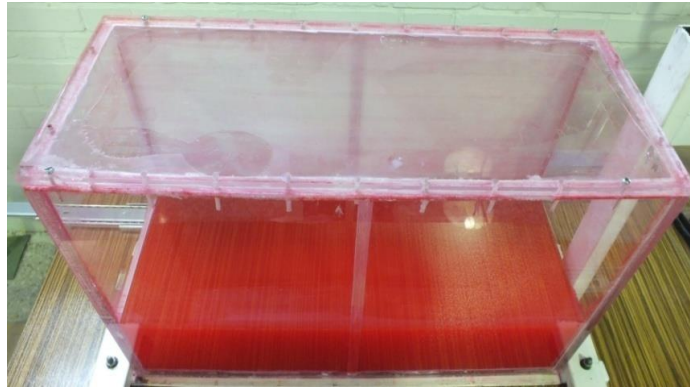
برای بررسی تأثیرات ناشی از پدیده تلاطم در این پژوهش، از یک مخزن مکعب مستطیلی استفاده شده است. برای ساخت این مخزن از صفحه‌های پلکسی به ضخامت یک سانتی‌متر استفاده شده است. از جمله ویژگی‌های صفحات پلکسی، می‌توان به شفافیت، مقاومت در برابر نیروهای دینامیکی و ضربه اشاره کرد. ابعاد مخزن موردنظر،  $20 \times 30 \times 50$  سانتی‌متر است. این ابعاد بر این اساس انتخاب شده است که در پژوهشی دیگر [۶۰] با استفاده از این مخزن به بررسی شکل سطح آزاد مایع درون مخزن پرداخته شده است و در این پژوهش هدف این است که تأثیرات ناشی از تلاطم بر روی دیواره مخزن مورد بررسی قرار گیرد. در این بررسی تجربی، از دو مخزن مشابه استفاده شده است. در یکی از مخازن امکان نصب تیغه‌های میرا کننده وجود دارد و دیگری جهت بررسی در حالت عدم وجود تیغه میرا کننده است (شکل ۳-۱۱)). جنس تیغه‌های میرا کننده نیز از پلکسی است. برای جلوگیری از خروج مایع از مخزن از درپوش با جنس پلکسی استفاده شده است که با پیچ روی مخزن محکم شده است و با صفحه‌های پلاستیکی آب‌بند شده است (شکل ۳-۱۲)).



ب

الف

شکل (۳-۱۱) (الف) مخزن بدون امکان نصب تیغه میرا کننده (ب) مخزن با امکان نصب تیغه میرا کننده

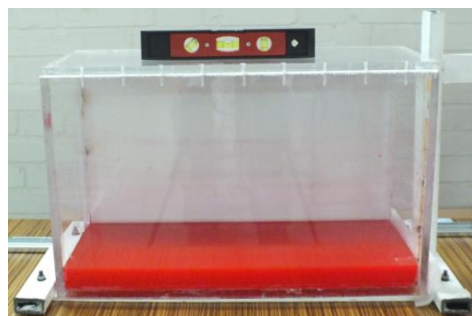


شکل (۱۲-۳) مخزن به همراه درپوش پلاستیکی تعبیه شده

تمامی سیستم آزمایشگاهی بر روی یک صفحه تخت ثابت محکم شده است (شکل (۱۳-۳)). این صفحه به همراه مخزن موردنظر، با استفاده از تراز به صورت کاملاً افقی، تنظیم شده‌اند (شکل (۱۴-۳)).



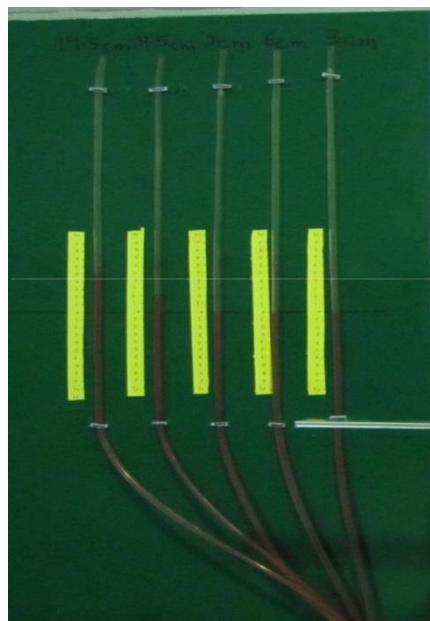
شکل (۱۳-۳) سیستم آزمایشگاهی نصب شده بر روی صفحه تخت



شکل (۱۴-۳) آزمون تراز بودن مخزن

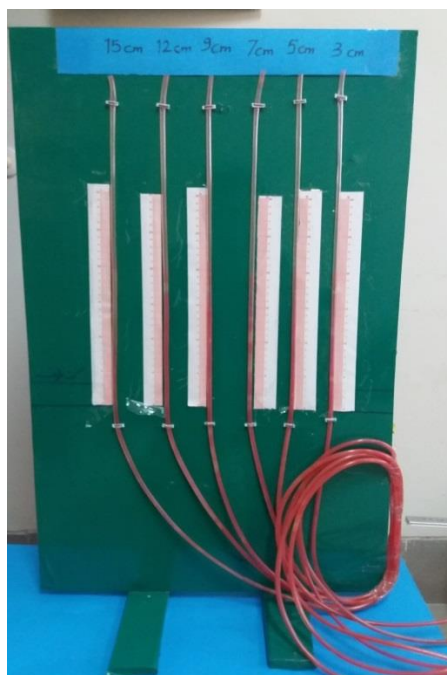
## ۳-۱-۵ مانومتر

برای بررسی فشار وارد بر دیواره مخزن بر اثر تلاطم سیال در داخل مخزن، از مانومتر استفاده شده است. برای این منظور از لوله‌هایی از جنس پلاستیک شفاف و انعطاف‌پذیر استفاده شده است. اندازه شعاع داخلی این لوله‌ها برابر ۲ میلی‌متر است. تعداد نقاط در نظر گرفته شده بر روی دیواره مخزن، ۶ نقطه در ارتفاع‌های متفاوت نسبت به کف مخزن، است. این لوله‌های مانومتری بر روی یک صفحه عمودی ثابت، فیکس شده‌اند. در شکل (۳-۱۵) نحوه قرارگیری مانومترها بر روی صفحه ثابت عمودی نشان داده شده است. این صفحه، تخت و از جنس چوب است که دارای یک روکش پلاستیکی رنگی شفاف است.



شکل (۳-۱۵) صفحه عمودی به همراه مانومترهای تعبیه شده روی آن

این صفحه به صورت عمودی در کنار مخزن به صورت ثابت قرار دارد. هر کدام از این مانومترها امکان مشاهده تغییرات ارتفاع مایع در دیواره مخزن را ایجاد می‌کنند و هر یک در سمت دیگر به نقطه مورد نظر برای بررسی در مخزن مکعب مستطیلی متصل شده‌اند. در شکل (۳-۱۶) نحوه قرارگیری عمودی این صفحه نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۶) صفحه مانومتری عمود شده به وسیله پایه

در شکل (۳-۱۷) مخزن به همراه صفحه مانومتری نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، مانومترها برای بررسی تغییرات ارتفاع مایع روی دیواره مخزن تعبیه شده اند.



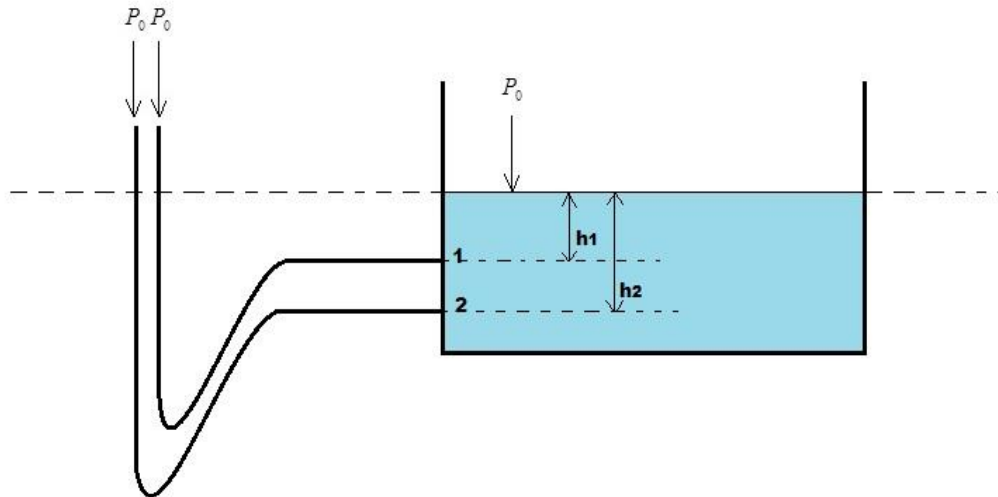
شکل (۳-۱۷) مخزن به همراه صفحه مانومتری و مانومترهای تعبیه شده

### ۳-۲ نحوه قرارگیری مایع در مانومترها

همان طور که بیان شد ۶ نقطه روی دیواره مخزن در نظر گرفته شده است که برای هر یک از این نقاط یک مانومتر تعبیه شده است. با این ابزار مکانیکی تعبیه شده امکان بررسی تغییرات ارتفاع مایع در دیواره مخزن، در این ۶ نقطه ایجاد می شود. از طرفی امکان ایجاد ارتفاعهای متفاوت مایع در مخزن وجود دارد. مایع با استفاده از سرنگ به داخل مانومترها تزریق می شود.



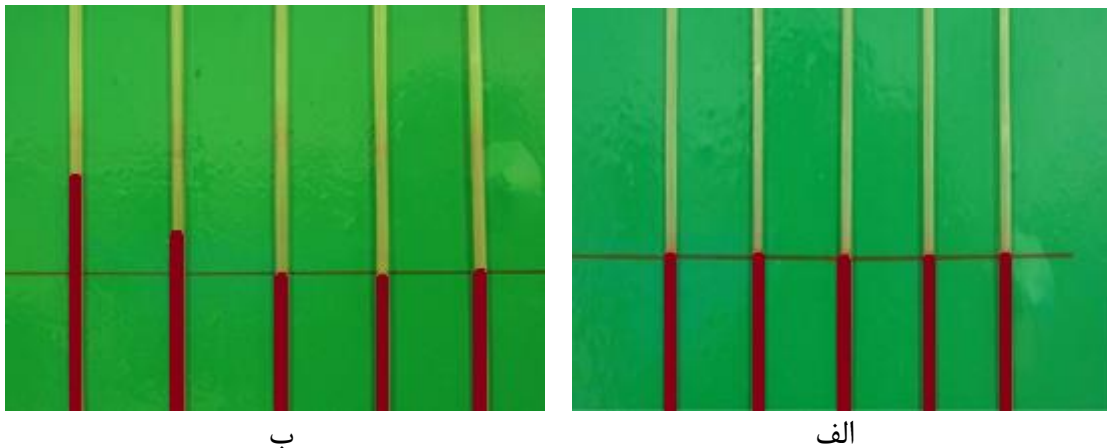
اگر ارتفاع مایع در مخزن به نحوی باشد که تمامی مانومترها را شامل بشود یعنی ارتفاع مایع در مخزن از ارتفاع آخرین مانومتر تعبیه شده در مخزن بیشتر باشد آنگاه طبق روابط استاتیکی سیال در مانومتر، ارتفاع سیال در مانومترها یکسان و به اندازه ارتفاع مایع در مخزن خواهد بود.



شکل (۳-۱۸) شمای کلی مخزن به همراه مانومتر در حالت ارتفاع یکسان مایع در مانومتر

$$P_1 = P_0 + \rho gh_1, P_2 = P_0 + \rho gh_2 \quad (۳-۲)$$

همان طور که در شکل (۳-۱۸) مشخص شده است، زمانی که ارتفاع مایع در مخزن بیشتر از ارتفاع آخرین مانومتر باشد، ارتفاع مایع در مانومترها یکسان خواهد بود. از طرفی اگر ارتفاع مایع کمتر از نقطه‌ای از نقاط مدنظر در دیواره مخزن باشد، آنگاه ارتفاع مایع در مانومترها در حالت استاتیک اولیه، متفاوت خواهد بود. در شکل (۳-۱۹) نکته بالا به وضوح مشخص شده است.



شکل (۳-۱۹) (الف) ارتفاع یکسان مایع در مانومترها (ب) ارتفاع متفاوت مایع در مانومترها

### ۳-۳ انجام آزمون‌های آزمایشگاهی

برای بررسی تأثیرات وجود تیغه میرا کننده بر فشار وارد بر دیواره مخزن از جانب سیال مایع داخل مخزن و همچنین بررسی عوامل دیگر، آزمون‌های متعددی انجام شده است. برای این منظور شرایط متفاوت آزمایش در نظر گرفته شده است. برای ایجاد حرکت از موتور مولد نیرو استفاده شده است که ۳ دور متفاوت حرکت در انجام آزمون‌های مربوطه برای موتور در نظر گرفته شده است.

از طرفی همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، با توجه به سوراخ‌های ایجاد شده روی صفحه آلومینیومی امکان ایجاد دامنه‌های حرکتی متفاوت برای مخزن ایجاد شده است. امکان نصب شاتون روی هر یک از این سوراخ‌ها وجود دارد. با نصب شاتون روی هر یک از این سوراخ‌ها که در فواصل متفاوت از مرکز ایجاد شده‌اند، دامنه‌های حرکتی متفاوت برای مخزن ایجاد می‌شود. تعداد این سوراخ‌ها ۳ عدد است که در نهایت امکان ایجاد ۳ دامنه متفاوت برای حرکت مخزن ایجاد شده است.

لذا با توجه به اینکه ۳ سرعت دوران متفاوت برای موتور و ۳ دامنه متفاوت برای حرکت مخزن در نظر گرفته شده است، امکان ایجاد ۹ فرکانس حرکتی متفاوت برای مخزن وجود دارد لذا در انجام تست‌های مربوطه از ۹ فرکانس متفاوت برای حرکت مخزن استفاده شده است.

علاوه بر این موارد امکان وجود ارتفاع‌های متفاوت مایع در مخزن وجود دارد و در انجام تمامی تست‌های آزمایشگاهی از ۳ ارتفاع متفاوت مایع در داخل مخزن استفاده شده است. با توجه به وجود ۹ فرکانس متفاوت برای حرکت مخزن و ۳ ارتفاع متفاوت مایع درون مخزن، امکان انجام ۲۷ تست متفاوت ایجاد می‌شود.

تمامی این ۲۷ تست مختلف در حالات وجود تیغه و عدم وجود تیغه میرا کننده<sup>۱</sup> انجام شده است. با توجه به اینکه از تیغه‌های میرا کننده با ۳ ارتفاع متفاوت استفاده شده است و در یک حالت تیغه میرا کننده وجود ندارد، جمعاً تمامی این ۲۷ تست آزمایشگاهی در هر یک از ۴ حالت وجود و عدم وجود تیغه میرا کننده انجام شده است. لذا ۱۰۸ تست مختلف با این شرایط آزمایش، انجام شده است.

<sup>۱</sup> Baffle

مشخصاً در هر تست آزمایشگاهی، ۶ نقطه روی دیواره مخزن مورد بررسی قرار گرفته است.

فرکانس‌های متفاوت حرکت مخزن عبارت‌اند از:

$$۰/۲۲۲، ۰/۲۵۶، ۰/۲۸۹، ۰/۳۸۴، ۰/۴۱۶، ۰/۴۴۴، ۰/۵۲۶، ۰/۵۵۵، ۰/۶۲۵ \text{ هرتز}$$

ارتفاع‌های متفاوت مایع در مخزن: ۶، ۱۰، ۱۴ سانتی‌متر

ارتفاع‌های متفاوت تیغه میرا کننده عمودی تعبیه شده در کف مخزن: ۶، ۸، ۱۰ سانتی‌متر

علت انتخاب این فرکانس‌های متفاوت برای حرکت مخزن، این است که تمامی این مقادیر کمتر

از فرکانس تشدید مایع در مخزن می‌باشند و رفتار غیرخطی مایع در مخزن اتفاق نمی‌افتد. طبق

بررسی‌های انجام شده در سال ۱۹۳۲ توسط Lamb و همکاران [۵۹]، رابطه فرکانس تشدید مایع در

مخزن به صورت زیر است.

$$\omega_n = \sqrt{g \frac{\pi}{L} \tanh\left(\frac{\pi}{L} h\right)} \quad , \quad L = \text{Tank Length} \quad , \quad h = \text{Liquid Depth} \quad (۳-۳)$$

$$h = 6\text{cm} : f_n = 0.795\text{Hz} \quad , \quad h = 10\text{cm} : f_n = 0.985\text{Hz} \quad , \quad h = 14\text{cm} : f_n = 1.105\text{Hz}$$

از طرفی برای بررسی تأثیرات تغییر ارتفاع مایع ۳ ارتفاع متفاوت مایع شامل ارتفاع کم، متوسط و

زیاد مورد بررسی قرار می‌گیرد. باید توجه داشت که در حالات مختلف این ارتفاع مایع از ارتفاع تیغه

کمتر، برابر و یا بیشتر است که امکان بررسی بهتر را ایجاد می‌کند. از ارتفاع‌های متفاوت تیغه برای

بررسی تأثیرات تغییر ارتفاع تیغه، استفاده شده است. این ارتفاع تیغه کمتر، برابر و بیشتر از ارتفاع مایع

در حالات مختلف است.

در تمامی این موارد، پاسخ (تغییرات ارتفاع مایع در مانومتر) توسط تصویربرداری ثبت شده است.

برای این منظور از یک دوربین فیلم‌برداری با قابلیت ثبت تصاویر با توانایی ۳۰ فرم بر ثانیه استفاده شده

است. این دوربین با استفاده از سه پایه ثابت شده است و تمامی مانومترهای روی صفحه عمودی

مانومتری را، پوشش می‌دهد. اطلاعات تکمیلی در مورد دوربین فیلم‌برداری در پیوست ۳ آمده است.



مسئله مهم دیگر که در بررسی‌های تجربی باید مورد بررسی قرار گیرد بحث تکرارپذیری نتایج آزمایشگاهی است. بررسی تکرارپذیری یکی از گام‌های اولیه در بررسی یک روش آزمایشگاهی بوده و به منظور تخمین میزان عدم دقت یا خطای راندوم آزمایش بکار می‌رود. در این بررسی باید یک آزمون آزمایشگاهی چند بار تکرار شده و نتایج آن در تکرارهای متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. در صورت برابری نتایج می‌توان به یکسان بودن نتایج در تکرارهای متفاوت پی برد؛ اما اندازه‌گیری دقیق یک کمیت بدون معناست زیرا عوامل زیادی مانع رسیدن ما به مقدار دقیق است که حذف همه آن‌ها به طور کامل ممکن نیست. خطای یک کمیت از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon = x - X \quad (3-4)$$

در این رابطه مقدار  $x$ ، مقدار واقعی کمیت مورد نظر و  $X$  مقدار اندازه‌گیری شده است. خطای تخمینی یک کمیت به ما نشان می‌دهد که تا چه اندازه می‌توان به مقدار کمیت داده‌شده اطمینان پیدا کرد. خطاهای ایجادشده را می‌توان به دودسته خطاهای تصادفی و خطاهای سیستماتیک دسته‌بندی کرد. عواملی همچون تغییرات دما، رطوبت، جریان‌ات جوی، تغییرات جریان‌ات برق، خود شخص اندازه‌گیر می‌توانند عامل تولید خطای تصادفی باشند. از جمله خطاهای سیستماتیک می‌توان به معیوب بودن وسیله اندازه‌گیری اشاره کرد. به طور مثال اگر در یک وسیله عقربه‌ای محور عقربه از مرکز صفحه مدرج انحراف داشته باشد ما شاهد یک خطای سیستماتیک هستیم. اندازه‌گیری ارتفاع یک مایع در لوله وقتی از یک مقیاس متصل به لوله استفاده می‌کنیم و لوله دقیقاً قائم نباشد. اندازه‌گیری شتاب جاذبه زمین به وسیله یک سطح شیب‌دار که دارای اصطکاک است و ما فرض نبود آن را کرده‌ایم.

ما برای به دست آوردن مقدار درست یک کمیت چند بار اندازه‌گیری را انجام می‌دهیم. اعداد

به دست آمده را  $x_1, x_2, \dots, x_N$  می‌نامیم.

هدف نهایی ما در این قسمت دو چیز است:

۱- یافتن مقدار مناسب کمیت از روی اعداد موجود

۲- یافتن خطای تخمینی از روی اعداد موجود

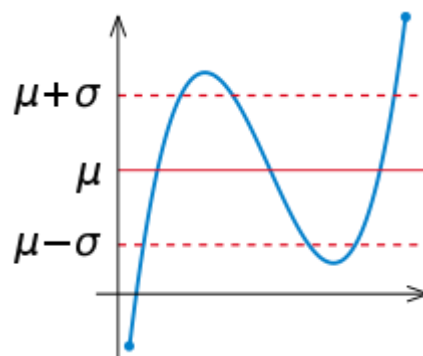
برای یافتن مقدار مناسب کمیت از روی اعداد موجود، از میانگین این اعداد استفاده

می‌کنیم (رابطه (۳-۵)).

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} \quad (۳-۵)$$

در آمار انحراف معیار که با نماد  $\sigma$  نشان داده می‌شود، یکی از شاخص‌های پراکندگی است که

نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند.



شکل (۳-۲۰) نمودار انحراف معیار

رابطه انحراف معیار در زیر آورده شده است:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (۳-۶)$$

اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به

میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند؛ در حالی که انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه

داده‌ها می‌باشد.

به‌طور معمول تکرارپذیری با ۱۰ بار تکرار برای نمونه‌های کوچک و ۲۰ بار تکرار برای نمونه‌های بزرگ بوده و با محاسبه میانگین و انحراف معیار به دست می‌آید. در این پژوهش برای بررسی دقت سیستم آزمایشگاهی، تکرارپذیری با ۳ بار آزمون انجام شده است. مشاهدات نشان می‌دهد که در تکرارهای متفاوت تغییر زیادی در نتایج رخ نمی‌دهد و آزمون‌ها در تکرارهای متفاوت نتایج مشابهی را دارند.

قبل از انجام آزمون‌های متفاوت که نتایج آن در جداول (۳-۱) تا (۳-۴) آمده است، تکرارپذیری نتایج آزمایشگاهی در چند آزمون مورد بررسی قرار گرفته و بررسی‌ها نشان می‌دهد که با تکرار آزمایش تغییری در نتایج اتفاق نمی‌افتد. لذا می‌توان تمام آزمون‌های آزمایشگاهی را یک‌بار انجام داده و نتایج آن را ثبت کرد.

حال با استفاده از تصویربرداری و مشاهده تصاویر ثبت شده و آنالیز تک‌تک آن‌ها، می‌توان تغییرات ارتفاع مایع در تمامی مانومترها را در هر یک از شرایط متفاوت آزمایش، مشاهده و ثبت کرد. تمامی نتایج حاصل در جداول (۳-۱) تا (۳-۴) آمده است.

جدول (۱-۳) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حالت عدم حضور تیغه میرا کننده

ارتفاع مایع (سانتی‌متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی‌متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی‌متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۶	۴	۰/۲۸۹	۳	۳۰۰	۳۵۰	۲۵۰	٪۶۰
۶	۴	۰/۲۸۹	۵	۱۰۰	۱۴۵	۵۰	٪۶۰
۶	۴	۰/۴۴۴	۳	۳۰۰	۳۵۰	۲۵۰	٪۸۰
۶	۴	۰/۴۴۴	۵	۱۰۰	۱۵۰	۵۰	٪۸۰
۶	۴	۰/۶۲۵	۳	۳۰۰	۳۸۰	۲۱۰	٪۸۰
۶	۴	۰/۶۲۵	۵	۱۰۰	۲۵۰	۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۳	۷۰۰	۷۳۰	۶۵۰	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۵	۵۰۰	۵۲۵	۴۵۵	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۷	۳۰۰	۳۴۵	۲۴۵	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۹	۱۰۰	۱۳۰	۵۰	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۳	۷۰۰	۷۵۰	۶۵۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۵	۵۰۰	۵۵۰	۴۵۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۷	۳۰۰	۳۶۰	۲۴۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۹	۱۰۰	۱۶۰	۴۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۳	۷۰۰	۸۰۰	۶۰۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۵	۵۰۰	۶۲۰	۳۹۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۷	۳۰۰	۴۱۰	۱۹۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۹	۱۰۰	۲۲۰	۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۳	۱۱۰۰	۱۱۴۰	۱۰۶۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۵	۹۰۰	۹۳۵	۸۶۵	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۷	۷۰۰	۷۲۰	۶۵۵	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۹	۵۰۰	۵۴۰	۴۶۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۱۲	۲۰۰	۲۴۵	۱۵۵	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۳	۱۱۰۰	۱۱۱۰	۱۰۹۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۵	۹۰۰	۹۳۰	۸۶۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۷	۷۰۰	۷۴۰	۶۷۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۹	۵۰۰	۵۳۰	۴۷۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۱۲	۲۰۰	۲۴۰	۱۶۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۳	۱۱۰۰	۱۱۶۰	۱۰۳۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۵	۹۰۰	۹۷۰	۸۲۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۷	۷۰۰	۷۷۰	۶۲۰	٪۸۰

ادامه جدول (۱-۳) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حالت عدم حضور تیغه میرا کننده

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۹	۵۰۰	۵۸۰	۴۱۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۱۲	۲۰۰	۳۴۵	۱۰۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۱۵	۰	۴۵	۰	٪۸۰
۶	۷/۵	۰/۲۵۶	۳	۳۰۰	۳۷۰	۲۳۰	٪۴۰
۶	۷/۵	۰/۲۵۶	۵	۱۰۰	۱۷۰	۳۰	٪۴۰
۶	۷/۵	۰/۴۱۶	۳	۳۰۰	۴۳۰	۱۷۰	٪۶۰
۶	۷/۵	۰/۴۱۶	۵	۱۰۰	۲۴۰	۰	٪۶۰
۶	۷/۵	۰/۴۱۶	۷	۰	۴۰	۰	٪۶۰
۶	۷/۵	۰/۵۵۵	۳	۳۰۰	۵۷۰	۱۵۰	٪۷۰
۶	۷/۵	۰/۵۵۵	۵	۱۰۰	۳۷۰	۰	٪۷۰
۶	۷/۵	۰/۵۵۵	۷	۰	۱۷۰	۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۳	۷۰۰	۷۷۰	۶۳۰	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۵	۵۰۰	۵۷۰	۴۳۰	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۷	۳۰۰	۳۷۰	۲۳۰	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۹	۱۰۰	۱۷۰	۳۰	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۳	۷۰۰	۷۷۰	۶۳۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۵	۵۰۰	۵۸۰	۴۲۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۷	۳۰۰	۳۹۰	۲۱۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۹	۱۰۰	۱۹۰	۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۳	۷۰۰	۸۸۰	۵۲۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۵	۵۰۰	۶۸۰	۳۲۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۷	۳۰۰	۴۹۰	۱۱۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۹	۱۰۰	۲۹۰	۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۳	۱۱۰۰	۱۱۵۰	۱۰۵۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۵	۹۰۰	۹۵۰	۸۵۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۷	۷۰۰	۷۵۰	۶۵۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۹	۵۰۰	۵۵۰	۴۵۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۱۲	۲۰۰	۲۶۰	۱۴۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۳	۱۱۰۰	۱۱۶۰	۱۰۴۰	٪۸۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۵	۹۰۰	۹۷۰	۸۳۰	٪۸۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۷	۷۰۰	۷۸۰	۶۲۰	٪۸۰

ادامه جدول (۱-۳) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حالت عدم حضور تیغه میرا کننده

ارتفاع مایع (سانتی‌متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی‌متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی‌متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۹	۵۰۰	۵۸۰	۴۲۰	٪۸۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۱۲	۲۰۰	۳۰۰	۱۰۰	٪۸۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۳	۱۱۰۰	۱۲۶۰	۹۴۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۵	۹۰۰	۱۰۶۰	۷۴۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۷	۷۰۰	۸۷۰	۵۳۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۹	۵۰۰	۶۷۰	۱۵۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۱۲	۲۰۰	۳۸۰	۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۱۵	۰	۸۰	۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۲۲۲	۳	۳۰۰	۳۳۰	۲۵۰	٪۴۰
۶	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۱۰۰	۱۳۰	۵۰	٪۴۰
۶	۱۰	۰/۳۸۴	۳	۳۰۰	۴۸۰	۱۲۰	٪۶۰
۶	۱۰	۰/۳۸۴	۵	۱۰۰	۲۸۰	۰	٪۶۰
۶	۱۰	۰/۳۸۴	۷	۰	۸۰	۰	٪۶۰
۶	۱۰	۰/۵۲۶	۳	۳۰۰	۵۳۰	۸۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۵۲۶	۵	۱۰۰	۳۳۰	۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۵۲۶	۷	۰	۱۳۰	۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۳	۷۰۰	۷۲۰	۶۸۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۵۰۰	۵۲۰	۴۸۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۷	۳۰۰	۳۳۰	۲۷۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۹	۱۰۰	۱۳۰	۷۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۳	۷۰۰	۸۰۰	۶۰۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۵	۵۰۰	۶۰۰	۴۰۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۷	۳۰۰	۴۰۰	۲۰۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۹	۱۰۰	۲۰۰	۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۳	۷۰۰	۹۲۰	۴۸۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۵	۵۰۰	۷۲۰	۲۸۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۷	۳۰۰	۵۲۰	۸۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۹	۱۰۰	۳۲۰	۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۱۲	۰	۲۰	۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۳	۱۱۰۰	۱۱۳۰	۱۰۵۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۹۰۰	۹۳۰	۸۵۰	٪۴۰

ادامه جدول (۱-۳) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حالت عدم حضور تیغه میرا کننده

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۹۰۰	۹۳۰	۸۵۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۷	۷۰۰	۷۳۰	۶۵۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۹	۵۰۰	۵۴۰	۴۴۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۱۲	۲۰۰	۲۵۰	۱۳۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۳	۱۱۰۰	۱۲۲۰	۹۷۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۵	۹۰۰	۱۰۲۰	۷۷۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۷	۷۰۰	۸۲۰	۵۷۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۹	۵۰۰	۶۲۰	۳۷۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۱۲	۲۰۰	۳۲۰	۷۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۳	۱۱۰۰	۱۲۷۰	۹۲۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۵	۹۰۰	۱۰۸۰	۷۲۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۷	۷۰۰	۸۸۰	۵۲۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۹	۵۰۰	۶۸۰	۳۲۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۱۲	۲۰۰	۳۸۰	۴۰	٪۷۰

جدول (۲-۳) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حضور تیغه میرا کننده ۶ سانتی متر

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۶	۴	۰/۲۸۹	۳	۳۰۰	۳۲۰	۲۷۰	٪۶۰
۶	۴	۰/۲۸۹	۵	۱۰۰	۱۱۵	۷۵	٪۶۰
۶	۴	۰/۴۴۴	۳	۳۰۰	۳۳۰	۲۶۰	٪۸۰
۶	۴	۰/۴۴۴	۵	۱۰۰	۱۳۵	۶۰	٪۸۰
۶	۴	۰/۶۲۵	۳	۳۰۰	۳۸۰	۲۱۰	٪۸۰
۶	۴	۰/۶۲۵	۵	۱۰۰	۱۹۰	۲۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۳	۷۰۰	۷۳۰	۶۵۰	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۵	۵۰۰	۵۲۵	۴۵۵	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۷	۳۰۰	۳۴۵	۲۴۵	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۹	۱۰۰	۱۳۰	۵۰	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۳	۷۰۰	۷۵۰	۶۱۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۵	۵۰۰	۵۵۵	۴۱۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۷	۳۰۰	۳۶۵	۲۰۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۹	۱۰۰	۱۶۵	۱۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۳	۷۰۰	۸۴۰	۵۲۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۵	۵۰۰	۶۵۰	۳۲۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۷	۳۰۰	۴۵۰	۱۲۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۹	۱۰۰	۲۶۰	۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۳	۱۱۰۰	۱۱۳۰	۱۰۵۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۵	۹۰۰	۹۳۰	۸۵۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۷	۷۰۰	۷۴۰	۶۴۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۹	۵۰۰	۵۳۰	۴۵۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۱۲	۲۰۰	۲۴۰	۱۴۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۳	۱۱۰۰	۱۱۳۰	۱۰۱۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۵	۹۰۰	۹۴۰	۸۱۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۷	۷۰۰	۷۵۰	۶۰۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۹	۵۰۰	۵۵۰	۴۰۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۱۲	۲۰۰	۲۵۵	۹۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۳	۱۱۰۰	۱۲۲۰	۸۷۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۵	۹۰۰	۱۰۳۰	۶۷۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۷	۷۰۰	۸۳۰	۴۷۰	٪۸۰



ادامه جدول (۲-۳) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حضور تیغه میرا کننده ۶ سانتی متر

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۹	۵۰۰	۶۴۰	۲۶۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۱۲	۲۰۰	۳۴۵	۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۱۵	۰	۴۵	۰	٪۸۰
۶	۷/۵	۰/۲۵۶	۳	۳۰۰	۳۲۰	۲۶۰	٪۴۰
۶	۷/۵	۰/۲۵۶	۵	۱۰۰	۱۲۰	۸۰	٪۴۰
۶	۷/۵	۰/۴۱۶	۳	۳۰۰	۳۷۰	۲۴۰	٪۷۰
۶	۷/۵	۰/۴۱۶	۵	۱۰۰	۱۶۵	۴۰	٪۷۰
۶	۷/۵	۰/۵۵۵	۳	۳۰۰	۴۵۰	۱۵۰	٪۷۰
۶	۷/۵	۰/۵۵۵	۵	۱۰۰	۲۵۰	۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۳	۷۰۰	۷۴۰	۶۴۰	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۵	۵۰۰	۵۳۰	۴۴۰	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۷	۳۰۰	۳۴۰	۲۳۰	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۹	۱۰۰	۱۴۰	۴۰	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۳	۷۰۰	۷۹۰	۵۷۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۵	۵۰۰	۵۹۵	۳۷۵	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۷	۳۰۰	۴۱۰	۱۶۵	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۹	۱۰۰	۲۲۰	۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۳	۷۰۰	۹۲۰	۴۷۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۵	۵۰۰	۷۲۰	۲۷۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۷	۳۰۰	۵۳۰	۳۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۹	۱۰۰	۳۳۰	۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۳	۱۱۰۰	۱۱۴۰	۱۰۳۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۵	۹۰۰	۹۴۰	۸۳۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۷	۷۰۰	۷۴۰	۶۳۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۹	۵۰۰	۵۵۰	۴۳۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۱۲	۲۰۰	۲۶۰	۱۲۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۳	۱۱۰۰	۱۱۹۰	۹۶۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۵	۹۰۰	۹۹۰	۷۶۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۷	۷۰۰	۸۰۰	۵۵۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۹	۵۰۰	۶۰۰	۳۵۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۱۲	۲۰۰	۳۳۰	۳۰	٪۷۰

ادامه جدول (۲-۳) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حضور تیغه میرا کننده ۶ سانتی متر

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۱۵	۰	۳۰	۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۳	۱۱۰۰	۱۳۰۰	۸۳۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۵	۹۰۰	۱۱۰۰	۶۳۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۷	۷۰۰	۹۲۰	۴۲۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۹	۵۰۰	۷۲۰	۲۲۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۱۲	۲۰۰	۴۲۰	۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۱۵	۰	۱۲۰	۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۲۲۲	۳	۳۰۰	۳۲۵	۲۷۰	٪۴۰
۶	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۱۰۰	۱۳۰	۶۰	٪۴۰
۶	۱۰	۰/۳۸۴	۳	۳۰۰	۳۸۰	۱۷۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۳۸۴	۵	۱۰۰	۱۸۰	۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۵۲۶	۳	۳۰۰	۴۱۰	۱۳۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۵۲۶	۵	۱۰۰	۲۱۰	۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۵۲۶	۷	۰	۱۰	۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۳	۷۰۰	۷۴۰	۶۴۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۵۰۰	۵۴۰	۴۴۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۷	۳۰۰	۳۵۰	۲۳۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۹	۱۰۰	۱۶۰	۲۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۳	۷۰۰	۸۲۰	۵۳۰	٪۶۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۵	۵۰۰	۶۲۰	۳۳۰	٪۶۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۷	۳۰۰	۴۲۰	۱۳۰	٪۶۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۹	۱۰۰	۲۲۰	۰	٪۶۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۳	۷۰۰	۹۵۰	۴۲۰	٪۶۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۵	۵۰۰	۷۵۰	۲۲۰	٪۶۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۷	۳۰۰	۵۵۰	۱۰	٪۶۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۹	۱۰۰	۳۵۰	۰	٪۶۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۱۲	۰	۴۰	۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۳	۱۱۰۰	۱۱۴۰	۱۰۳۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۹۰۰	۹۴۰	۸۳۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۷	۷۰۰	۷۵۰	۶۲۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۹	۵۰۰	۵۶۰	۴۱۰	٪۴۰

ادامه جدول (۲-۳) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حضور تیغه میرا کننده ۶ سانتی متر

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۱۲	۲۰۰	۲۷۰	۱۰۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۳	۱۱۰۰	۱۱۹۰	۹۳۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۵	۹۰۰	۹۹۰	۷۳۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۷	۷۰۰	۷۹۰	۵۳۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۹	۵۰۰	۵۹۰	۳۳۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۱۲	۲۰۰	۲۹۰	۳۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۳	۱۱۰۰	۱۳۰۰	۷۹۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۵	۹۰۰	۱۱۰۰	۵۹۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۷	۷۰۰	۹۰۰	۳۹۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۹	۵۰۰	۷۰۰	۱۹۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۱۲	۲۰۰	۳۹۰	۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۱۵	۰	۹۰	۰	٪۷۰

جدول (۳-۳) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حضور تیغه میرا کننده ۸ سانتی متر

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۶	۴	۰/۲۸۹	۳	۳۰۰	۳۵۰	۲۵۰	٪۶۰
۶	۴	۰/۲۸۹	۵	۱۰۰	۱۴۵	۵۰	٪۶۰
۶	۴	۰/۴۴۴	۳	۳۰۰	۳۶۰	۲۵۰	٪۸۰
۶	۴	۰/۴۴۴	۵	۱۰۰	۱۶۰	۵۰	٪۸۰
۶	۴	۰/۶۲۵	۳	۳۰۰	۳۹۰	۱۹۰	٪۸۰
۶	۴	۰/۶۲۵	۵	۱۰۰	۲۰۰	۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۳	۷۰۰	۷۳۰	۶۶۰	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۵	۵۰۰	۵۲۵	۴۶۵	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۷	۳۰۰	۳۴۵	۲۵۵	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۹	۱۰۰	۱۳۰	۶۰	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۳	۷۰۰	۷۶۰	۶۲۰	٪۷۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۵	۵۰۰	۵۶۵	۴۱۵	٪۷۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۷	۳۰۰	۳۸۰	۲۰۵	٪۷۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۹	۱۰۰	۱۸۰	۱۰	٪۷۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۳	۷۰۰	۸۴۰	۵۵۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۵	۵۰۰	۶۳۰	۳۵۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۷	۳۰۰	۴۴۰	۱۵۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۹	۱۰۰	۲۴۵	۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۳	۱۱۰۰	۱۱۳۰	۱۰۵۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۵	۹۰۰	۹۲۵	۸۵۵	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۷	۷۰۰	۷۳۵	۶۴۵	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۹	۵۰۰	۵۳۰	۴۵۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۱۲	۲۰۰	۲۴۰	۱۴۵	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۳	۱۱۰۰	۱۱۴۰	۱۰۴۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۵	۹۰۰	۹۴۵	۸۳۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۷	۷۰۰	۷۶۰	۶۲۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۹	۵۰۰	۵۶۰	۴۲۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۱۲	۲۰۰	۲۶۵	۱۱۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۳	۱۱۰۰	۱۲۲۰	۹۴۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۵	۹۰۰	۱۰۳۰	۷۳۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۷	۷۰۰	۸۳۰	۵۳۰	٪۸۰

ادامه جدول (۳-۳) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حضور تیغه میرا کننده ۸ سانتی متر

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۹	۵۰۰	۶۴۰	۳۲۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۱۲	۲۰۰	۳۵۰	۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۱۵	۰	۵۰	۰	٪۸۰
۶	۷/۵	۰/۲۵۶	۳	۳۰۰	۳۵۰	۲۵۰	٪۴۰
۶	۷/۵	۰/۲۵۶	۵	۱۰۰	۱۵۰	۵۰	٪۴۰
۶	۷/۵	۰/۴۱۶	۳	۳۰۰	۳۵۰	۲۵۰	٪۸۰
۶	۷/۵	۰/۴۱۶	۵	۱۰۰	۱۶۰	۴۰	٪۸۰
۶	۷/۵	۰/۵۵۵	۳	۳۰۰	۴۲۰	۱۹۰	٪۷۰
۶	۷/۵	۰/۵۵۵	۵	۱۰۰	۲۲۰	۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۳	۷۰۰	۷۴۵	۶۳۵	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۵	۵۰۰	۵۴۵	۴۳۵	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۷	۳۰۰	۳۴۵	۲۳۵	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۹	۱۰۰	۱۵۰	۳۰	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۳	۷۰۰	۸۰۰	۵۷۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۵	۵۰۰	۶۰۰	۳۶۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۷	۳۰۰	۴۲۰	۱۶۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۹	۱۰۰	۲۲۰	۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۳	۷۰۰	۸۴۰	۵۲۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۵	۵۰۰	۶۵۰	۳۱۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۷	۳۰۰	۴۵۰	۱۱۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۹	۱۰۰	۲۵۰	۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۳	۱۱۰۰	۱۱۴۰	۱۰۴۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۵	۹۰۰	۹۴۰	۸۴۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۷	۷۰۰	۷۴۰	۶۴۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۹	۵۰۰	۵۵۰	۴۴۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۱۲	۲۰۰	۲۶۰	۱۲۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۳	۱۱۰۰	۱۱۸۰	۹۷۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۵	۹۰۰	۹۸۰	۷۷۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۷	۷۰۰	۸۰۰	۵۶۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۹	۵۰۰	۶۴۰	۳۳۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۱۲	۲۰۰	۳۲۰	۴۰	٪۷۰

ادامه جدول (۳-۳) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حضور تیغه میرا کننده ۸ سانتی متر

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۱۵	۰	۲۰	۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۳	۱۱۰۰	۱۲۹۰	۸۶۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۵	۹۰۰	۱۰۹۰	۶۵۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۷	۷۰۰	۹۰۰	۴۵۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۹	۵۰۰	۷۰۰	۲۵۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۱۲	۲۰۰	۴۱۰	۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۱۵	۰	۱۱۰	۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۲۲۲	۳	۳۰۰	۳۳۰	۲۵۰	٪۴۰
۶	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۱۰۰	۱۳۰	۴۰	٪۴۰
۶	۱۰	۰/۳۸۴	۳	۳۰۰	۳۸۰	۱۹۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۳۸۴	۵	۱۰۰	۱۸۰	۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۵۲۶	۳	۳۰۰	۴۱۰	۱۳۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۵۲۶	۵	۱۰۰	۲۱۰	۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۵۲۶	۷	۰	۱۰	۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۳	۷۰۰	۷۳۰	۶۴۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۵۰۰	۵۳۰	۴۴۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۷	۳۰۰	۳۴۰	۲۳۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۹	۱۰۰	۱۴۰	۵۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۳	۷۰۰	۸۳۰	۵۳۰	٪۶۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۵	۵۰۰	۶۳۰	۳۳۰	٪۶۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۷	۳۰۰	۴۳۰	۱۳۰	٪۶۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۹	۱۰۰	۲۳۰	۰	٪۶۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۳	۷۰۰	۸۸۰	۴۶۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۵	۵۰۰	۶۸۰	۲۶۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۷	۳۰۰	۴۸۰	۶۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۹	۱۰۰	۲۸۰	۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۳	۱۱۰۰	۱۱۲۰	۱۰۲۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۹۰۰	۹۲۰	۸۲۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۷	۷۰۰	۷۳۰	۶۱۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۹	۵۰۰	۵۴۰	۴۰۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۱۲	۲۰۰	۲۵۵	۱۰۰	٪۴۰

ادامه جدول (۳-۳) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حضور تیغه میرا کننده ۸ سانتی متر

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۳	۱۱۰۰	۱۲۱۰	۹۲۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۵	۹۰۰	۱۰۱۰	۷۲۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۷	۷۰۰	۸۱۰	۵۲۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۹	۵۰۰	۴۱۰	۳۲۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۱۲	۲۰۰	۳۱۰	۲۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۳	۱۱۰۰	۱۲۹۰	۸۱۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۵	۹۰۰	۱۰۹۰	۶۲۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۷	۷۰۰	۸۹۰	۴۲۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۹	۵۰۰	۶۹۰	۲۲۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۱۲	۳۰۰	۳۹۰	۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۱۵	۰	۹۰	۰	٪۷۰

جدول (۳-۴) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حضور تیغه میرا کننده ۱۰ سانتی متر

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۶	۴	۰/۲۸۹	۳	۳۰۰	۳۵۰	۲۵۰	٪۶۰
۶	۴	۰/۲۸۹	۵	۱۰۰	۱۴۵	۵۰	٪۶۰
۶	۴	۰/۴۴۴	۳	۳۰۰	۳۶۰	۲۵۰	٪۸۰
۶	۴	۰/۴۴۴	۵	۱۰۰	۱۶۰	۵۰	٪۸۰
۶	۴	۰/۶۲۵	۳	۳۰۰	۳۹۰	۲۱۰	٪۸۰
۶	۴	۰/۶۲۵	۵	۱۰۰	۲۰۰	۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۳	۷۰۰	۷۱۰	۶۷۰	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۵	۵۰۰	۵۱۰	۴۷۰	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۷	۳۰۰	۳۱۵	۲۶۵	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۲۸۹	۹	۱۰۰	۱۱۰	۶۰	٪۶۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۳	۷۰۰	۷۲۰	۶۶۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۵	۵۰۰	۵۲۰	۴۶۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۷	۳۰۰	۳۳۵	۲۴۵	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۴۴۴	۹	۱۰۰	۱۳۵	۴۵	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۳	۷۰۰	۷۶۰	۳۰۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۵	۵۰۰	۵۷۰	۳۹۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۷	۳۰۰	۳۷۰	۱۹۰	٪۸۰
۱۰	۴	۰/۶۲۵	۹	۱۰۰	۱۸۰	۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۳	۱۱۰۰	۱۱۲۰	۱۰۵۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۵	۹۰۰	۹۲۰	۸۵۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۷	۷۰۰	۷۲۵	۶۴۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۹	۵۰۰	۵۲۰	۴۲۰	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۲۸۹	۱۲	۲۰۰	۲۲۵	۱۴۵	٪۶۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۳	۱۱۰۰	۱۱۴۰	۱۰۲۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۵	۹۰۰	۹۵۰	۸۱۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۷	۷۰۰	۷۶۰	۶۱۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۹	۵۰۰	۵۶۰	۴۱۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۴۴۴	۱۲	۲۰۰	۲۷۰	۱۰۰	٪۷۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۳	۱۱۰۰	۱۲۴۰	۹۱۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۵	۹۰۰	۱۰۴۰	۷۱۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۷	۷۰۰	۸۴۰	۵۱۰	٪۸۰



ادامه جدول (۳-۴) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حضور تیغه میرا کننده ۱۰ سانتی‌متر

ارتفاع مایع (سانتی‌متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی‌متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی‌متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۹	۵۰۰	۶۵۰	۳۰۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۱۲	۲۰۰	۳۵۵	۰	٪۸۰
۱۴	۴	۰/۶۲۵	۱۵	۰	۵۵	۰	٪۸۰
۶	۷/۵	۰/۲۵۶	۳	۳۰۰	۳۵۰	۲۵۰	٪۴۰
۶	۷/۵	۰/۲۵۶	۵	۱۰۰	۱۵۰	۵۰	٪۴۰
۶	۷/۵	۰/۴۱۶	۳	۳۰۰	۳۵۰	۲۵۰	٪۷۰
۶	۷/۵	۰/۴۱۶	۵	۱۰۰	۱۶۰	۴۰	٪۷۰
۶	۷/۵	۰/۵۵۵	۳	۳۰۰	۴۲۰	۱۹۰	٪۷۰
۶	۷/۵	۰/۵۵۵	۵	۱۰۰	۲۲۰	۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۳	۷۰۰	۷۱۵	۶۶۵	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۵	۵۰۰	۵۱۵	۴۶۵	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۷	۳۰۰	۳۱۵	۲۶۵	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۲۵۶	۹	۱۰۰	۱۲۰	۷۰	٪۴۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۳	۷۰۰	۷۴۰	۶۳۰	٪۸۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۵	۵۰۰	۵۵۰	۴۲۵	٪۸۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۷	۳۰۰	۳۵۰	۲۳۰	٪۸۰
۱۰	۷/۵	۰/۴۱۶	۹	۱۰۰	۱۶۰	۲۰	٪۸۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۳	۷۰۰	۸۱۰	۵۷۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۵	۵۰۰	۶۱۰	۳۷۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۷	۳۰۰	۴۲۰	۱۶۰	٪۷۰
۱۰	۷/۵	۰/۵۵۵	۹	۱۰۰	۲۱۰	۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۳	۱۱۰۰	۱۱۵۰	۱۰۲۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۵	۹۰۰	۹۵۰	۸۲۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۷	۷۰۰	۷۵۰	۶۲۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۹	۵۰۰	۵۵۰	۴۲۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۲۵۶	۱۲	۲۰۰	۲۷۰	۱۱۰	٪۵۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۳	۱۱۰۰	۱۱۷۰	۹۶۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۵	۹۰۰	۹۸۰	۷۷۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۷	۷۰۰	۷۹۰	۵۶۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۹	۵۰۰	۵۹۰	۳۶۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۴۱۶	۱۲	۲۰۰	۳۱۰	۴۰	٪۷۰

ادامه جدول (۳-۴) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حضور تیغه میرا کننده ۱۰ سانتی متر

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۳	۱۱۰۰	۱۲۷۰	۸۵۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۵	۹۰۰	۱۰۷۰	۶۵۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۷	۷۰۰	۸۸۰	۴۴۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۹	۵۰۰	۶۸۰	۲۴۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۱۲	۲۰۰	۳۸۰	۰	٪۷۰
۱۴	۷/۵	۰/۵۵۵	۱۵	۰	۸۰	۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۲۲۲	۳	۳۰۰	۳۳۰	۲۵۰	٪۴۰
۶	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۱۰۰	۱۳۰	۴۰	٪۴۰
۶	۱۰	۰/۳۸۴	۳	۳۰۰	۳۸۰	۱۹۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۳۸۴	۵	۱۰۰	۱۸۰	۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۵۲۶	۳	۳۰۰	۴۱۰	۱۳۰	٪۷۰
۶	۱۰	۰/۵۲۶	۵	۱۰۰	۲۱۰	۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۳	۷۰۰	۷۲۰	۶۷۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۵۰۰	۵۲۰	۴۷۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۷	۳۰۰	۳۳۰	۲۶۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۲۲۲	۹	۱۰۰	۱۴۰	۵۰	٪۴۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۳	۷۰۰	۷۶۰	۶۱۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۵	۵۰۰	۵۶۰	۴۱۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۷	۳۰۰	۳۶۰	۲۱۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۳۸۴	۹	۱۰۰	۱۶۰	۱۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۳	۷۰۰	۸۲۰	۵۵۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۵	۵۰۰	۶۲۰	۳۵۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۷	۳۰۰	۴۲۰	۱۵۰	٪۷۰
۱۰	۱۰	۰/۵۲۶	۹	۱۰۰	۲۲۰	۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۳	۱۱۰۰	۱۱۲۰	۱۰۴۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۵	۹۰۰	۹۲۰	۸۴۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۷	۷۰۰	۷۲۰	۶۳۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۹	۵۰۰	۵۳۰	۴۲۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۲۲۲	۱۲	۲۰۰	۲۴۰	۱۱۰	٪۴۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۳	۱۱۰۰	۱۲۴۰	۹۴۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۵	۹۰۰	۱۰۴۰	۷۴۰	٪۶۰

ادامه جدول (۳-۴) گزارش نتایج حاصل در شرایط آزمایشگاهی متفاوت در حضور تیغه میرا کننده ۱۰ سانتی متر

ارتفاع مایع (سانتی متر)	دامنه حرکت مخزن (سانتی متر)	فرکانس حرکت مخزن (هرتز)	ارتفاع نقطه موردنظر در دیواره مخزن (سانتی متر)	فشار نسبی در حالت استاتیک (پاسکال)	بیشترین فشار نسبی (پاسکال)	کمترین فشار نسبی (پاسکال)	M.R.A.D
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۷	۷۰۰	۸۴۰	۵۴۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۹	۵۰۰	۶۴۰	۳۴۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۱۲	۲۰۰	۳۴۰	۴۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۳۸۴	۱۵	۰	۴۰	۰	٪۶۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۳	۱۱۰۰	۱۳۰۰	۸۲۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۵	۹۰۰	۱۱۰۰	۶۲۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۷	۷۰۰	۹۰۰	۴۲۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۹	۵۰۰	۷۰۰	۲۲۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۱۲	۲۰۰	۳۹۰	۰	٪۷۰
۱۴	۱۰	۰/۵۲۶	۱۵	۰	۹۰	۰	٪۷۰

همان‌طور که در جداول (۳-۱) تا (۳-۴) نشان داده شده است، ارتفاع مایع در داخل مخزن مکعب مستطیلی و دامنه حرکت رفت و برگشتی مخزن به همراه تمامی فرکانس‌های در نظر گرفته شده برای آن، به‌عنوان شرایط آزمایش نشان داده شده است. در ستون بعدی ارتفاع نقطه موردنظر روی دیواره از کف مخزن نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد هر یک از این نقاط به یک مانومتر متصل شده است که با استفاده از مانومتر و بررسی تغییرات ارتفاع مایع در آن، در نهایت تغییرات فشار وارد بر دیواره مخزن از جانب مایع را مورد بررسی قرار داد. منظور از عبارت<sup>۱</sup> M.R.A.D، بیشینه نسبت تفاضل دامنه است که در فصل پنجم به‌طور کامل توضیح داده می‌شود. تمامی داده‌های بالا از بررسی‌های انجام شده در حالت پایا<sup>۲</sup> به دست آمده است. منظور از حالت پایا عدم تغییر شکل تغییرات فشار و تکرارپذیری آن در یک دوره تناوب با دوره تناوب دیگر است.

فشار نسبی مایع روی نقطه موردنظر در شرایط استاتیک با واحد پاسکال بیان شده است و مقدار ماکزیمم و مینیمم ارتفاع مایع در داخل مانومتر در حین تلاطم با شرایط آزمایشگاهی مفروض، مشاهده و فشار مربوط به آن در جدول گزارش شده است. همان‌طور که می‌دانیم هر میلی‌متر آب دارای فشاری معادل ۱۰ پاسکال است.

$$P = \rho gh = 1000 \left( \frac{kg}{m^3} \right) \times 10 \left( \frac{m}{s^2} \right) \times (1 \times 10^{-3}) m = 10 (Pa) \quad (7-3)$$

### ۳-۴ بررسی تأثیرات تکان خوردن مانومترها

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مانومترها از یک سمت روی صفحه عمودی متصل و محکم شده‌اند. این صفحه به‌صورت ثابت و در نزدیکی مخزن قرار گرفته است و طولی از مانومتر که حاوی مایع است برابر ۲ متر است. این مانومترها از سمت دیگر به نقاط موردنظر روی دیواره مخزن، متصل شده‌اند. تمامی مانومترها دارای جنس پلاستیک شفاف انعطاف‌پذیر با شعاع داخلی ۲ میلی‌متر است.

<sup>۱</sup> Maximum Relative Amplitude Difference  
<sup>۲</sup> Steady

مشخصاً با حرکت مخزن و به خاطر اتصال این مانومترها به آن، مانومترها نیز تکان‌هایی را تجربه می‌کنند که این حرکات و تکان‌ها روی تغییرات ارتفاع مایع در مانومتر تأثیر می‌گذارد و باعث می‌شود که مقادیر خوانده‌شده در مانومتر صرفاً فقط به خاطر اثرات تلاطم نباشد و بخشی از این تغییرات به خاطر تکان‌های خود مانومتر خواهد بود. مشاهدات در نمونه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ۲۵ تا ۷۰ درصد تغییرات ارتفاع مایع در مانومتر در حالات مختلف، به خاطر تکان خوردن‌های ناشی از خود مانومتر است که از نتایج مشاهده‌شده کسر می‌شود. حال مقادیر باقی‌مانده تأثیرات ناشی از تلاطم مایع روی دیواره مخزن است.

برای بررسی این عامل به نحو زیر عمل کرده‌ایم:

مخزن مکعب مستطیلی را خالی از مایع کرده و با استفاده از سرنگ مایع را به داخل مانومترها تزریق می‌شود. حال در داخل تمامی مانومترها مایع وجود دارد درحالی که مخزن خالی از مایع است. طول مایع تزریق‌شده در مانومترها مشابه تمامی تست‌ها برابر ۲ متر است.

حال با حرکت دادن مخزن با فرکانس‌های در نظر گرفته‌شده در انجام تست‌های آزمایشگاهی، ۹ تست مختلف در حالت مخزن خالی، انجام می‌شود. با استفاده از این تست‌ها مشاهده می‌شود که مایع در داخل مانومترها در حال حرکت رفت و برگشتی است درحالی که فشار در دو سمت مانومتر یکسان و برابر فشار هواست. لذا می‌توان نتیجه گرفت که تکان‌های خود مانومتر روی تغییرات ارتفاع مایع در مانومتر تأثیر می‌گذارد و باید این تأثیرات از تغییرات ارتفاع خوانده‌شده در مانومتر کسر شود تا فقط تأثیرات تلاطم موردبررسی قرار بگیرد.

دامنه تغییرات ارتفاع مایع در داخل مانومترها به خاطر تأثیرات تکان‌های مانومتر، در فرکانس‌های متفاوت حرکت برای مخزن، در جدول (۳-۵) با واحد سانتی‌متر آمده است. منظور از نقطه ۱، نقطه با ارتفاع ۳ سانتی‌متر از کف مخزن هست. به همچنین نقطه ۲ نقطه با ارتفاع ۵ سانتی‌متر، نقطه ۳ نقطه با ارتفاع ۷ سانتی‌متر، نقطه ۴ نقطه با ارتفاع ۹ سانتی‌متر، نقطه ۵ نقطه با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و نقطه ۶ نقطه با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر از کف مخزن است.

جدول (۳-۵) دامنه تغییرات ارتفاع مایع در مانومتر در حالت مخزن خالی

فرکانس تحریک (هرتز)	دامنه تغییرات در نقطه ۱ (سانتی متر)	دامنه تغییرات در نقطه ۲ (سانتی متر)	دامنه تغییرات در نقطه ۳ (سانتی متر)	دامنه تغییرات در نقطه ۴ (سانتی متر)	دامنه تغییرات در نقطه ۵ (سانتی متر)	دامنه تغییرات در نقطه ۶ (سانتی متر)
۰/۲۲۲	۱/۹	۱/۹	۱/۸	۱/۷	۱/۶۵	۱/۶
۰/۲۵۶	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸	۰/۷	۰/۶۵
۰/۲۸۹	۰/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲
۰/۳۸۴	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۰/۴۱۶	۱/۷	۱/۶۵	۱/۵۵	۱/۵	۱/۳	۱/۲
۰/۴۴۴	۰/۹	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۵۵
۰/۵۲۶	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸
۰/۵۵۵	۱	۱	۰/۹	۰/۹	۰/۸۵	۰/۸۵
۰/۶۲۵	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۰/۳۵	۰/۳۵

در جدول بالا دامنه تغییرات ارتفاع مایع در داخل مانومترها در فرکانس‌های متفاوت موردنظر در نمونه‌های آزمایشگاهی در حالت مخزن خالی، گزارش شده است. منظور از نقطه ۳ سانتی‌متر این است که نقطه موردبررسی که به آن یک مانومتر متصل شده است دارای ارتفاع ۳ سانتی‌متر از کف مخزن است و در مورد سایر نقاط نیز به همین منوال است. حال با داشتن مقادیر بالا می‌توان دامنه تغییرات خوانده‌شده از مانومتر را اصلاح کرد و تأثیرات حرکت لوله مانومتر را کنار گذاشت. لذا دامنه ناشی از تکان خوردن لوله‌های مانومتر که در جدول (۳-۵) آمده است از دامنه تغییرات ارتفاع در مانومتر که با استفاده از تصویربرداری و مشاهده ثبت شده است، کسر می‌شود و تأثیرات ناشی از تکان خوردن مانومترها کنار می‌رود. در این حالت مقدار اصلاح شده دامنه تغییرات ارتفاع در مانومتر، فقط از تلاطم مایع در مخزن ناشی می‌شود.

مقادیر گزارش شده در جداول (۳-۱) تا (۳-۴) مقادیر اصلاح شده و نهایی می‌باشند که در تمامی آن‌ها تأثیرات تکان‌های ناشی از حرکت مانومترها از مقادیر خوانده شده کسر شده است.

فصل چہارم

شیئہ سازی محاسباتی

## ۴-۱ نرم افزار OpenFOAM

دینامیک سیالات محاسباتی شاخه‌ای از مکانیک سیالات است که به حل عددی جریان سیال می‌پردازد که می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری قوی و مناسب برای تحلیل و پیش‌بینی جریان سیالات و انتقال حرارت بهره برد. در دنیای امروز با گسترش رایانه‌های با پردازش سریع و ابررایانه‌ها، این شاخه از مکانیک در زمینه‌های مختلف گسترش بیشتری یافته است.

در کنار نرم‌افزارهای تجاری مانند Fluent و CFX در این زمینه، نرم‌افزارهای متن‌باز نیز در این شاخه ارائه شده‌اند که از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها می‌توان از نرم‌افزار متن‌باز<sup>۱</sup> OpenFOAM نام برد. این مطلب به این معناست که این نرم‌افزار به‌صورت کاملاً رایگان در اختیار همه قرار دارد و به سهولت از اینترنت قابلیت دانلود دارد. همچنین برخلاف اکثر نرم‌افزارهای موجود که در آن‌ها کد نرم‌افزار در آن وارد شده و امکان دسترسی کاربران به کدهای داخلی نرم‌افزار وجود ندارد، امکان بررسی تمام جنبه‌های برنامه‌نویسی از جمله تغییر و توسعه آن برای کاربران فراهم است. در این حالت کاربران تشویق می‌شوند که تغییری در نرم‌افزار ایجاد کنند.

OpenFOAM از شیوه عددی حجم محدود<sup>۲</sup> (FV) برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استفاده می‌کند. این نرم‌افزار قابلیت حل گسترده وسیعی از پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی از قبیل جریان‌های قابل تراکم و غیرقابل تراکم، جریان‌های دو فاز، جریان مواد متخلخل، احتراق و سایر پدیده‌هایی که در آن انتقال حرارت و جریان سیالات نقش اصلی را ایفا می‌کنند را دارا است. قابلیت اصلی و متمایزکننده این نرم‌افزار، استفاده هوشمندانه از توانایی‌های زبان برنامه‌نویسی ++C است. در این نرم‌افزار تعداد قابل توجهی توتوریال<sup>۳</sup> آموزشی برای حل گره‌های متفاوت موجود ارائه شده است. اولین گام‌ها در زمینه نرم‌افزار OpenFOAM از سال ۱۹۹۰ آغاز شده و این پروژه بین

<sup>1</sup> Open Source

<sup>2</sup> Finite Volume

<sup>3</sup> Tutorial



سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۰ در دستور کار گروه تحقیقاتی پروفسور آلن گوس من<sup>۱</sup> و بخش ترموسیالاتی دانشگاه امپریال کالج لندن<sup>۲</sup> قرار گرفت. اولین کلاس‌های این نرم‌افزار در سال ۱۹۹۳ در پایان‌نامه دکترای چارلی هیل<sup>۳</sup> ارائه شد و در همان سال اولین کارهای عددی توسط هنری ولرو ژاساک<sup>۴</sup> شروع شد و در ادامه در قالب پایان‌نامه‌های دکترای این کار به مسائل مهندسی مختلف بسط داده شد. در ایران این نرم‌افزار برای اولین بار در سال ۱۳۸۴ در آزمایشگاه هیدرودینامیک کاربردی دانشگاه علم و صنعت به کار گرفته شده است.

#### ۴-۲ معادله‌های حاکم و ساختار عددی

تلاطم مایع در داخل مخزن متحرک با توجه به ناپیوستگی در خواص سیال‌ها در سطح مشترک، متحرک بودن این سطح، وجود تغییر فاز در لایه‌های مجاور و بدون ضخامت بودن این سطح، شبیه‌سازی این گونه جریان‌ها را با دشواری‌هایی همراه کرده است. روش عددی که در این گونه جریان‌ها به کار گرفته شده است باید علاوه بر ارضا کردن معادله بقا جرم، قادر به معرفی شکل و انحنای سطح نیز باشد. همچنین باید ضخامت سطح را تا سطح ممکن کوچک کرده و قابلیت تعمیم به شبکه‌های سه‌بعدی را نیز داشته باشد. با توجه به این مطالب روش حجم کسری سیال (VOF) که قابلیت‌های مذکور را داشته و نسبت به روش‌های دیگر عمومیت بیشتری را برای حل جریان با سطح آزاد دارد، برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. معادله‌های حاکم بر جریان‌های با سطح مشترک مایع و گاز، معادله‌های پیوستگی و اندازه حرکت می‌باشند که عبارت‌اند از:

<sup>1</sup> Professor Allen Gosman

<sup>2</sup> Imperial College London

<sup>3</sup> Charles Hill

<sup>4</sup> Hrvoje Jasak

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1-4)$$

و معادله اندازه حرکت:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) - \nabla \cdot \mu \nabla U - \rho g = -\nabla p - F_s \quad (2-4)$$

در روابط بالا،  $\rho$  چگالی سیال،  $U$  سرعت سیال،  $\mu$  ضریب لزجت،  $g$  شتاب گرانش،  $P$  فشار سیال و  $F_s$  بیان گر نیروی تنش سطحی است که تنها در سطح مشترک دو سیال رخ می دهد. برای استفاده از روش کسر حجمی سیال در این معادله ها، بسته به این که ناحیه حل در کدام سیال واقع شده، خواص همان سیال در رابطه پیوستگی مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش دیدگاه اولیبری نسبت به میدان جریان برقرار بوده، به این معنی که شبکه محاسباتی در تمام زمان حل ثابت و بدون تغییر باقی می ماند. در این روش سطح به صورت صریح ردیابی نشده بلکه با ردیابی کسر حجمی  $\alpha$  که به هر کدام از سیال ها نسبت داده می شود، سطح نیز جابجا می شود. کسر حجمی  $\alpha$ ، نسبت حجم سیال به حجم کل سلول محاسباتی است و برای مایع مقدار یک و برای گاز مقدار صفر را می پذیرد. لیکن بایستی توجه داشت که  $\alpha$  برای یک ذره از سیال همواره ثابت بوده، متأثر از رفتار جریان نیست. در نتیجه مشتق مادی آن صفر است:

$$\frac{D\alpha}{Dt} = \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \quad (3-4)$$

همان طور که پیش تر اشاره شد نمایش ریاضی  $\alpha$  به شکل زیر است:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{مایع} \\ 0 & \text{گاز} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{سطح مشترک} \end{cases} \quad (4-4)$$

به کمک  $\alpha$  می توان خواص فیزیکی سیال را در هر نقطه از دامنه حل تعریف نمود. اگر  $\varphi$  به عنوان یک خاصیت فیزیکی مانند چگالی، لزجت و ... در نظر گرفته شود این خاصیت در کل میدان به صورت زیر است:

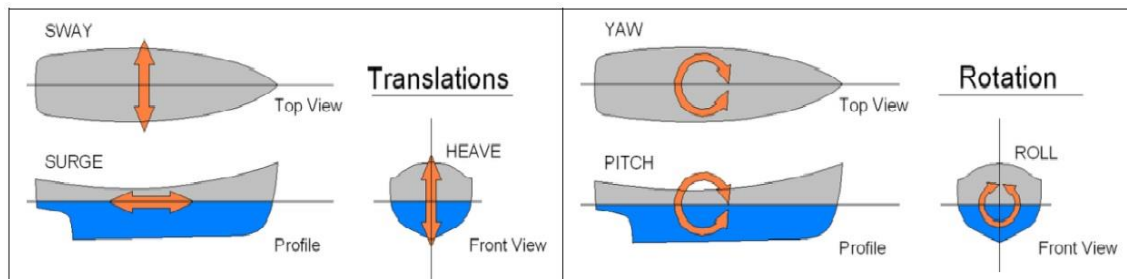
$$\varphi = \varphi_2 + \alpha(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (5-4)$$

در روش عددی کسر حجمی سیال حل جریان با استفاده از معادله اندازه حرکت و معادله پیوستگی انجام شده و این معادله ها برای هر دو فاز مایع و گاز یکسان در نظر گرفته می شود. خواص فیزیکی هر فاز نیز بر اساس نسبت فازی هر یک از فازها در یک سلول محاسباتی در حل تعیین می گردد.

حرکت مخزن در حالت کلی دارای شش درجه آزادی است که شامل چرخش حول محورهای  $x^1$  و  $x^2$  و  $z^3$  است و حرکت های انتقالی در راستای محورهای مختصات به صورت حرکت بالا و پایین  $x^4$  در راستای محور  $z$  و حرکت چپ و راست  $x^5$  در راستای محور  $y$  و حرکت جلو و عقب  $x^6$  در راستای  $x$  است. در نرم افزار OpenFOAM برای پیاده سازی سه درجه آزادی که شامل چرخش سینوسی (حول محور  $x$ )، حرکت بالا و پایین (در امتداد محور  $z$ ) و حرکت چپ و راست (در امتداد محور  $y$ ) با تغییر دامنه و فاز است. ضریب هایی پیش بینی شده که با فرض های لازم امکان حرکت دلخواه را تأمین می کند و می توان با تنظیم مقدار این ضرایب که در معادله های حاکم برای به دست آوردن حرکت نوسانی مخزن مورد استفاده قرار گرفته اند در جدول (۴-۱) ارائه شده است.

---

<sup>1</sup> Roll  
<sup>2</sup> Pitch  
<sup>3</sup> Yaw  
<sup>4</sup> Heave  
<sup>5</sup> Sway  
<sup>6</sup> Surge



شکل (۱-۴) نمایش تمام حرکت‌های یک جسم شناور [۵۷]

جدول (۱-۴) ضرایب بکار رفته در حرکت مخزن [۵۷]

ضریب	تعریف	نوع	بعد
CofG	مختصات مرکز نوسان مرکز ثقل مخزن	بردار	متر
lamda	نسبت مقیاس مدل	اسکالر	-
rollAmax	بیشترین دامنه چرخش	اسکالر	رادیان
rollAmin	کمترین دامنه چرخش	اسکالر	رادیان
heaveA	حرکت بالا و پایین (حرکت انتقالی در راستای محور Z)	اسکالر	متر
SwayA	حرکت چپ و راست (حرکت انتقالی در امتداد محور Y)	اسکالر	متر
Q	ضریب میرایی	اسکالر	-
$T_p$	زمان تناوب برای مایع	اسکالر	ثانیه
$T_{pn}$	تناوب طبیعی مخزن	اسکالر	ثانیه
$T_{pi}$	تناوب چرخش جریان	اسکالر	ثانیه
$dT_i$	گام زمانی مرجع	اسکالر	ثانیه
$dT_p$	افزایش $T_p$ بر واحد $dT_i$	اسکالر	-

با توجه به تعاریف ضرایب معرفی شده در جدول (۱-۴) و شکل (۱-۴)، معادله‌های حاکم

به کار رفته برای به دست آوردن حرکت نوسانی مخزن در حالت کلی عبارت‌اند از [۵۷]:

$$T_{pi} = T_p + dT_p \times \left(\frac{time}{dT_i}\right) \quad [Sec] \text{ تناوب چرخش جریان} \quad (۴-۶)$$

$$w_r = \frac{2 \times \pi}{T_{pi}} \quad [Hz] \text{ فرکانس جریان} \quad (۴-۷)$$

$$r = \frac{dT_p}{dT_i} \quad (۴-۸)$$

$$u = T_p + r \times time \quad (۴-۹)$$

$$ph_r = \frac{2 \times p \times \left(\left(\frac{T_p}{u} - 1\right) + \log|u| - \log(T_p)\right)}{r} \quad [rad] \text{ فاز جریان برای چرخش} \quad (۴-۱۰)$$

$$ph_s = ph_r + \pi \quad [rad] \text{ فاز جریان برای حرکت به سمت چپ و راست} \quad (۴-۱۱)$$

$$ph_h = ph_r + \frac{\pi}{2} \quad [rad] \text{ فاز جریان برای حرکت سمت بالا و پایین} \quad (۴-۱۲)$$

$$[rad] \text{ دامنه چرخش} \quad (۴-۱۳)$$

$$rollA = \max \left\{ rollA_{max} e^{\frac{-\sqrt{T_{pi} - T_{pm}}}{2Q}}, rollA_{min} \right\}$$

$$[m] \text{ بردار انتقال} \quad (۴-۱۴)$$

$$T = \begin{bmatrix} 0 \\ sway \times (\sin(w_r \times time + ph_s) - \sin(ph_s)) \\ heave \times (\sin(w_r \times time + ph_h) - \sin(ph_h)) \end{bmatrix}$$

$$[rad] \text{ کواترنيون چرخش} \quad (۴-۱۵)$$

$$R = quaternion \begin{bmatrix} rollA \times \sin(w_r \times time + ph_r) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[m] \text{ سپترنيون جابجایی} \quad (۴-۱۶)$$

$$TR = septemion[septemion(CofG + T) \times R \times septemion(-CofG)]$$

در این حرکت، کواترنيون<sup>۱</sup> برای چرخش به صورت سه بعدی و سپترنيون<sup>۲</sup> برای حرکت انتقالی و چرخش به صورت سه بعدی استفاده شده است که شامل بردار انتقال و چرخش و در نتیجه دارای هفت مؤلفه است.

حل عددی بر اساس روش حجم محدود (FV) است. در این حل هر یک از عملگرها دیفرانسیلی به روشی گسسته سازی شده است. برای مشتق زمانی از روش اویلر و برای عملگر گرادیان از روش خطی گوس برای گسسته سازی استفاده شده است. برای گسسته سازی عملگر دیورژانس در معادله های سرعت و کسر حجمی از روش وان لیئر<sup>۳</sup> استفاده شده است و گسسته سازی جملات لاپلاسی با استفاده از روش خطی گوس بوده است.

### ۳-۴ مدل سازی عددی

همان طور که پیش از این بیان شد در نرم افزار OpenFOAM تعداد زیادی حل گر<sup>۴</sup> موجود است که با توجه به منبع باز بودن این نرم افزار امکان تغییر و یا ایجاد حل گرهای جدید برای شبیه سازی عددی وجود دارد. یکی از حل گرهای موجود در این نرم افزار حل گر interDyMFoam است که برای شبیه سازی عددی جریان سیال ها با سطوح مشترک است و در آن امکان استفاده از شبکه بندی پویا برقرار شده است. در حالت کلی این حل گر برای تحلیل عددی دو سیال غیرقابل تراکم، هم دما و مخلوط نشدنی که سطح مشترک بین دو سیال با روش کسر حجمی سیال (VOF) با حرکت شبکه دلخواه، قابل اجرا است.

### ۱-۳-۴ شبکه بندی و بررسی استقلال از شبکه

در این پژوهش برای شبیه سازی مسئله مورد نظر، ابتدا هندسه مسئله بر اساس ابعاد واقعی مخزن مستطیلی شکل در نمونه آزمایشگاهی تهیه و شبکه بندی شده است. در ادامه با استفاده از ضرایب معرفی شده در جدول (۴-۱)، حرکت جابجایی عرضی مورد نظر در نمونه آزمایشگاهی، به گونه ای تعریف

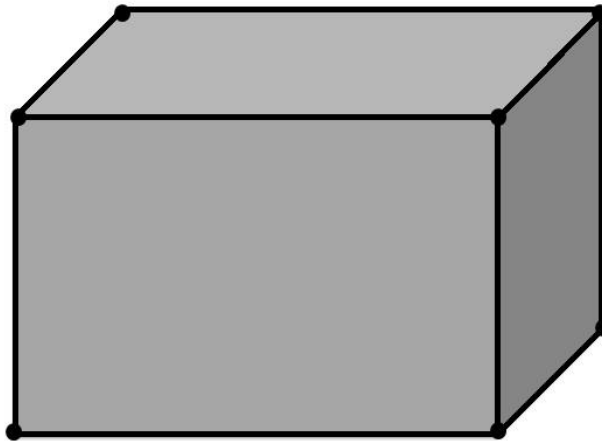
<sup>1</sup> Quaternion

<sup>2</sup> Septernion

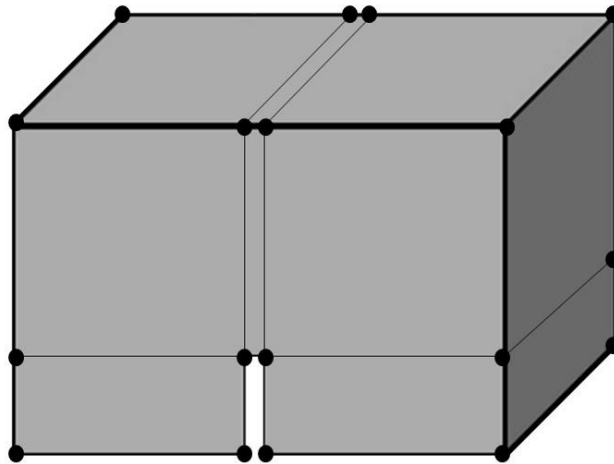
<sup>3</sup> VanLeer

<sup>4</sup> Solver

می شود که مخزن یک حرکت نوسانی رفت و برگشتی و متقارن در راستای محور  $y$  داشته باشد. برای شبیه سازی مسئله مورد نظر، هندسه مسئله با استفاده از ابعاد واقعی مخزن موجود، به صورت سه بعدی انجام شده است. در حالت عدم وجود تیغه میرا کننده با استفاده از ۸ رأس<sup>۱</sup> و یک بلوک<sup>۲</sup> (شکل (۲-۴)) و در حالت وجود تیغه میرا کننده با استفاده از ۲۴ رأس و ۵ بلوک (شکل (۳-۴))، هندسه مسئله تعریف شده است.



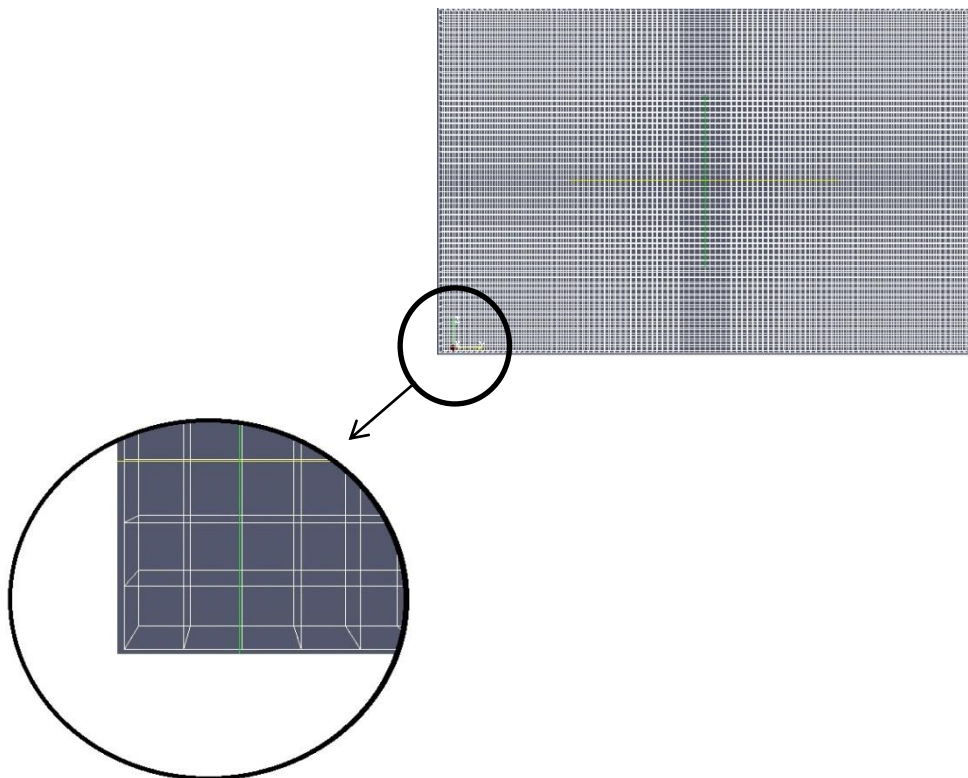
شکل (۲-۴) رئوس و بلوک های مخزن بدون تیغه میرا کننده



شکل (۳-۴) رئوس و بلوک های مخزن با تیغه میرا کننده

<sup>1</sup> Vertice  
<sup>2</sup> Block

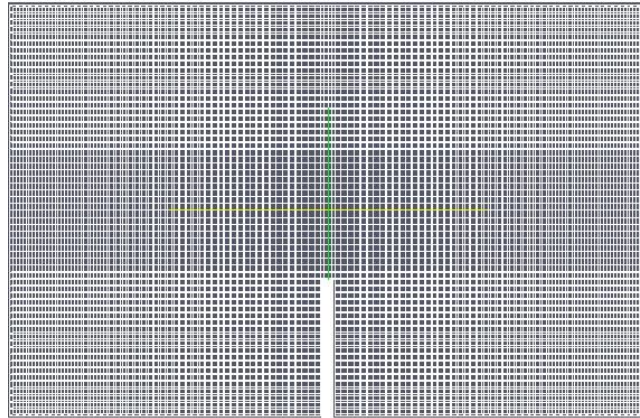
در شبیه سازی هندسه مخزن موردنظر در حالت عدم وجود تیغه میرا کننده با توجه به شکل مخزن از شش دیواره<sup>۱</sup> استفاده شده است که این تعداد در مخزن با تیغه میرا کننده با توجه به بلوک های در نظر گرفته شده، ۳۲ عدد است. مخزن پس از شبکه بندی در حالت بدون تیغه میرا کننده دارای ۶۰۰۰ سلول محاسباتی (شکل (۴-۴)) و در حالت وجود تیغه میرا کننده ۵۶۱۶ سلول محاسباتی (شکل (۵-۴)) است. با قرار دادن عبارت *convertToMeters 0.01* مختصات رئوس موردنظر برای مخزن با واحد سانتی متر وارد می شود.



شکل (۴-۴) شبکه بندی مخزن بدون وجود تیغه میرا کننده

<sup>1</sup> Patch





شکل (۴-۵) شبکه بندی مخزن با وجود تیغه میراننده

بررسی ها نشان می دهد که کاهش ابعاد سلول های محاسباتی از یک اندازه مشخص، تغییراتی را در نتایج به دست آمده ایجاد می کند، ولی با افزایش ابعاد سلول محاسباتی حتی ۲ یا ۵ برابر کردن آن ها، تغییری را در نتایج ایجاد نمی شود [۶۰]. برای بررسی استقلال از شبکه در یک حالت مشخص به بررسی تأثیرات تغییر ابعاد سلول های محاسباتی روی نتایج حاصل می پردازیم. برای این مقصود بررسی ها را در حالت زیر انجام می دهیم. شایان ذکر است که انتخاب این شرایط مرزی دلیل خاصی نداشته و صرفاً هدف بررسی یک نمونه از بررسی های آزمایشگاهی بوده که امکان بررسی تأثیر ابعاد سلول محاسباتی را ایجاد می کند.

ارتفاع مایع: ۱۰ سانتی متر، ارتفاع تیغه میرا کننده: ۶ سانتی متر، دامنه نوسان: ۷/۵ سانتی متر،

زمان یک دوره تناوب کامل: ۲/۴ ثانیه

بررسی ها در حالات سلول محاسباتی با ابعاد  $1 \times 1$  سانتی متر و  $0.5 \times 0.5$  سانتی متر و  $0.5 \times 0.5$

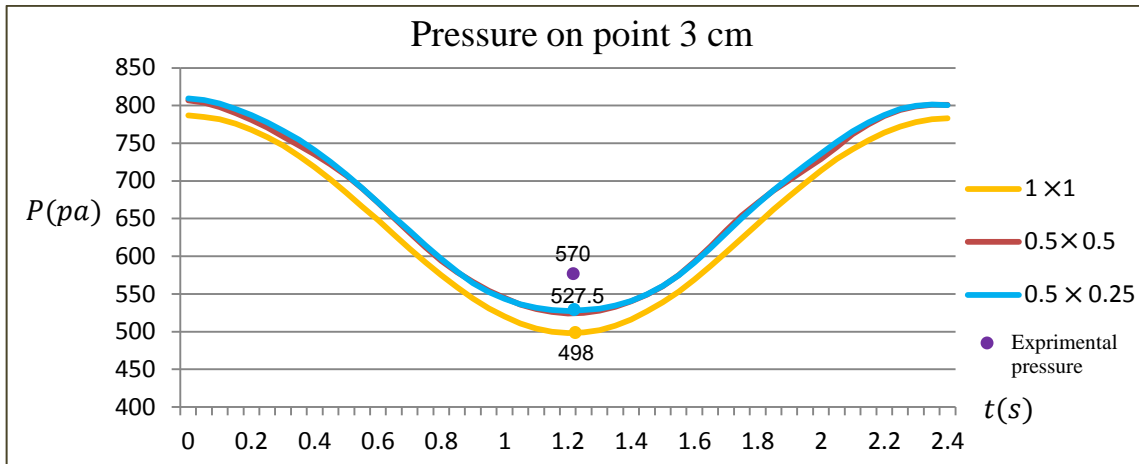
۰/۲۵ سانتی متر انجام می شود و تأثیرات تغییر ابعاد سلول محاسباتی مورد بررسی قرار می گیرد.

مشاهدات نشان می دهد که با کاهش ابعاد سلول محاسباتی از یک اندازه ای به بعد تغییری در نتایج

حاصل نمی شود. در شکل (۴-۶) به خوبی این بیان نشان داده شده است. در این بررسی فشار

اعمال شده روی دیوار مخزن در نقطه ۳ سانتی متر از کف مخزن در یک دوره تناوب مورد بررسی

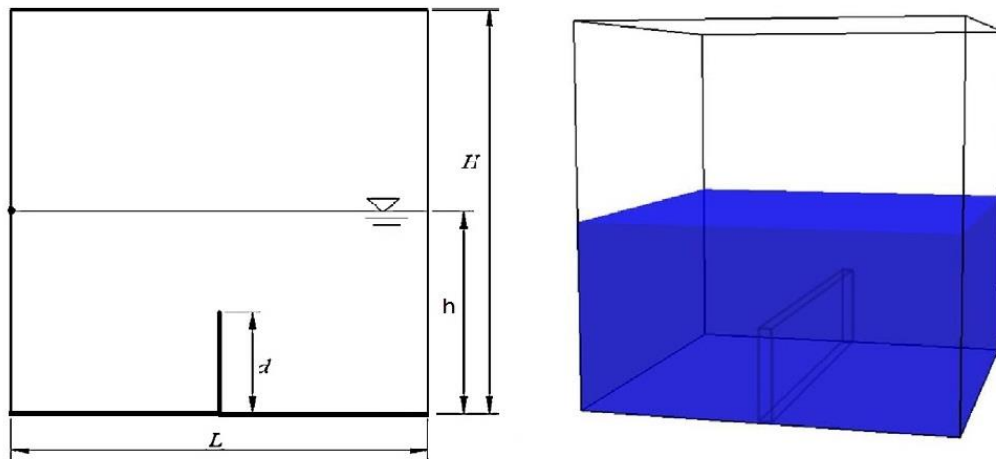
قرار گرفته است و در حالات متفاوت ابعاد سلول محاسباتی، مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۴-۶) نمودار بررسی استقلال از شبکه

همان طور که از نمودار بالا مشخص است کاهش ابعاد سلول محاسباتی از ابعاد  $0.5 \times 0.5$  سانتی متر، تغییری در نتایج ایجاد نمی کند. از طرفی بررسی ها نشان می دهد که با نصف کردن اندازه طول و عرض سلول محاسباتی، میزان هزینه محاسباتی ۱۰ برابر می شود. لذا استفاده از سلول محاسباتی با ابعاد  $0.5 \times 0.5$  کاملاً صحیح است.

در شکل (۴-۴) محل قرارگیری تیغه میرا کننده که در وسط مخزن است، نشان داده شده است.



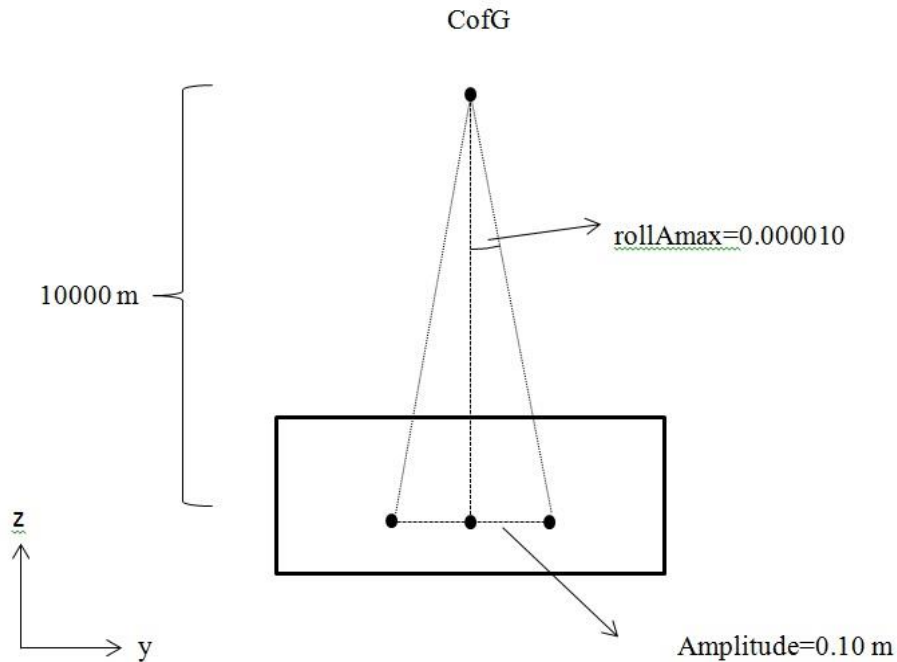
شکل (۴-۷) محل قرارگیری تیغه در وسط مخزن

حال با توجه به ضرایب معرفی شده در جدول (۴-۱) امکان ایجاد هر نوع حرکت دلخواه برای مخزن وجود دارد. لذا برای ایجاد یک حرکت جابه‌جایی عرضی در یک بعد، لازم است که این ضرایب به نحوی تنظیم شود که مخزن یک حرکت نوسانی رفت و برگشتی متقارن در راستای محور  $Y$  داشته باشد.

#### ۴-۳-۲ ایجاد حرکت هارمونیک

همان‌طور که در جدول (۴-۱) بیان شد با استفاده از ضریب CofG مختصات مرکز نوسان مرکز ثقل مخزن را می‌توان تعیین کرد. در یک حرکت دورانی اگر مختصات مرکز نوسان را در بین‌هایت در نظر بگیریم، یک حرکت خطی ایجاد خواهد شد. لذا در اینجا برای ایجاد این حرکت خطی مرکز نوسان را در فاصله دور نظر گرفته تا حرکت خطی موردنظر برای مخزن ایجاد شود. لذا با توجه به اینکه حرکت مخزن در صفحه  $y-z$  است مختصات مرکز نوسان را به شکل  $(0 \ 0 \ 100000)$  برحسب متر تعریف می‌کنیم. با در نظر گرفتن این نقطه برای مرکز نوسان حرکت مخزن به شکل حرکت خطی در نظر گرفته می‌شود. از طرفی لازم به ذکر است که مرکز ثقل مخزن در شبیه‌سازی عددی در ارتفاع ده سانتی‌متر از کف مخزن (مختصات  $(0 \ 0 \ 0)$ ) در نظر گرفته شده است.

با در نظر گرفتن فاصله  $100000$  متر مرکز ثقل مخزن با مرکز دوران، با تغییر مقدار ضریب rollAmax دامنه حرکت خطی موردنظر را برای مخزن ایجاد کرد. به‌طور مثال برای داشتن دامنه حرکت ده سانتی‌متر برای مخزن باید مقدار ضریب rollAmax را  $0/0000010$  رادیان قرار می‌دهیم. در شکل (۴-۵) چگونگی ایجاد حرکت خطی مخزن نشان داده شده است.



شکل (۴-۸) حرکت نوسانی رفت و برگشتی متقارن مخزن

در این پژوهش ۳ دامنه حرکت متفاوت ۴ و  $7/5$  و ۱۰ سانتی متر برای مخزن در نظر گرفته شده است که باعث ایجاد ۳ بازه حرکت ۸ و ۱۵ و ۲۰ سانتی متر برای مخزن می شود. لذا مقدار ضریب rollAmax برای این ایجاد این ۳ دامنه به ترتیب  $0/00000004$  و  $0/000000075$  و  $0/00000010$  رادیان در نظر گرفته شده است.

نرم افزار OpenFOAM به صورت پیش فرض مسائل را در حالت گذرا حل می کند؛ بنابراین برای رسیدن به حالت پایا باید حل را تا زمان مناسبی ادامه داد تا مسئله به حالت پایا برسد. مدت زمان حل در نظر گرفته شده در این پژوهش ۴۰ ثانیه برای هر حل در نظر گرفته شده است.

فصل پنجم

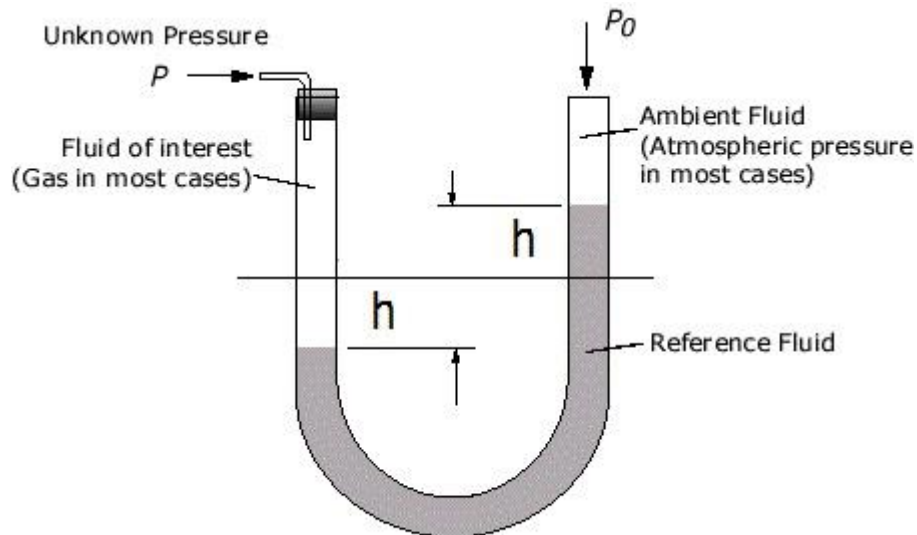
بررسی و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی

همان‌طور که در فصل سوم به تفصیل توضیح داده شد، برای بررسی فشار وارد بر دیواره مخزن مکعب مستطیلی شکل، از یک سیستم مانومتری استفاده شده است. برای این منظور نقاط مورد نظر روی دیواره مخزن در نظر گرفته می‌شوند و برای هر نقطه یک مانومتر تعبیه می‌شود. این مانومتر از جنس پلاستیک شفاف انعطاف‌پذیر است که طول مایع درون مانومترها برابر ۲ متر در نظر گرفته شده است. با تحریک عرضی مخزن مایع درون مخزن، متلاطم شده و این تلاطم فشاری را بر دیواره مخزن وارد می‌کند. از طرفی این تلاطم مایع درون مخزن باعث حرکت نوسانی رفت‌وبرگشتی در مانومترها می‌شود. دامنه نوسان مایع درون مانومترها، نمودی از فشار وارد بر دیواره مخزن است با در نظر گرفتن این نکته که مقدار خوانده شده در مانومترها مقدار دقیقی نیست و باید اصلاح شود.

#### ۱-۵ ساخت سیستم آزمایشگاهی

در رفتار استاتیک مایع در مانومتر با سطح مقطع یکسان، در صورت وجود فشار نابرابر در طرفین

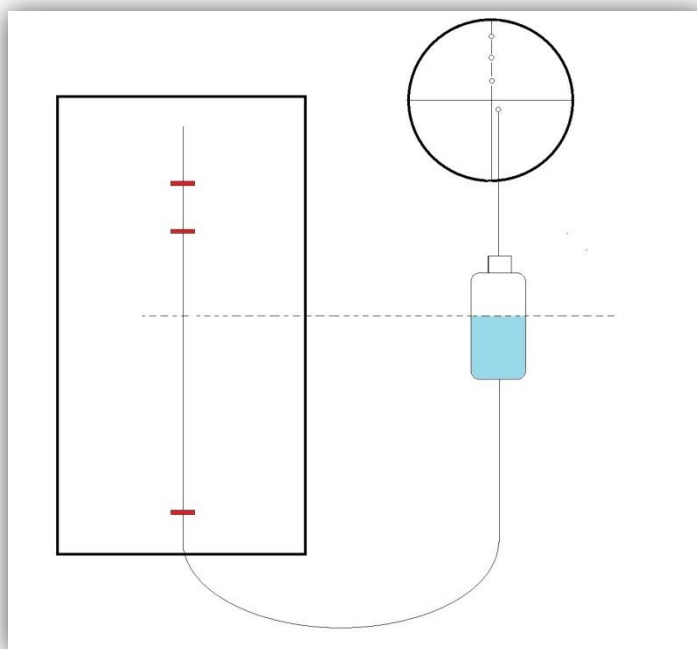
مانومتر، تغییرات ارتفاع در دو سمت مانومتر یکسان خواهد بود (شکل (۱-۵)).



$$\text{Gage Pressure } \Delta P = P - P_0 = 2h\rho g$$

شکل (۱-۵) رفتار استاتیک مایع درون مانومتر

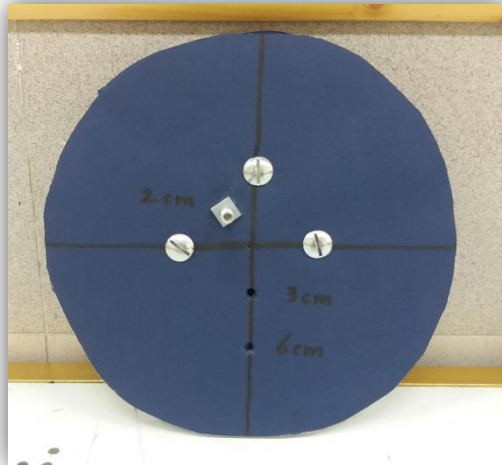
اما در رفتار دینامیک مایع درون مخزن، انتظار می‌رود که روابط استاتیکی برقرار نباشد. برای این منظور یک سیستم آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است که هدف از ساخت این سیستم آزمایشگاهی، بررسی رفتار دینامیک مایع درون مانومتر است. طرح کلی این سیستم آزمایشگاهی در زیر نشان داده شده است (شکل (۲-۵)).



شکل (۲-۵) طرح کلی سیستم آزمایشگاهی

همان‌طور که در شکل بالا نشان داده شده است، یک مخزن شامل مایع از یک طرف به یک صفحه دوار متصل شده است و در طرف دیگر متصل به یک مانومتر انعطاف‌پذیر شده است. صفحه دوار به یک موتور الکتریکی متصل شده است و امکان چرخش با سرعت‌های متفاوت حول مرکز خود را دارد. همان‌طور که قبلاً در فصل سوم بیان شد با استفاده از یک اینورتر<sup>۱</sup> امکان ایجاد سرعت‌های چرخش متفاوت برای موتور AC فراهم می‌شود. از طرفی نقاطی بر روی این صفحه دوار تعبیه شده است که امکان ایجاد دامنه‌های حرکت متفاوت برای مخزن شامل مایع را، ایجاد می‌کند. در شکل (۳-۵) تصویر این صفحه دوار نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Inverter



شکل (۳-۵) صفحه دوار تعبیه شده

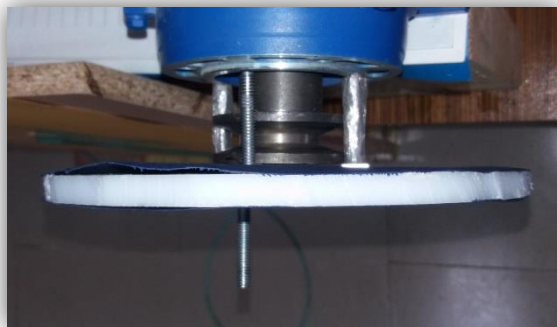
همان طور که در شکل (۳-۵) مشاهده می شود، بر روی صفحه دوار سوراخ‌هایی تعبیه شده است که امکان عبور دادن یک پیچ در آن‌ها وجود دارد. با استفاده از هر کدام از این سوراخ‌ها و عبور دادن یک پیچ به داخل آن‌ها، امکان ایجاد دامنه‌های متفاوت تحریک وجود دارد. به طور مثال برای ایجاد دامنه تحریک ۲ سانتی متر پیچ درون سوراخ دارای فاصله ۲ سانتی متر از مرکز دوران وارد شده و در آن محکم می شود. برای ایجاد دامنه‌های مورد نظر دیگر پیچ از آن سوراخ خارج و به سوراخ مورد نظر وارد و محکم می شود. در شکل (۴-۵) این صفحه به صورت متصل روی پولی موتور نشان داده شده است.



شکل (۴-۵) صفحه دوار متصل به موتور الکتریکی

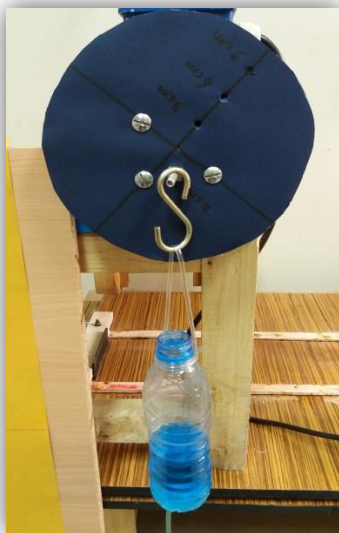


همان طور که در تصاویر بالا مشخص است، این صفحه دوار به وسیله سه پیچ که به صورت دقیق روی صفحه تعبیه شده‌اند، بر روی پولی موتور محکم می‌شود و می‌توان این پیچ‌ها را با بستن پلاستیک به دور آنها، روی پولی موتور سفت کرد (شکل (۵-۵)).



شکل (۵-۵) نصب صفحه دوار روی پولی موتور

حال بعد از نصب صفحه دوار روی پولی موتور، پیچ موردنظر را در سوراخ موردنظر سفت کرده و مخزن شامل مایع را به آن آویزان می‌شود. این مخزن شامل مایع را یک بطری با درب باز در نظر گرفته شده است (شکل (۶-۵)).



شکل (۶-۵) صفحه دوار به همراه مخزن شامل مایع

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، مخزن به‌صورت کاملاً عمودی، بر روی پیچ موردنظر که دامنه تحریک را مشخص می‌کند، آویزان شده است. لوله مانومتر شفاف انعطاف‌پذیر به کف این مخزن شامل مایع متصل شده است و از طرف دیگر روی یک صفحه مسطح کاملاً عمودی نصب شده است. در حالت استاتیک (قبل از اعمال تحریک سینوسی) ارتفاع مایع در دو سمت مانومتر یکسان خواهد بود. از طرفی با استفاده از یک کاغذ میلی‌متری، تغییرات ارتفاع مایع در مانومتر به‌صورت دقیق قابل‌نمایش و ثبت خواهد بود (شکل (۷-۵)).



شکل (۷-۵) مخزن به همراه صفحه اندازه‌گذاری شده عمودی

در شکل (۸-۵) نمای کلی این سیستم آزمایشگاهی نشان داده شده است.



شکل (۸-۵) نمای کلی سیستم آزمایشگاهی ساخته‌شده

## ۵-۲ رابطه بین تحریک و پاسخ در مانومتر

با توجه به اینکه در نمونه آزمایشگاهی مخزن مکعب مستطیلی و مانومتر، تغییرات دامنه نوسان مایع در مانومتر توسط تصویربرداری ثبت شده است، می توانیم مشخص کنیم که رنج تغییرات دامنه در خروجی مانومتر حداقل و حداکثر چه مقدار است. باید توجه داشت که این مقادیر ثبت شده در خروجی مانومتر، به خاطر وجود اثرات دینامیک سیال، مقادیر دقیق نیست و باید اصلاح شود.

هدف از ساخت این سیستم آزمایشگاهی به دست آوردن رابطه بین تحریک در یک سمت مانومتر و پاسخ در سمت دیگر مانومتر است. با استفاده از نسبت های به دست آمده در این سیستم آزمایشگاهی می توانیم نتایج حاصل در سیستم آزمایشگاهی اصلی (مخزن مکعب مستطیل و مانومتر) را اصلاح کرده و بگوییم که مقادیر خوانده شده به عنوان پاسخ مانومتر در واقع چه مقادیری در سمت دیگر مانومتر (تحریک) بوده است. این مقادیر دامنه اصلاح شده نمودی از مقدار فشار وارد در نقاط متفاوت روی دیواره مخزن است.

برای این منظور مقادیر دامنه حرکت سینوسی مایع در مانومتر که توسط تصویربرداری ثبت شده اند را در نظر گرفته و مقادیر مینیمم و ماکزیمم و متوسط آنها را در نظر گرفته می شود. با بررسی تمامی نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی که در فصل سوم به طور کامل گزارش شده است، می توان مشاهده کرد که تمامی دامنه های نهایی حرکت سینوسی مایع در مانومتر، مقادیری از  $0/5$  تا  $2/5$  سانتی متر است. مقدار متوسط دامنه های ثبت شده در خروجی مانومتر، مقدار  $1/4$  سانتی متر است. همان طور که در فصل سوم گزارش شده، فرکانس های حرکت مخزن به عنوان فرکانس تحریک، در نمونه های آزمایشگاهی مقادیری از  $0/2$  تا  $0/62$  هرتز است و مقدار متوسط فرکانس اعمالی به مخزن برابر  $0/38$  هرتز است.

حال هر یک از این ۳ دامنه مینیمم، ماکزیمم و متوسط با ۳ فرکانس ماکزیمم و مینیمم و متوسط ایجاد می شود. با این شرایط ۹ حالت متفاوت ایجاد می شود. حال تحریک را برای سیستم بطری و مانومتر به نحوی تغییر داده که هر یک از این حالات در پاسخ مانومتر ایجاد بشود.

تمامی ۹ حالت موردنظر در جدول (۵-۱) نشان داده شده است. شایان ذکر است که در سیستم آزمایشگاهی مخزن تحت تحریک عرضی و مانومتر، ۹ فرکانس متفاوت برای حرکت مخزن وجود داشت و دامنه‌های متفاوت حرکت سینوسی در پاسخ، مشاهده می‌شد که این دامنه‌ها مقداری از  $0/3$  سانتی‌متر تا  $2/5$  سانتی‌متر بود.

جدول (۵-۱) حالات متفاوت در نظر گرفته شده پاسخ، از بین تمامی داده‌ها

شماره حالت	دامنه تحریک (هرتز)	فرکانس تحریک (هرتز)
۱	۰/۵	۰/۲
۲	۰/۵	۰/۳۵
۳	۰/۵	۰/۶۲
۴	۱/۴	۰/۲
۵	۱/۴	۰/۳۵
۶	۱/۴	۰/۶۲
۷	۲/۵	۰/۲
۸	۲/۵	۰/۳۵
۹	۲/۵	۰/۶۲

حال برانیم که تمامی حالات بالا را در پاسخ سیستم آزمایشگاهی بطری و مانومتر ایجاد شود. حال تحریک برای سیستم بطری و مانومتر به نحوی تغییر داده می‌شود که هر یک از این حالات در پاسخ مانومتر ایجاد شود. در ابتدا با انجام یک تست مشخص می‌شود که فرکانس تحریک (فرکانس حرکت عمودی بطری) با فرکانس پاسخ یکسان است.

با انجام تست‌های مربوطه مشخص می‌شود که به خاطر خاصیت پراکندگی اطلاعات در سیالات، دامنه پاسخ با دامنه تحریک یکسان نیست و دامنه پاسخ مقداری کمتر از دامنه تحریک است. زمانی که فرکانس تحریک افزایش پیدا می‌کند، این اختلاف بیشتر می‌شود، درحالی که فرکانس تحریک و پاسخ برابر است. درواقع هدف این است تا با انجام این تست‌ها بفهمیم که برای ایجاد چنین پاسخ‌هایی، چه تحریک‌هایی باید اعمال شود. نتایج حاصل در جدول (۵-۲) آورده شده است.

جدول (۲-۵) تحریک‌های مرتبط به پاسخ‌های در نظر گرفته‌شده

حالت	دامنه پاسخ (سانتی‌متر)	فرکانس تحریک (هرتز)	زمان یک سیکل کامل (ثانیه)	دامنه تحریک (سانتی‌متر)	نسبت تفاضل دامنه
۱	۰/۵	۰/۲	۵	۰/۸	۰/۳۷
۲	۰/۵	۰/۳۵	۲/۸	۲	۰/۷۵
۳	۰/۵	۰/۶۲	۱/۸	۳	۰/۸۳
۴	۱/۴	۰/۲	۵	۲	۰/۳
۵	۱/۴	۰/۳۵	۲/۸	۳	۰/۵۳
۶	۱/۴	۰/۶۲	۱/۸	۶	۰/۷۶
۷	۲/۵	۰/۲	۵	۳	۰/۱۶
۸	۲/۵	۰/۳۵	۲/۸	۶	۰/۵۸
۹	۲/۵	۰/۶۲	۱/۸	۹	۰/۷۲

همان‌طور که در جدول بالا مشخص است، دامنه تحریک همیشه از دامنه پاسخ کوچک‌تر است. در مواردی که فرکانس حرکت مایع در مانومتر کم است، این اختلاف کم و در مواقعی که فرکانس حرکت مایع درون مانومتر بالا است، این اختلاف افزایش می‌یابد. به‌طور مثال زمانی که فرکانس حرکت مایع در مانومتر بسیار پایین باشد (زمان خیلی بالا برای یک سیکل کامل)، برای بررسی حرکت دینامیک سیال در مانومتر می‌توان از روابط استاتیکی استفاده کرد. علت این امر این است که پاسخ تأخیر کمی را خواهد داشت و مایع فرصت کافی برای رسیدن به حالت تحریک را خواهد داشت. از طرفی زمانی که فرکانس تحریک مایع خیلی بالا باشد، پاسخ دارای دامنه‌ی خیلی کوچکی خواهد بود طوری که عملاً حرکتی در مقایسه با تحریک نخواهد داشت. ستون آخر جدول (۲-۵) نشان‌دهنده‌ی نسبت تفاضل دامنه<sup>۱</sup> است که در زیر رابطه آن بیان شده است:

$$R.A.D = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \quad (۱-۵)$$

<sup>۱</sup> Relative Amplitude Difference

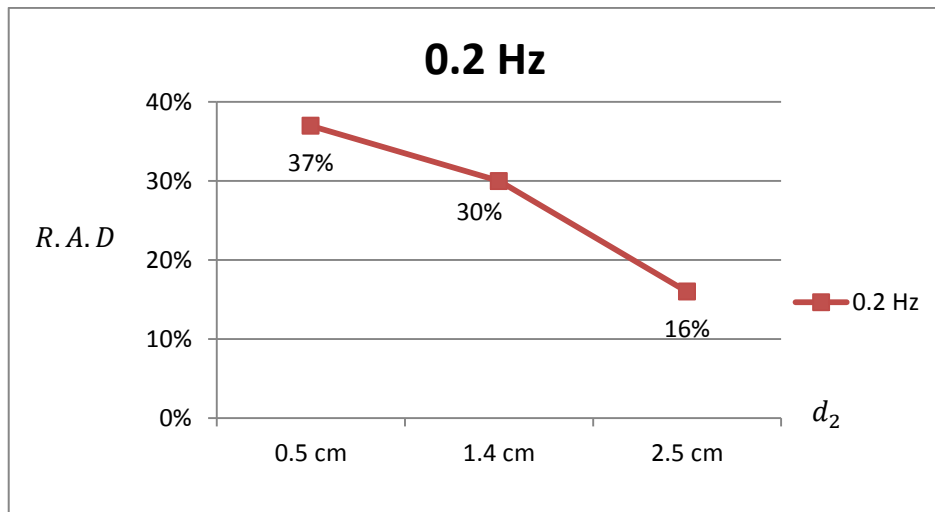
که در این رابطه داریم:

$d_1$ : دامنه تحریک

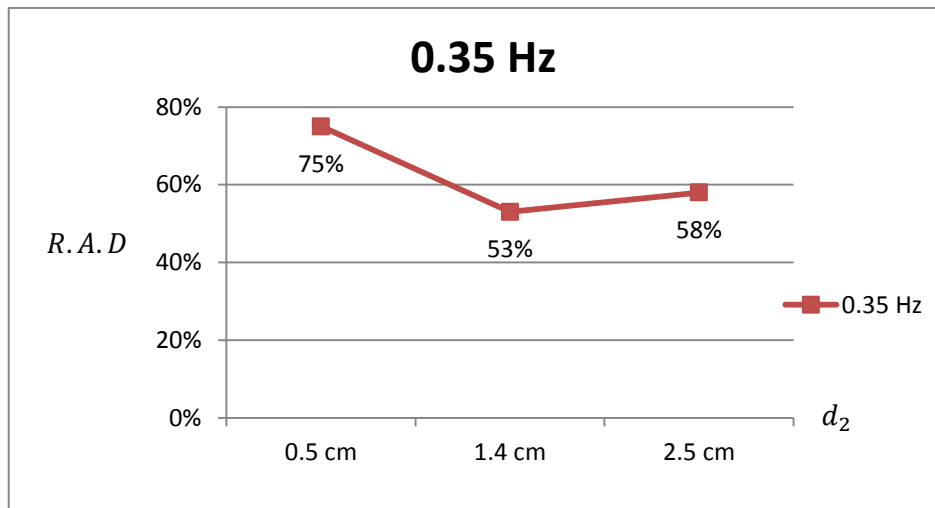
$d_2$ : دامنه پاسخ

حال با توجه به داده‌های موجود در جدول بالا، می‌توان مشخص کرد که در یک فرکانس ثابت،

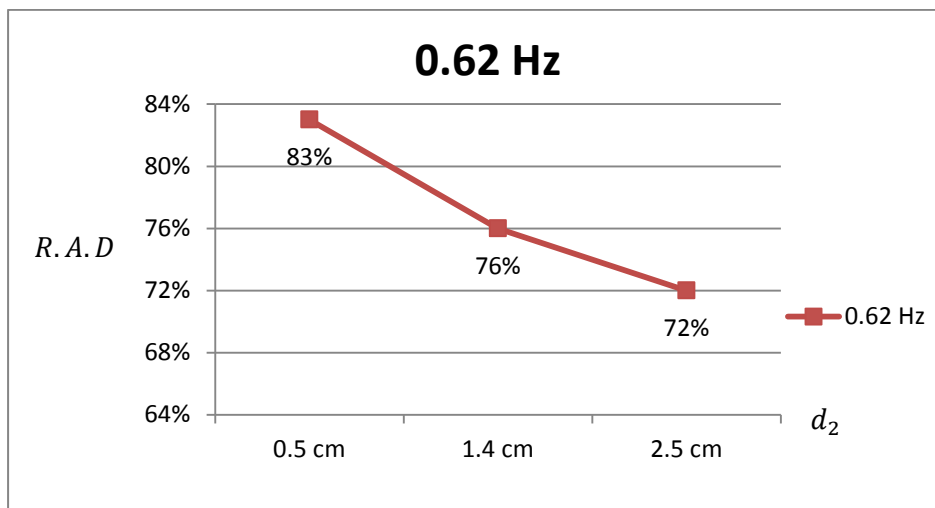
نسبت تفاضل دامنه، چگونه با دامنه پاسخ تغییر می‌کند و نمودارهای زیر را رسم کرد:



شکل (۵-۹) نمودار تغییرات نسبت تفاضل دامنه برحسب دامنه پاسخ در فرکانس تحریک ۰/۲ هرتز



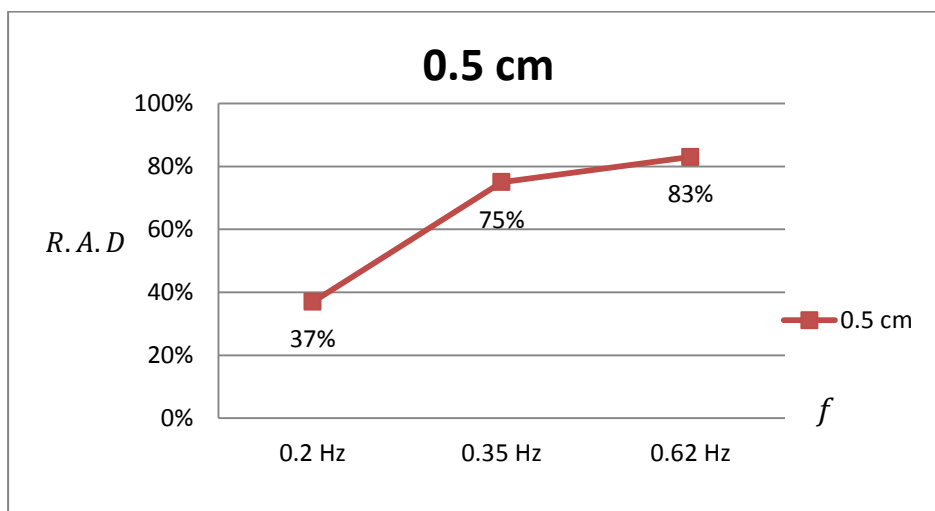
شکل (۵-۱۰) نمودار تغییرات نسبت تفاضل دامنه برحسب دامنه پاسخ در فرکانس تحریک ۰/۳۵ هرتز



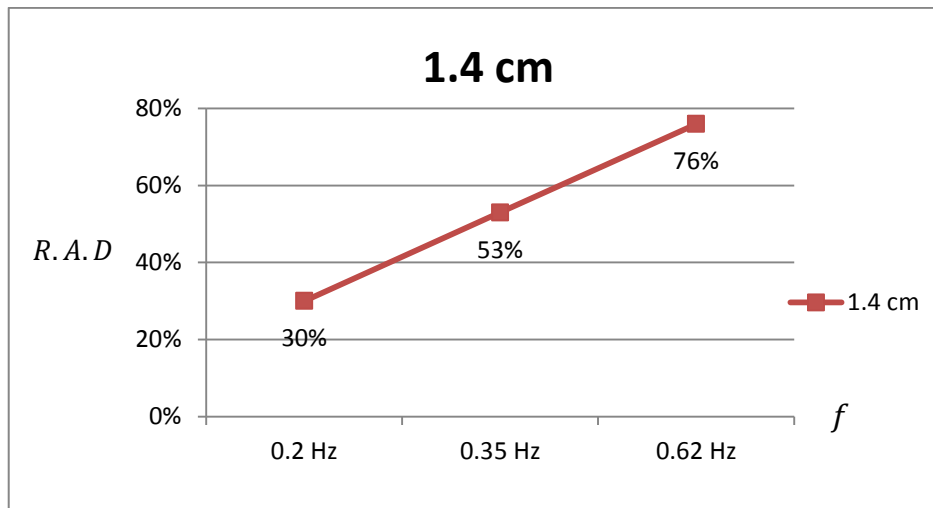
شکل (۵-۱۱) نمودار تغییرات نسبت تفاضل دامنه برحسب دامنه پاسخ در فرکانس تحریک ۰/۶۲ هرتز

از طرفی می توان مشخص کرد که در یک دامنه پاسخ ثابت، نسبت تفاضل دامنه، چگونه با

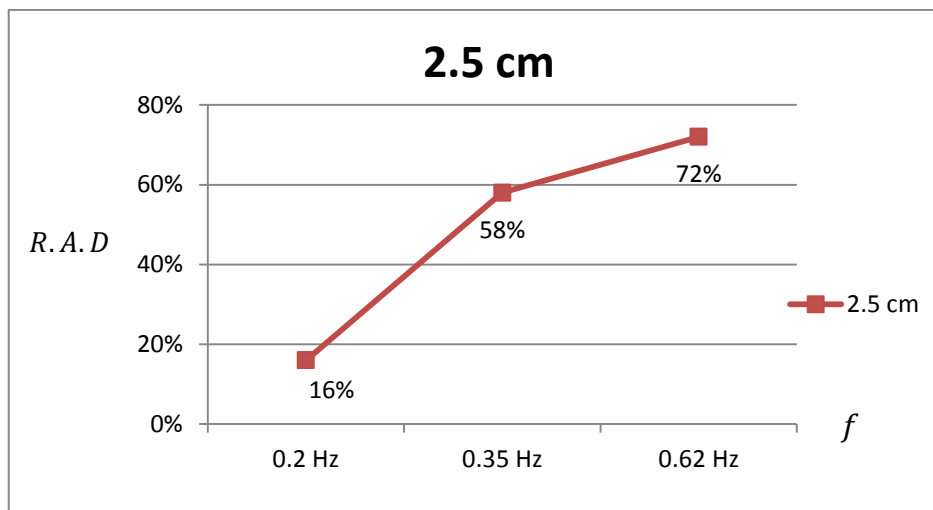
فرکانس تحریک تغییر می کند و نمودارهای زیر را رسم کرد:



شکل (۵-۱۲) نمودار تغییرات نسبت تفاضل دامنه برحسب فرکانس های تحریک در دامنه ۰/۵ سانتی متر



شکل (۵-۱۳) نمودار تغییرات نسبت تفاضل دامنه برحسب فرکانس‌های تحریک در دامنه ۱/۴ سانتی‌متر



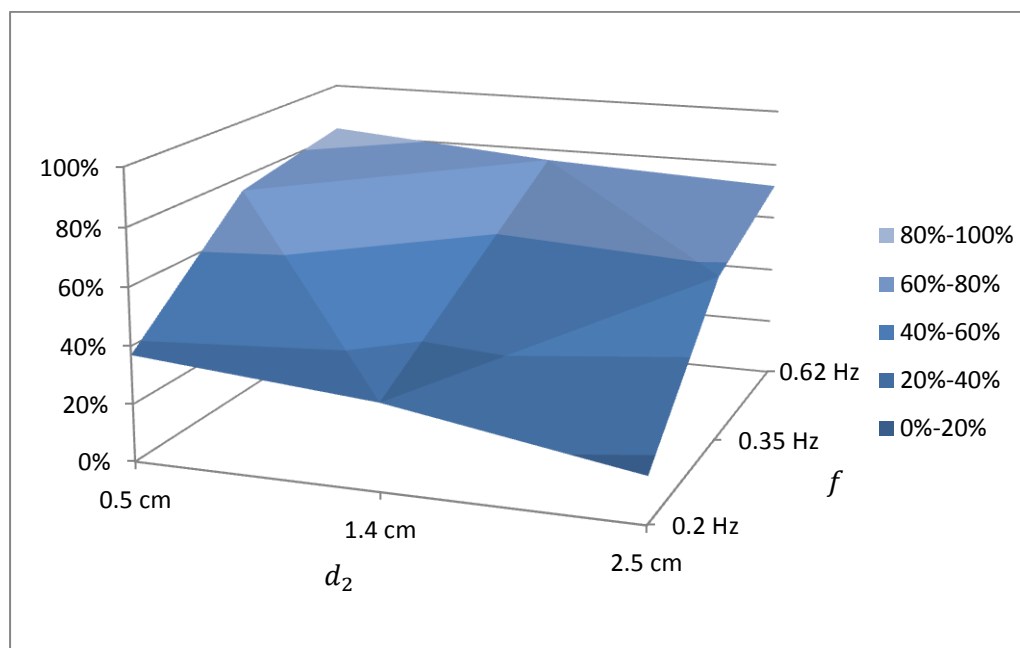
شکل (۵-۱۴) نمودار تغییرات نسبت تفاضل دامنه برحسب فرکانس‌های تحریک در دامنه ۲/۵ سانتی‌متر

از مشاهده شکل‌های (۵-۹) تا (۵-۱۴) می‌توان نتایج زیر را گرفت:

- ۱- با افزایش دامنه پاسخ در فرکانس ثابت تحریک، میزان نسبت تفاضل دامنه کاهش می‌یابد.
- ۲- با افزایش فرکانس تحریک در مانومتر در یک دامنه پاسخ ثابت، میزان نسبت تفاضل دامنه، افزایش پیدا می‌کند.

می‌توان تمامی نمودارهای بالا را در قالب یک نمودار ۳ بعدی به صورت زیر نشان داد:





شکل (۵-۱۵) نمودار ۳ بعدی تغییرات نسبت تفاضل دامنه برحسب تغییرات دامنه پاسخ و فرکانس تحریک

با توجه به اینکه این رویه ایجادشده در نمودار بالا تمامی نتایج حاصل از نمونه آزمایشگاهی اصلی (مخزن و مانومتر) را پوشش می‌دهد، می‌توان هر پاسخ در نمونه آزمایشگاهی اصلی را، با توجه به دامنه و فرکانس آن، به این نمودار آورد و میزان نسبت اختلاف دامنه را برای آن به دست آورد.

### ۵-۳ بررسی داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از نمودار نسبت تفاضل دامنه

همان‌طور که در فصل سوم به تفصیل بیان شد، برای انجام آزمایش‌های متعدد، شرایط آزمایش متفاوتی در نظر گرفته شد. در این آزمایش‌ها از ۳ دور متفاوت حرکت برای چرخش موتور استفاده شد که از طریق سیستم مکانیکی به حرکت رفت و برگشتی در مخزن تبدیل می‌شد. ۳ دامنه حرکت متفاوت برای حرکت رفت و برگشتی مخزن در نظر گرفته شده است که در نهایت این دوره‌های متفاوت و دامنه‌های متفاوت باعث ایجاد ۹ فرکانس متفاوت در حرکت مخزن می‌شد. از طرفی ۳ ارتفاع متفاوت مایع در مخزن در این آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است که جمعاً ۲۷ شرایط متفاوت برای آزمایش را ایجاد می‌کند.

تمامی این ۲۷ حالت مختلف در حالات وجود تیغه میرا کننده و عدم وجود تیغه میرا کننده مورد بررسی قرار گرفت. تمامی نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی برای نقاط متفاوت تعبیه شده روی دیواره مخزن، در جداول (۳-۱) تا (۳-۴) آمده است.

همان طور که مشاهده می شود در ستون آخر این جدول مقدار بیشینه نسبت تفاضل دامنه<sup>۱</sup> برای تمامی داده ها بیان شده است که با استفاده از رویه نشان داده در شکل (۵-۱۵) به دست آمده اند. به طور مثال میزان نسبت تفاضل دامنه برای یک حالت مقداری از ۳۰ تا ۴۰ درصد است. در این حالت مقدار ۴۰ درصد به عنوان ماکزیمم نسبت تفاضل دامنه در نظر گرفته می شود.

در این بررسی از تمامی داده های دارای مقدار ماکزیمم نسبت تفاضل دامنه بالای ۶۰ درصد صرف نظر می شود. علت این امر این است که تمامی داده های قابل قبول (ماکزیمم نسبت تفاضل دامنه زیر ۶۰ درصد) را در نمودارهای بی بعد مورد بررسی قرار داده و با استفاده از مقدار ماکزیمم نسبت تفاضل دامنه، مقادیر ثبت شده، اصلاح شود. از طرفی بالا بودن مقادیر ماکزیمم نسبت تفاضل دامنه، باعث ایجاد دامنه ی تغییرات بالایی در داده های خروجی می شود.

درواقع در بررسی های انجام شده، میزان تغییرات ارتفاع در مانومتر و دامنه حرکت سینوسی مایع در مانومتر به همراه فرکانس آن را از طریق تصویربرداری ثبت شده است و این مقادیر ثبت شده را مورد اصلاح قرار داده و می توانیم گفت که این مقادیر در واقع چه مقادیری در سمت دیگر مانومتر (ورودی یا همان دیواره مخزن) بوده است.

<sup>1</sup> Maximum Relative Amplitude Difference

برای ترسیم نمودارهای بی‌بعد از داده‌ای قابل قبول به نحو زیر عمل می‌شود:

همان‌طور که در جداول (۳-۵) تا (۶-۵) مشخص شده است، دامنه نوسان مایع در داخل مانومتر نشان داده شده است. این دامنه به‌عنوان دامنه خروجی یا پاسخ در نظر گرفته می‌شود. از طرفی دامنه حرکت رفت و برگشتی مخزن در هر نمونه مشخص است. دامنه حرکت مخزن به‌عنوان دامنه تحریک یا ورودی در نظر گرفته می‌شود. فرکانس حرکت مایع در مانومتر به‌عنوان فرکانس پاسخ با استفاده از تصویربرداری و ثبت زمان یک سیکل کامل برای حرکت مایع در مانومتر، موجود است. از طرفی فرکانس تشدید در مانومتر با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2g}{L}} \quad (۲-۵)$$

که در این رابطه داریم:

L: طول شامل مایع در مانومتر با واحد متر

g: شتاب جاذبه زمین با واحد متر بر مجذور ثانیه

با توجه به اینکه مقدار طولی از مانومتر که شامل مایع است در نمونه‌ی آزمایشگاهی ۲ متر است

مقدار فرکانس تشدید در مانومتر به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2g}{L}} = \sqrt{\frac{2*9.81}{2}} = 3.132 \left(\frac{1}{s}\right)$$

برای ترسیم نمودارهای بی‌بعد از داده‌های قابل قبول، محور عمودی را نسبت دامنه پاسخ به دامنه

تحریک  $\left(\frac{Amp_{out}}{Amp_{in}}\right)$  در نظر گرفته و محور افقی نسبت فرکانس به فرکانس تشدید  $\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)$  در نظر

گرفته می‌شود. برای این منظور تمامی حالات قابل قبول را در قابل جداول زیر (جدول (۳-۵) تا (۵-۵))

((۶) نشان داده می‌شود:

جدول (۳-۵) موارد قابل قبول داده‌ها به همراه کمیت‌های بی‌بعد در حالت عدم وجود تیغه میرا کننده

ارتفاع سیال (سانتی‌متر)	فرکانس (هرتز)	ارتفاع تیغه (سانتی‌متر)	دامنه تحریک (سانتی‌متر)	دامنه پاسخ (سانتی‌متر)	نسبت دامنه <sup>۲</sup>	نسبت فرکانس	M.R.A.D <sup>۱</sup>
۶	۰/۲۲۲	-	۱۰	۰/۴	۰/۰۴	۰/۴۴	%۴۰
۶	۰/۲۵۶	-	۷/۵	۰/۷	۰/۰۹۳	۰/۵۱	%۴۰
۶	۰/۲۸۹	-	۴	۰/۵	۰/۱۲۵	۰/۵۸	%۶۰
۶	۰/۳۸۴	-	۱۰	۱/۸	۰/۱۸	۰/۷۷	%۶۰
۶	۰/۴۱۶	-	۷/۵	۱/۳	۰/۱۸۷	۰/۸۳	%۶۰
۱۰	۰/۲۲۲	-	۱۰	۰/۲۵	۰/۰۲۵	۰/۴۴	%۴۰
۱۰	۰/۲۵۶	-	۷/۵	۰/۷	۰/۰۸۵	۰/۵۱	%۴۰
۱۰	۰/۲۸۹	-	۴	۰/۴	۰/۱	۰/۵۸	%۶۰
۱۴	۰/۲۲۲	-	۱۰	۰/۴	۰/۰۴	۰/۴۴	%۴۰
۱۴	۰/۲۵۶	-	۷/۵	۰/۵	۰/۰۶۶	۰/۵۱	%۵۰
۱۴	۰/۲۸۹	-	۴	۰/۴	۰/۱	۰/۵۸	%۶۰

جدول (۴-۵) موارد قابل قبول داده‌ها به همراه کمیت‌های بی‌بعد در حالت وجود تیغه میرا کننده ۶ سانتی‌متر

ارتفاع سیال (سانتی‌متر)	فرکانس (هرتز)	ارتفاع تیغه (سانتی‌متر)	دامنه تحریک (سانتی‌متر)	دامنه پاسخ (سانتی‌متر)	نسبت دامنه	نسبت فرکانس	M.R.A.D
۶	۰/۲۲۲	۶	۱۰	۰/۲۷۵	۰/۰۲۷	۰/۴۴	%۶۰
۶	۰/۲۵۶	۶	۷/۵	۰/۳	۰/۰۴	۰/۵۱	%۴۰
۶	۰/۲۸۹	۶	۴	۰/۲۵	۰/۰۶۲	۰/۵۸	%۴۰
۱۰	۰/۲۲۲	۶	۱۰	۰/۵	۰/۰۵	۰/۴۴	%۶۰
۱۰	۰/۲۵۶	۶	۷/۵	۰/۵	۰/۰۶۶	۰/۵۱	%۴۰
۱۰	۰/۲۸۹	۶	۴	۰/۴	۰/۱	۰/۵۸	%۴۰
۱۰	۰/۳۸۹	۶	۱۰	۱/۴۵	۰/۱۴۵	۰/۷۷	%۶۰
۱۰	۰/۵۲۶	۶	۱۰	۲/۶۵	۰/۲۶۵	۱/۰۵۴	%۶۰
۱۴	۰/۲۲۲	۶	۱۰	۰/۵۵	۰/۰۵۵	۰/۴۴	%۶۰
۱۴	۰/۲۵۶	۶	۷/۵	۰/۵۵	۰/۰۷۳	۰/۵۱	%۵۰
۱۴	۰/۲۸۹	۶	۴	۰/۴	۰/۱	۰/۵۸	%۴۰
۱۴	۰/۳۸۴	۶	۱۰	۱/۳	۰/۱۳	۰/۷۷	%۶۰

<sup>1</sup> Maximum Relative Amplitude Difference

<sup>2</sup>  $\frac{Amp_{out}}{Amp_{in}}$

جدول (۵-۵) موارد قابل قبول داده‌ها به همراه کمیت‌های بی‌بعد در حالت وجود تیغه میرا کننده ۸ سانتی‌متر

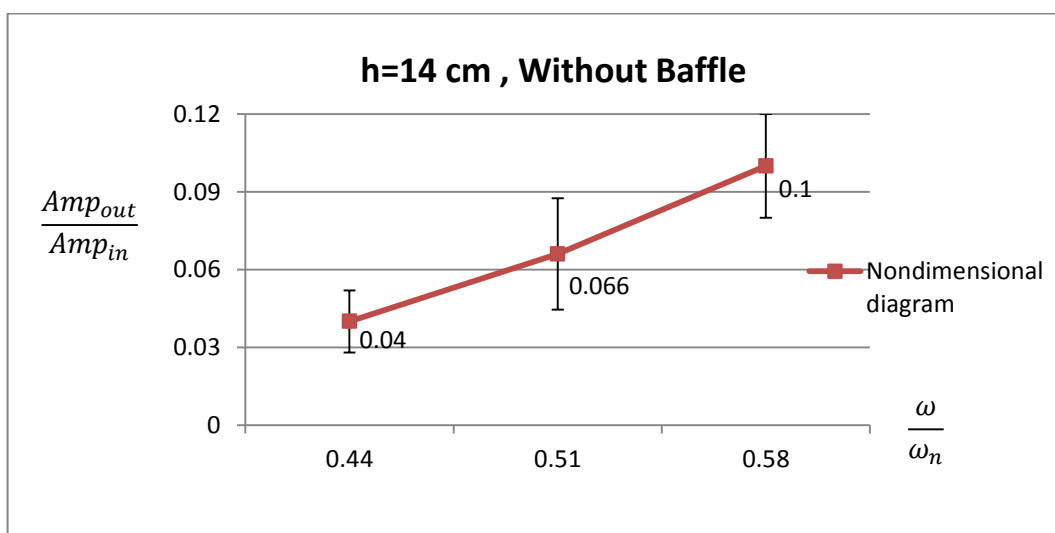
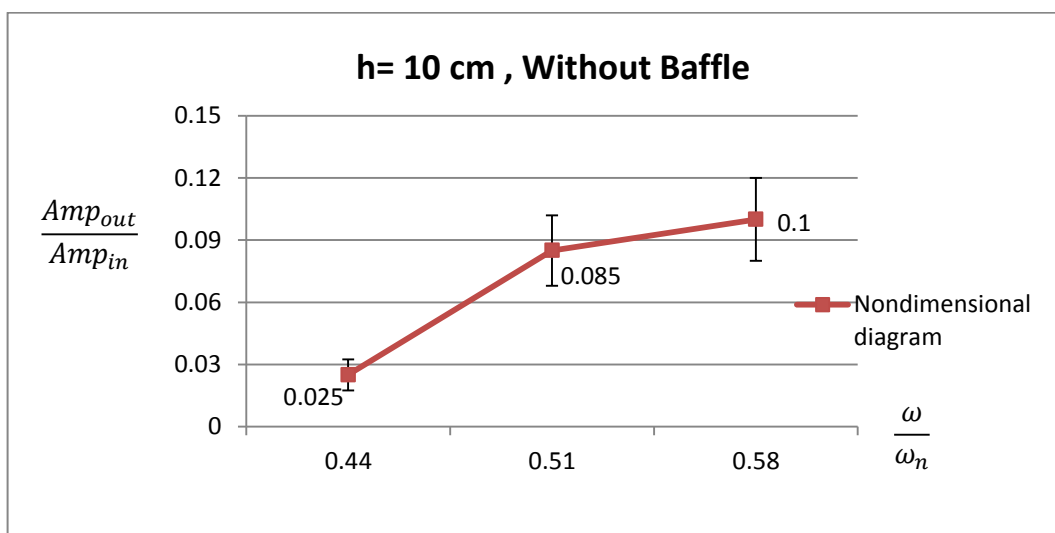
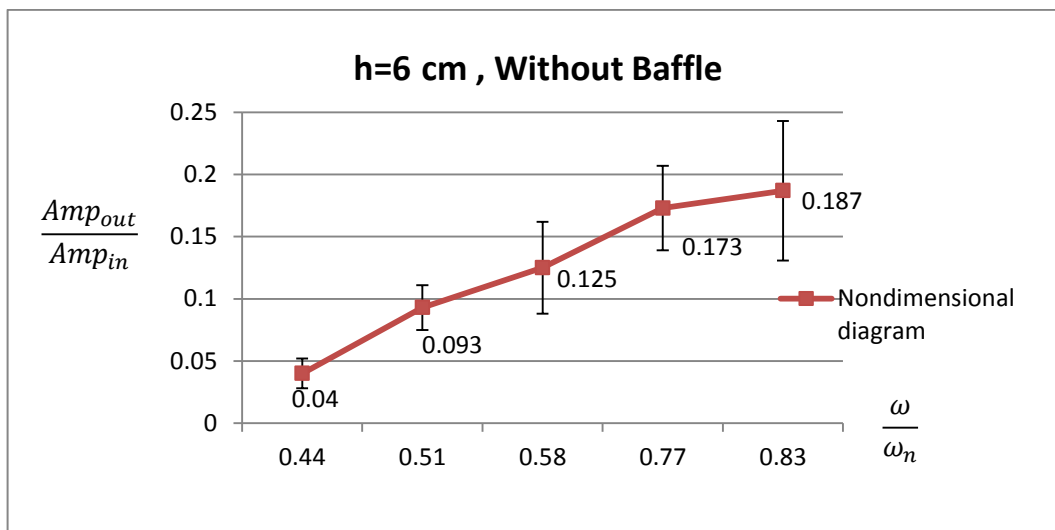
ارتفاع سیال (سانتی‌متر)	فرکانس (هرتز)	ارتفاع تیغه (سانتی‌متر)	دامنه تحریک (سانتی‌متر)	دامنه پاسخ (سانتی‌متر)	نسبت دامنه	نسبت فرکانس	M.R.A.D
۶	۰/۲۲۲	۸	۱۰	۰/۴	۰/۰۴	۰/۴۴	٪۶۰
۶	۰/۲۵۶	۸	۷/۵	۰/۵	۰/۰۶۶	۰/۵۱	٪۴۰
۶	۰/۲۸۹	۸	۴	۰/۵	۰/۱۲۵	۰/۵۸	٪۶۰
۱۰	۰/۲۲۲	۸	۱۰	۰/۴۵	۰/۰۴۵	۰/۴۴	٪۴۰
۱۰	۰/۲۵۶	۸	۷/۵	۰/۵۵	۰/۰۷	۰/۵۱	٪۴۰
۱۰	۰/۲۸۹	۸	۴	۰/۳۵	۰/۰۸۷	۰/۵۸	٪۶۰
۱۰	۰/۳۸۴	۸	۱۰	۱/۵	۰/۱۵	۰/۷۷	٪۶۰
۱۴	۰/۲۲۲	۸	۱۰	۰/۵	۰/۰۵	۰/۴۴	٪۴۰
۱۴	۰/۲۵۶	۸	۷/۵	۰/۵	۰/۰۶۶	۰/۵۱	٪۵۰
۱۴	۰/۲۸۹	۸	۴	۰/۴	۰/۱	۰/۵۸	٪۶۰
۱۴	۰/۳۸۴	۸	۱۰	۱/۳۵	۰/۱۴۵	۰/۷۷	٪۶۰

جدول (۵-۶) موارد قابل قبول داده‌ها به همراه کمیت‌های بی‌بعد در حالت وجود تیغه میرا کننده ۱۰ سانتی‌متر

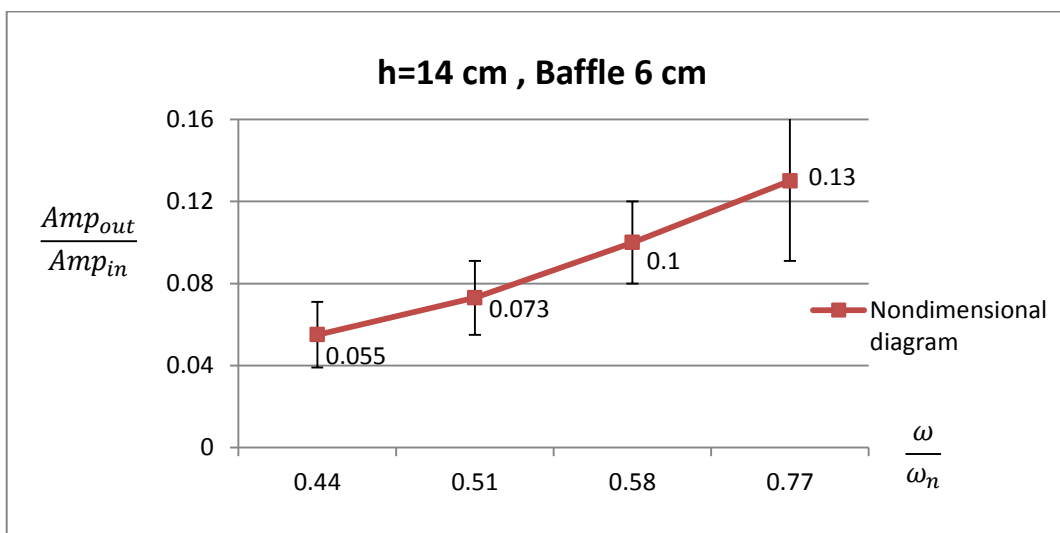
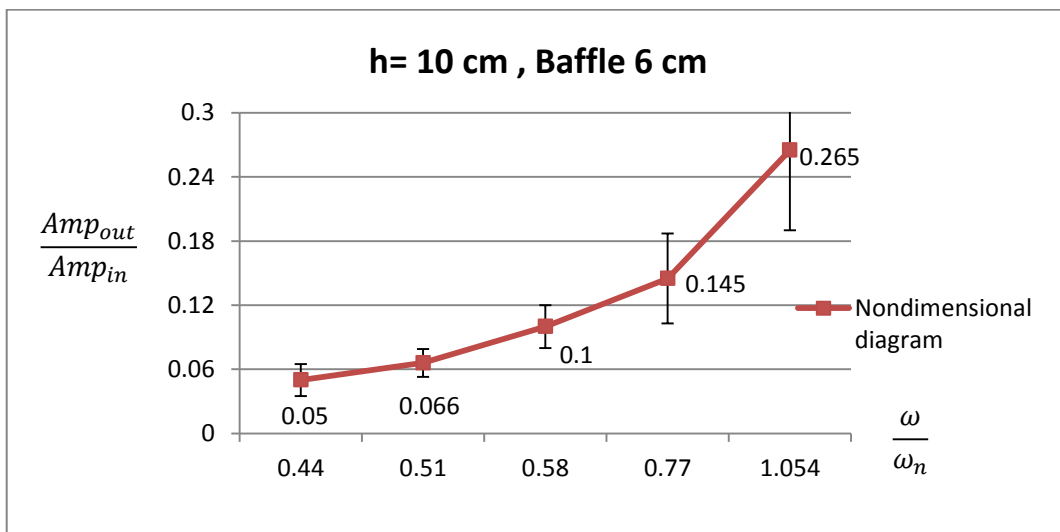
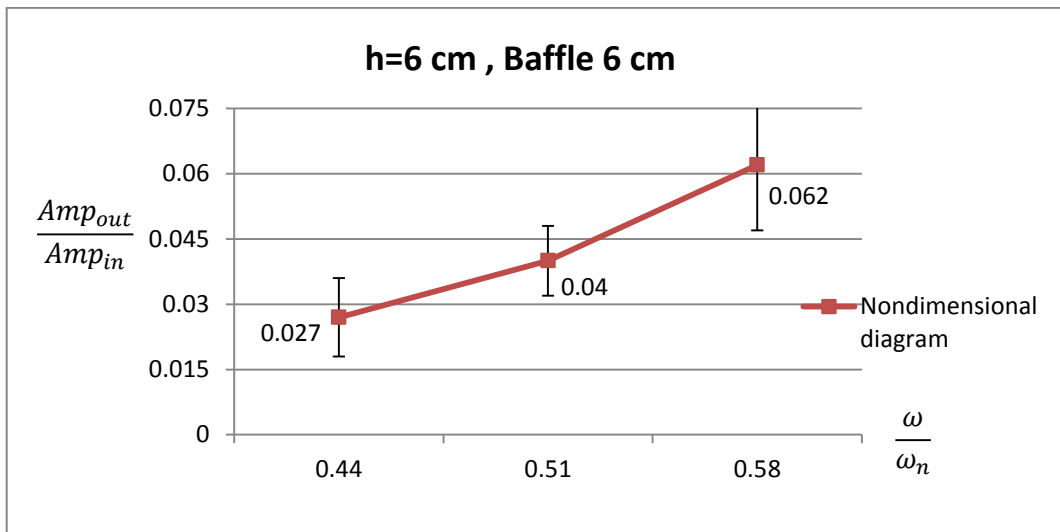
ارتفاع سیال (سانتی‌متر)	فرکانس (هرتز)	ارتفاع تیغه (سانتی‌متر)	دامنه تحریک (سانتی‌متر)	دامنه پاسخ (سانتی‌متر)	نسبت دامنه	نسبت فرکانس	M.R.A.D
۶	۰/۲۲۲	۱۰	۱۰	۰/۴	۰/۰۴	۰/۴۴	٪۴۰
۶	۰/۲۵۶	۱۰	۷/۵	۰/۵	۰/۰۶۶	۰/۵۱	٪۴۰
۶	۰/۲۸۹	۱۰	۴	۰/۵	۰/۱۲۵	۰/۵۸	٪۶۰
۱۰	۰/۲۲۲	۱۰	۱۰	۰/۲۵	۰/۰۲۵	۰/۴۴	٪۴۰
۱۰	۰/۲۵۶	۱۰	۷/۵	۰/۲۵	۰/۰۳۳	۰/۵۱	٪۴۰
۱۰	۰/۲۸۹	۱۰	۴	۰/۲	۰/۰۵	۰/۵۸	٪۶۰
۱۴	۰/۲۲۲	۱۰	۱۰	۰/۴	۰/۰۴	۰/۴۴	٪۴۰
۱۴	۰/۲۵۶	۱۰	۷/۵	۰/۶۵	۰/۰۸۶	۰/۵۱	٪۵۰
۱۴	۰/۲۸۹	۱۰	۴	۰/۴	۰/۱	۰/۵۸	٪۶۰
۱۴	۰/۳۸۴	۱۰	۱۰	۱/۵	۰/۱۵	۰/۷۷	٪۶۰

### ۵-۳-۱ ترسیم نمودارهای بی بعد

حال با توجه به داده‌های موجود در جداول بالا می‌توان نمودارهای بی بعد زیر را در حالات متفاوت وجود و عدم وجود تیغه میرا کننده و در ارتفاع‌های متفاوت مایع در مخزن مکعب مستطیلی شکل، به صورت زیر ترسیم کرد (شکل (۵-۱۶) تا (۵-۱۹)). منظور از پارامتر  $h$  ارتفاع مایع در مخزن مکعب مستطیلی است.

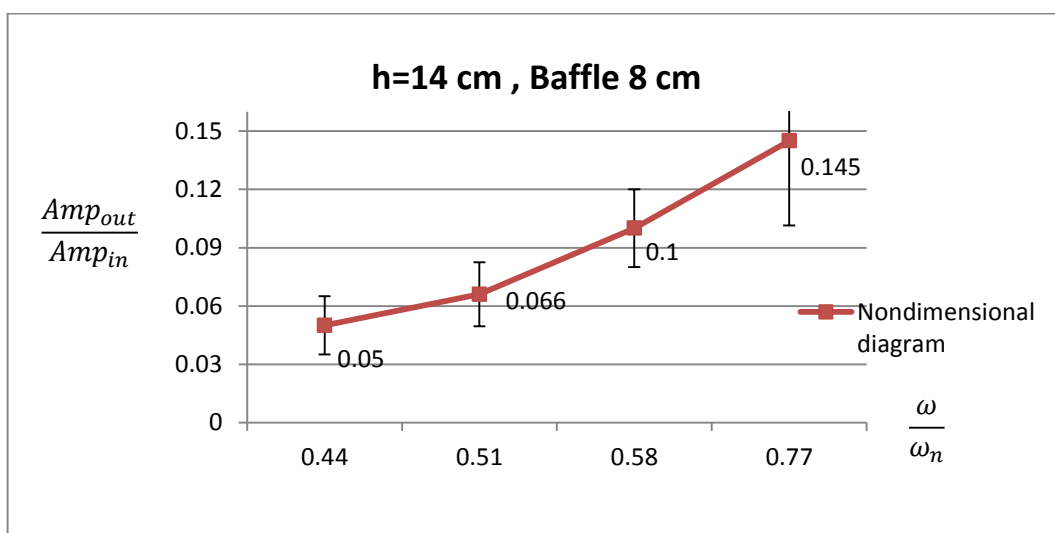
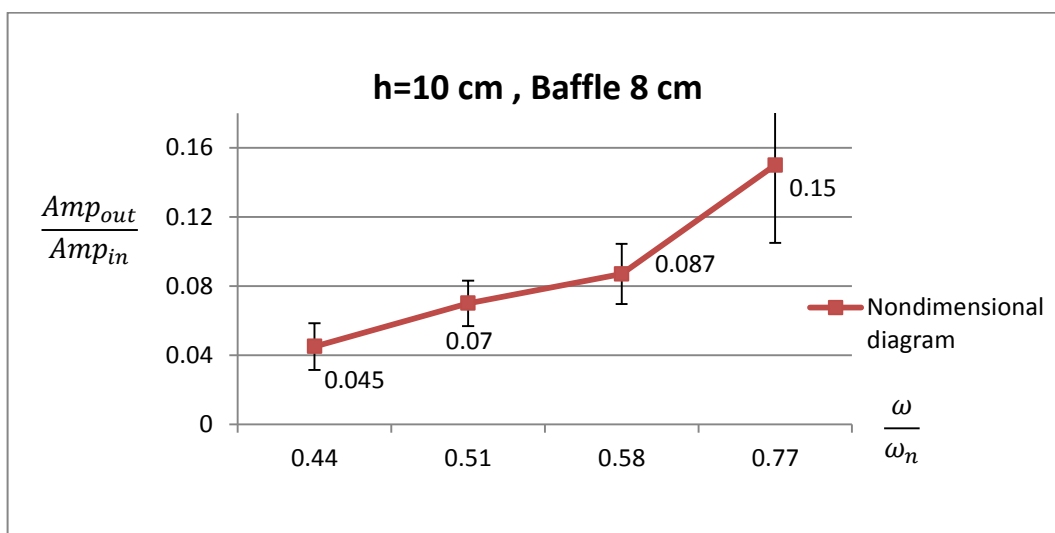
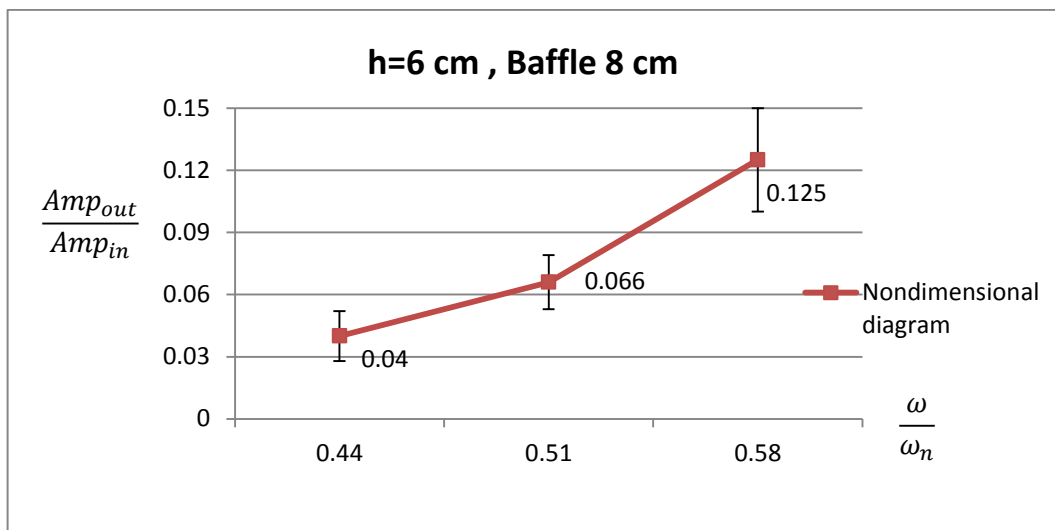


شکل (۵-۱۶) نمودارهای بی‌بعد نسبت دامنه‌ها برحسب نسبت فرکانس‌ها در حالت عدم وجود تیغه میرا کننده

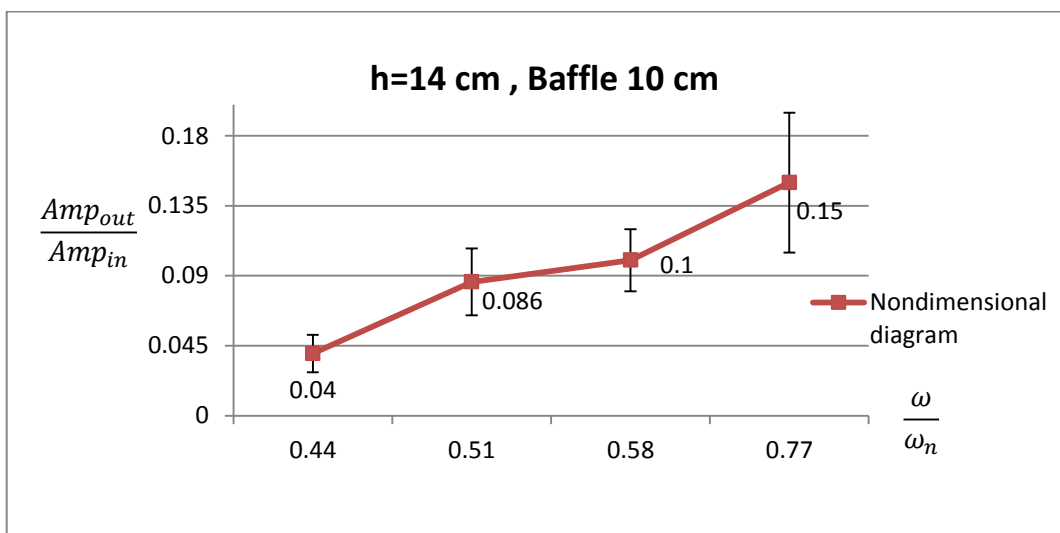
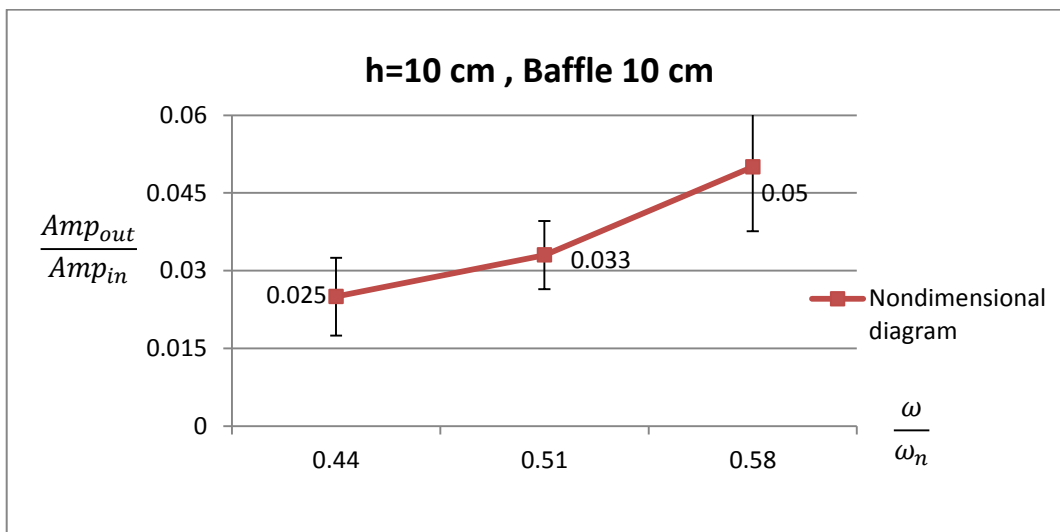
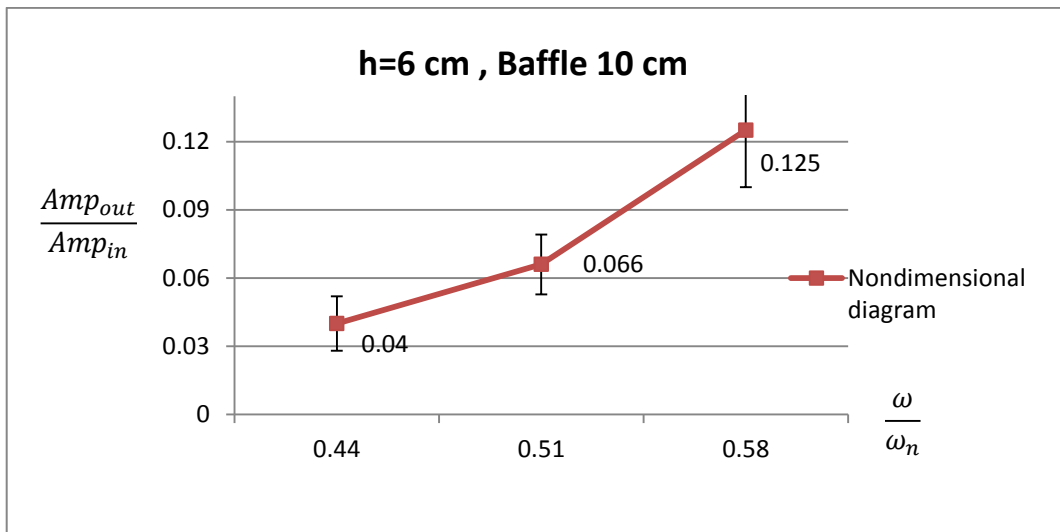


شکل (۵-۱۷) نمودارهای بی‌بعد نسبت دامنه‌ها برحسب نسبت فرکانس‌ها در حالت وجود تیغه ۶ سانتی‌متر





شکل (۵-۱۸) نمودارهای بی‌بعد نسبت دامنه‌ها برحسب نسبت فرکانس‌ها در حالت تیغه ۸ سانتی‌متر

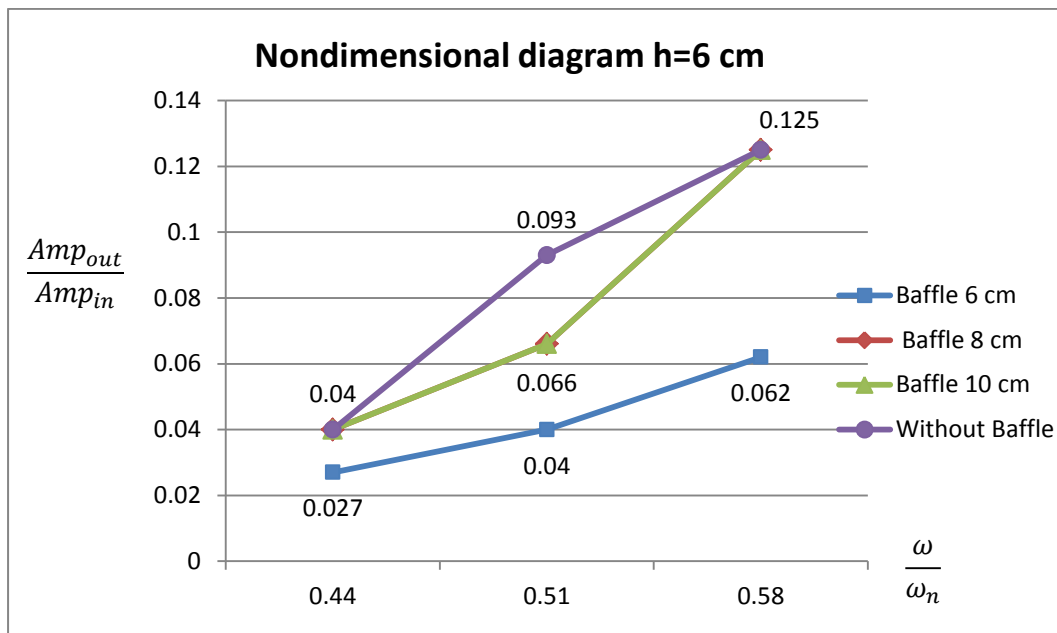


شکل (۵-۱۹) نمودارهای بی بعد نسبت دامنه‌ها برحسب نسبت فرکانس‌ها در حالت تیغه ۱۰ سانتی‌متر

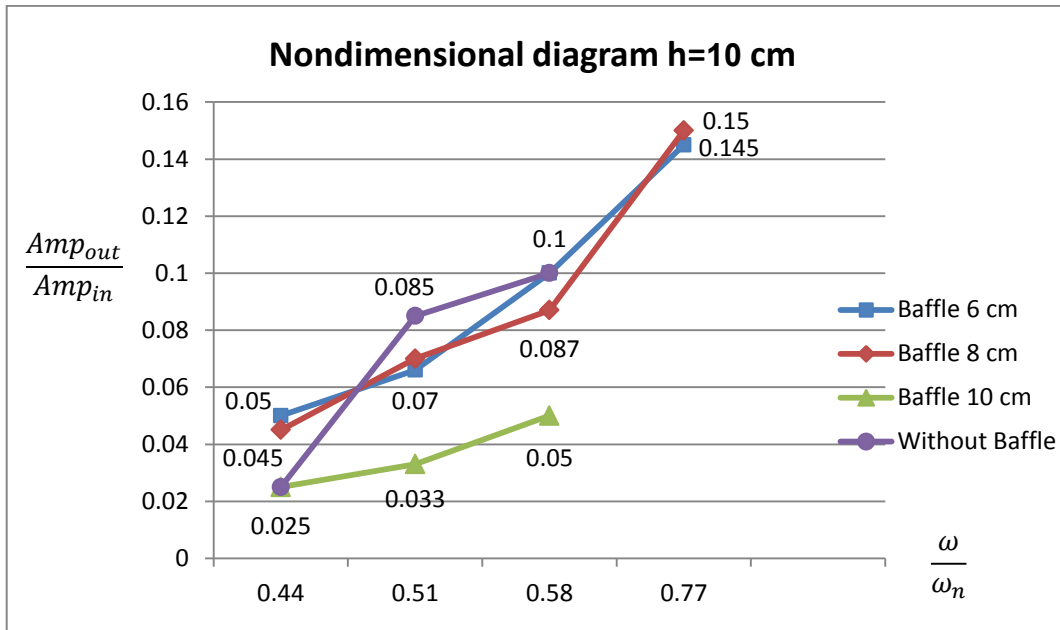
همان طور که در نمودارهای بالا مشخص است، میزان ماکزیمم نسبت تفاضل دامنه‌ها، برای هر نسبت دامنه و نسبت فرکانس، به صورت خطوطی عمودی که بازه تغییرات را مشخص می‌کند، مشخص شده است.

### ۵-۳-۲ ترسیم نمودارهای مقایسه‌ای بی‌بعد

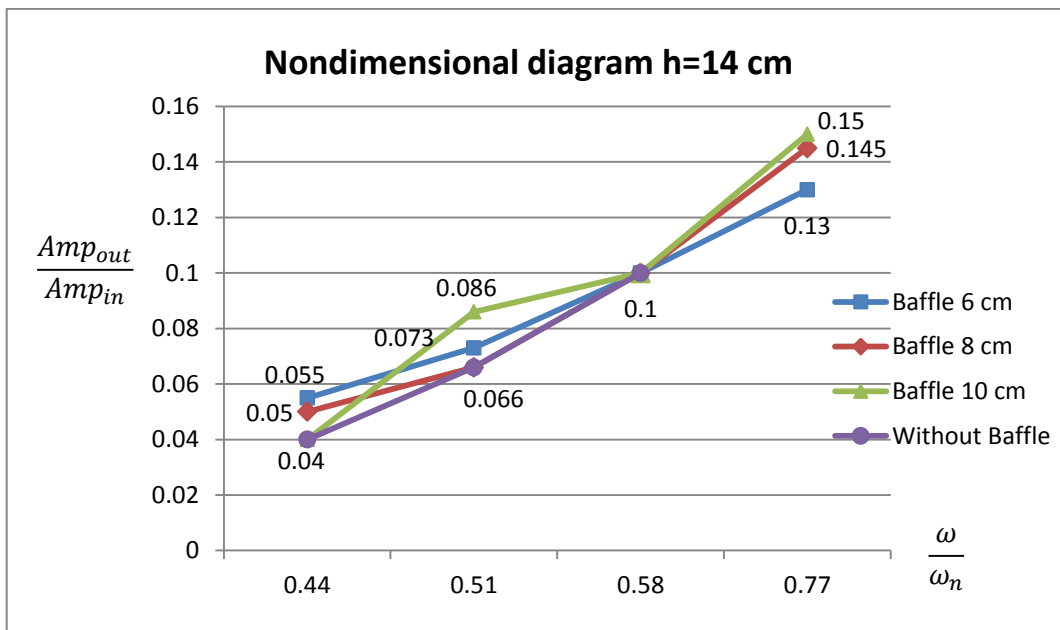
می‌توان نمودارهای بالا را در قالب نمودارهای مقایسه‌ای به صورت زیر نشان داد. در این حالت چند نمودار در قالب یک نمودار گزارش شده و امکان مقایسه و تأثیر پارامترهای متفاوت روی دامنه پاسخ، نشان داده می‌شود. برای ترسیم نمودارهای مقایسه‌ای در ابتدا نمودارها با ارتفاع‌های متفاوت تیغه میرا کننده، در قالب یک نمودار با یک ارتفاع مشخص مایع، به صورت زیر گزارش می‌شود (اشکال (۵-۲۰) تا (۵-۲۲)).



شکل (۵-۲۰) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت تیغه و ارتفاع مایع ۶ سانتی‌متر



شکل (۲۱-۵) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت تیغه و ارتفاع مایع ۱۰ سانتی‌متر

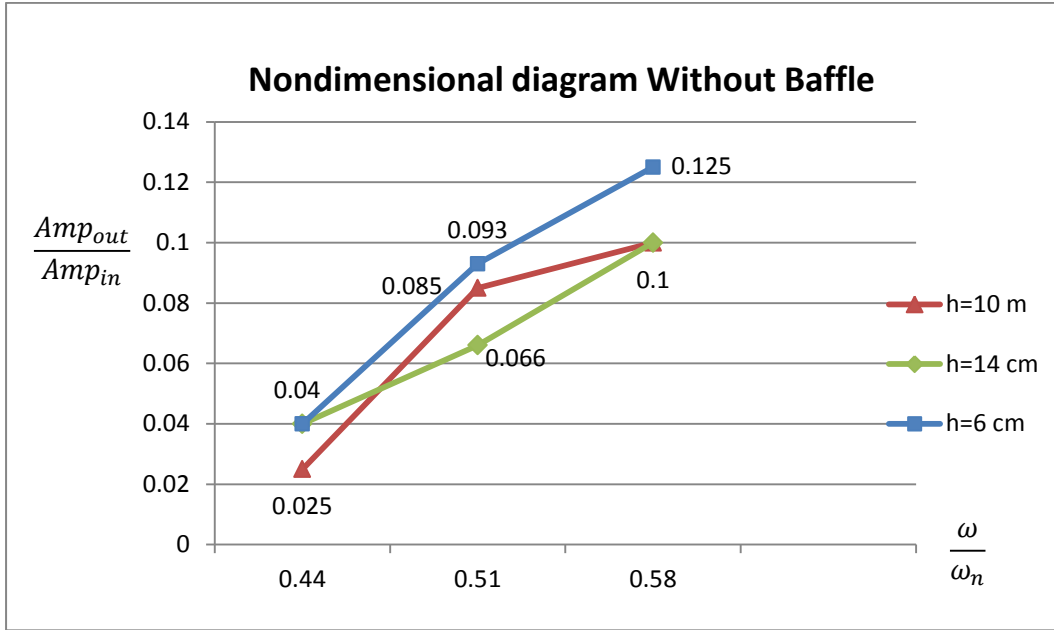


شکل (۲۲-۵) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت تیغه و ارتفاع مایع ۱۴ سانتی‌متر

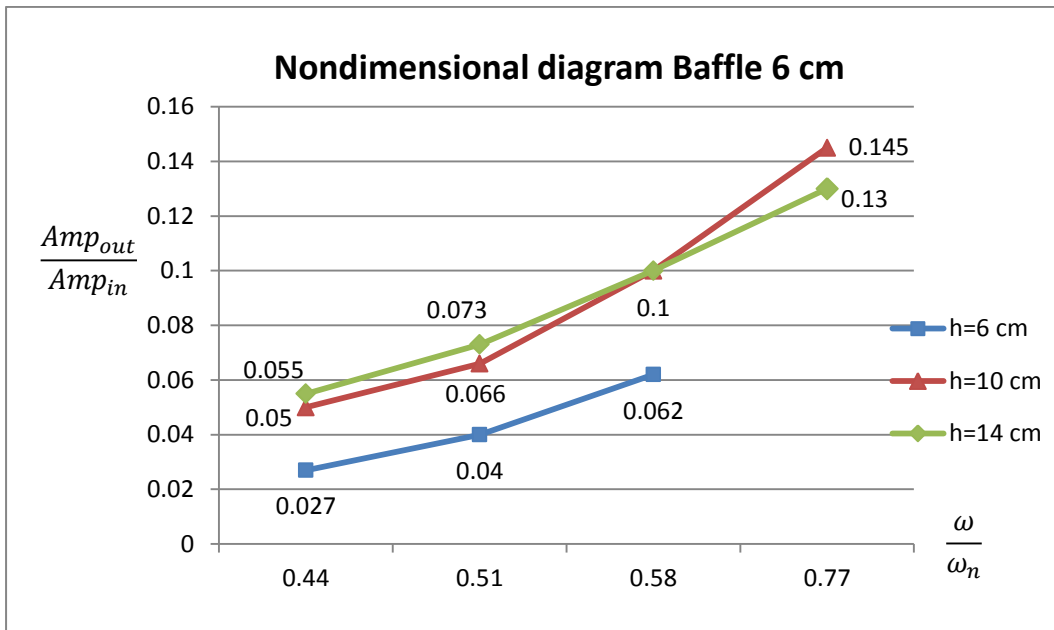
حال با در نظر گرفتن ارتفاع تیغه یکسان برای نمودار، می‌توان هر نمودار مقایسه‌ای را برای

ارتفاع‌های متفاوت مایع به صورت زیر ترسیم کرد و امکان مقایسه دامنه پاسخ با ارتفاع سیال در داخل

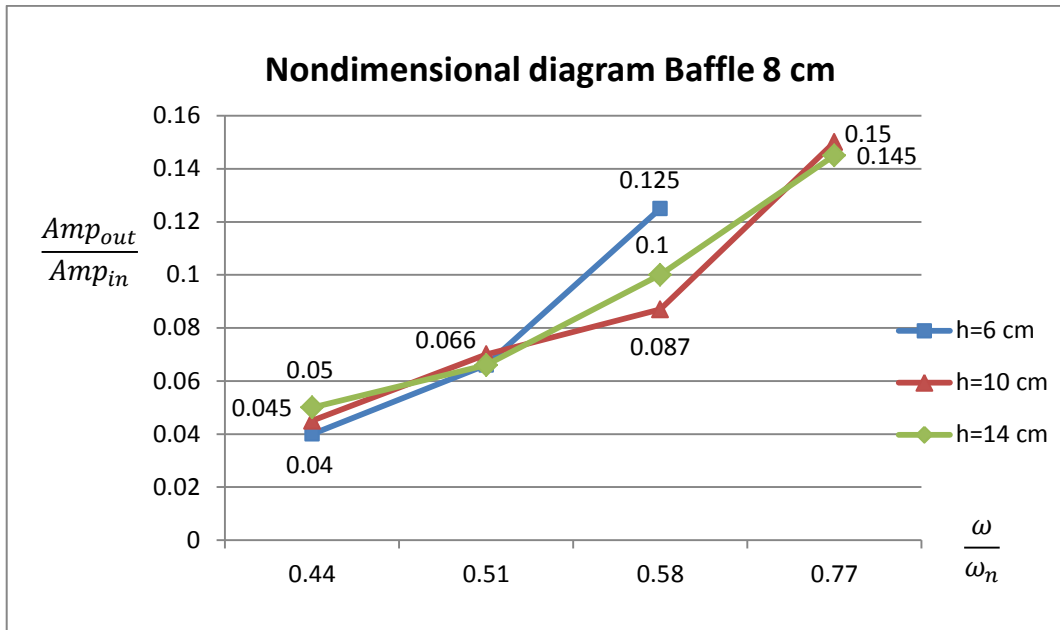
مخزن ایجاد می‌شود (اشکال (۲۳-۵) تا (۲۶-۵)).



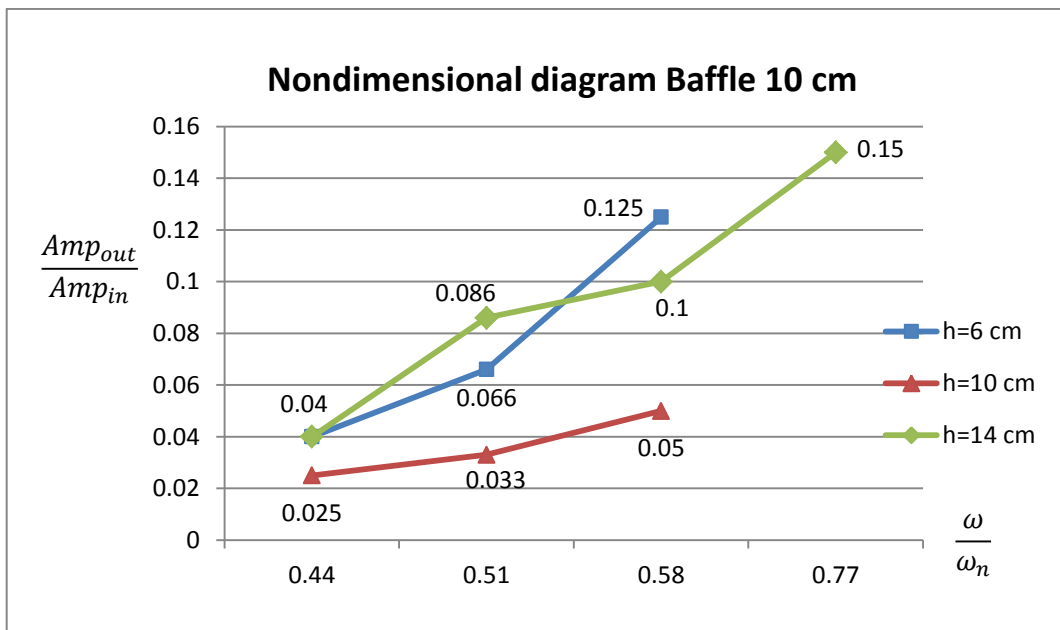
شکل (۲۳-۵) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و حالت عدم وجود تیغه میرا کننده



شکل (۲۴-۵) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و وجود تیغه ۶ سانتی‌متر



شکل (۵-۲۵) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و وجود تیغه ۸ سانتی‌متر



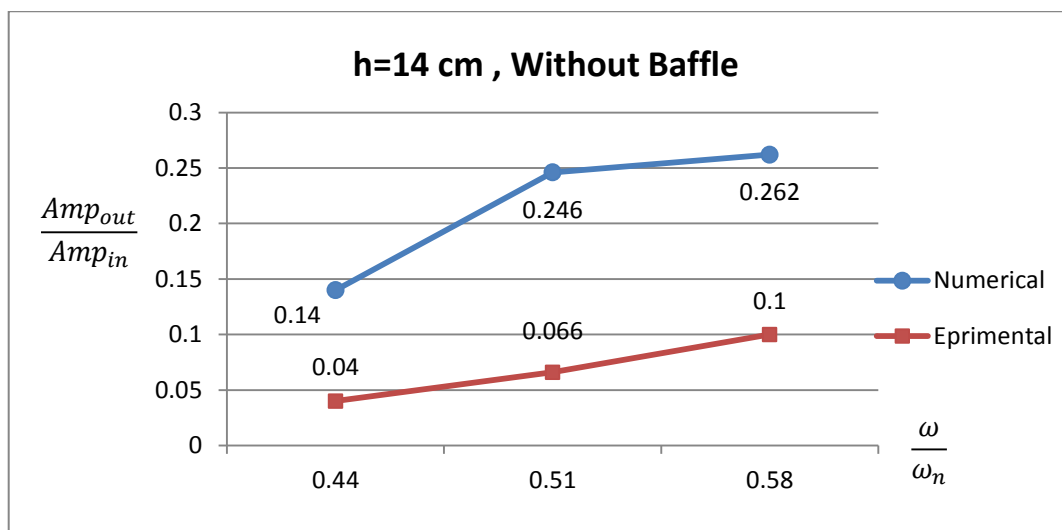
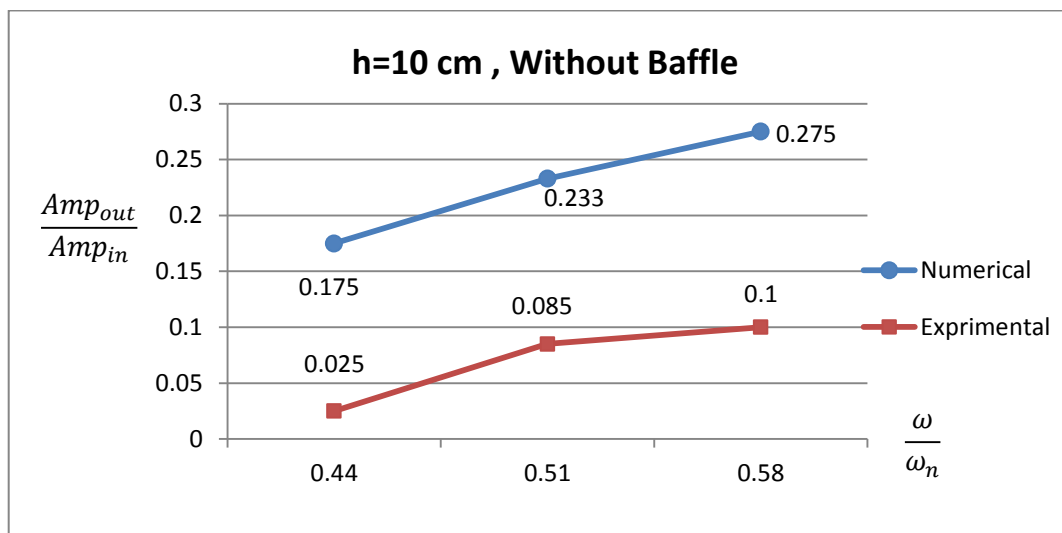
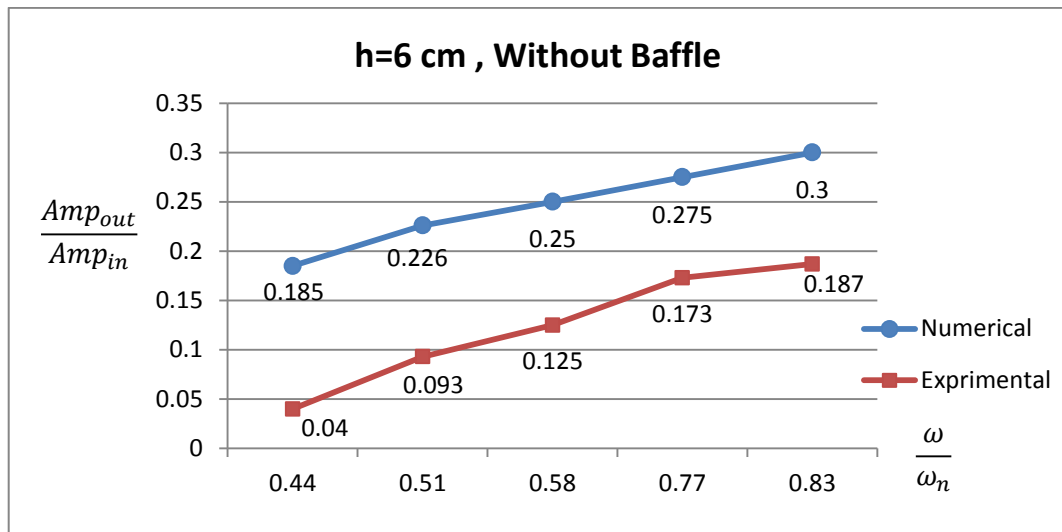
شکل (۵-۲۶) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و وجود تیغه ۱۰ سانتی‌متر

## ۴-۵ بررسی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی و مقایسه آن با نتایج

### آزمایشگاهی

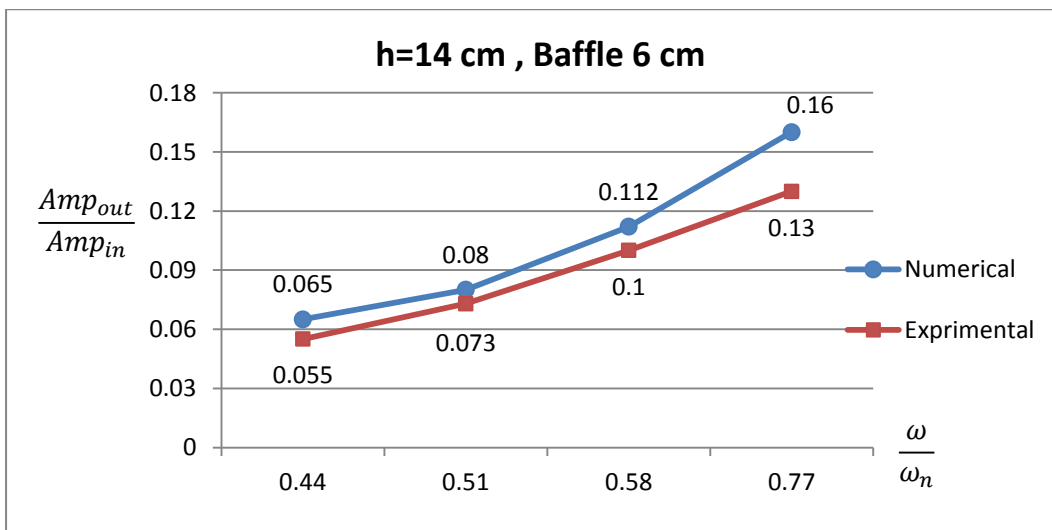
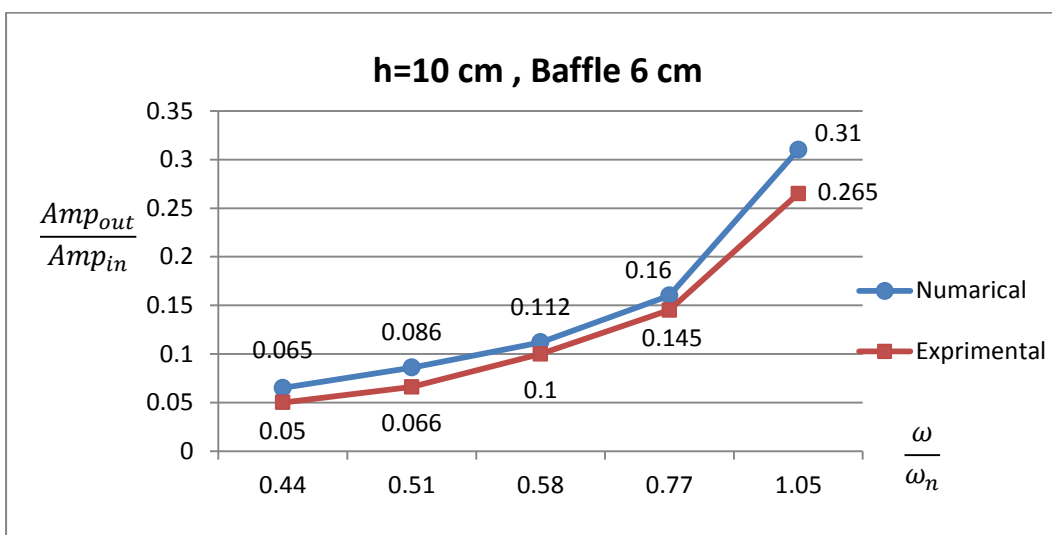
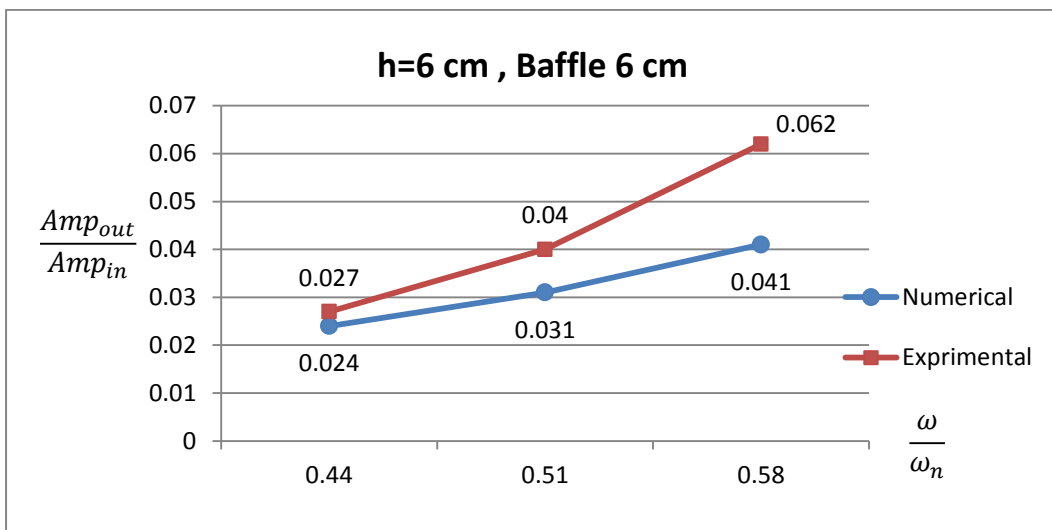
همان‌طور که در فصل چهارم به تفصیل بیان شد، تمامی حالات مورد بررسی در نمونه آزمایشگاهی با شرایط آزمایشگاهی مورد نظر در آن، با استفاده از نرم‌افزار منبع باز OpenFOAM، شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. در بین تمامی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، آن بخش از نتایج را که در نمونه آزمایشگاهی قابل قبول بود، مورد بررسی قرار داده می‌شود. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی با استفاده از گزارش نمودارهای مقایسه‌ای، مورد بررسی قرار داده می‌شود.

برای این منظور تمامی نمودارهای نشان داده‌شده در اشکال (۵-۱۶) تا (۵-۱۹) با استفاده از داده‌ای حاصل از شبیه‌سازی عددی ترسیم شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود (اشکال (۵-۲۷) تا (۵-۳۰)).

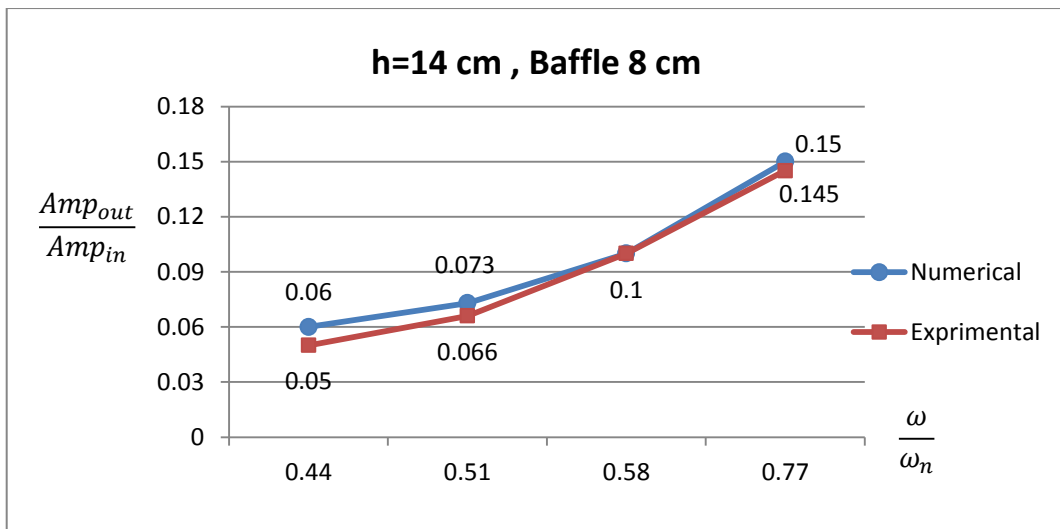
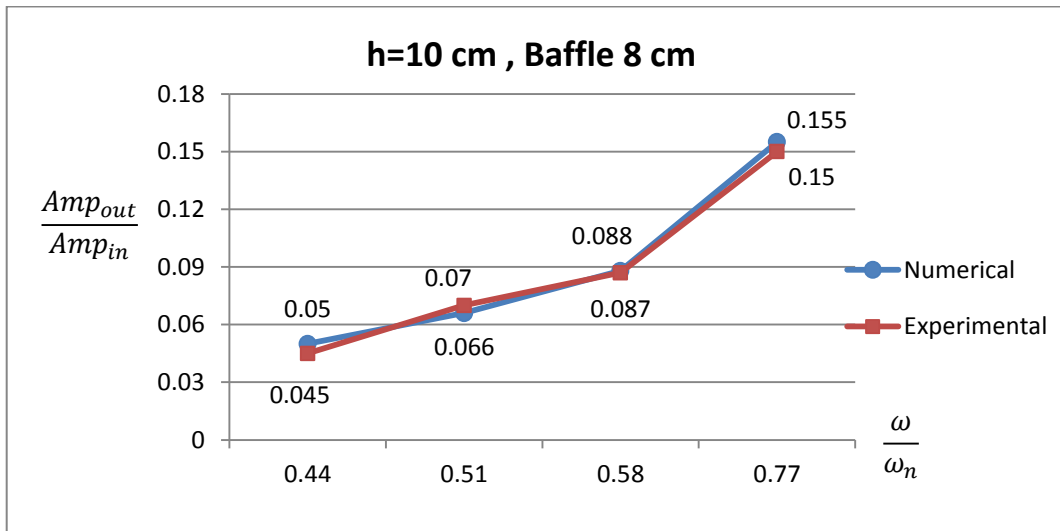
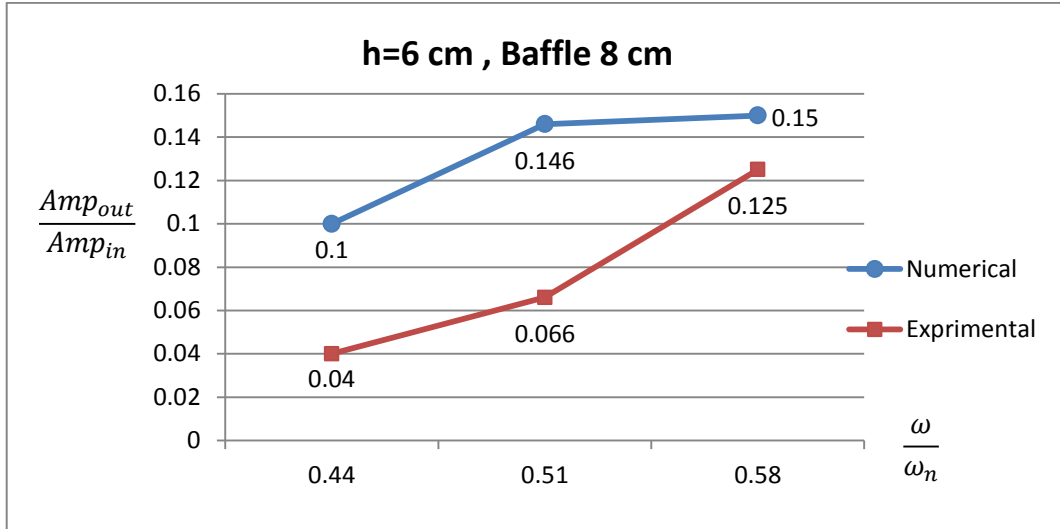


شکل (۲۷-۵) نمودارهای بی‌بعد مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در حالت عدم وجود تیغه میرا کننده

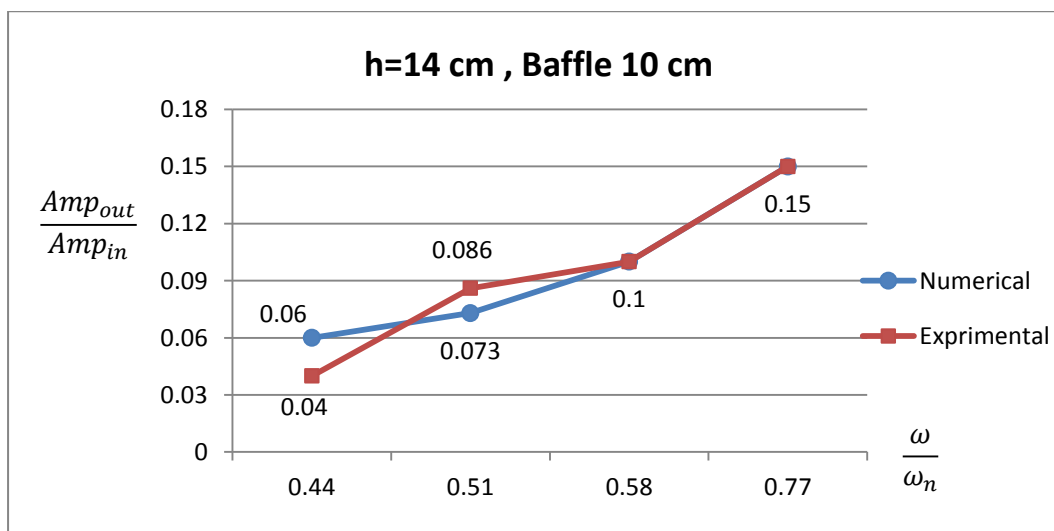
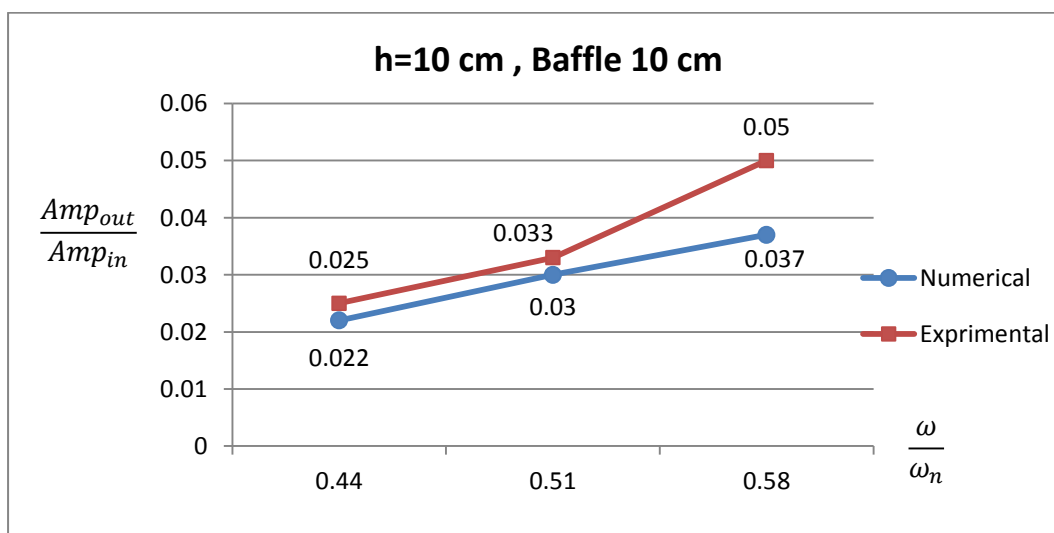
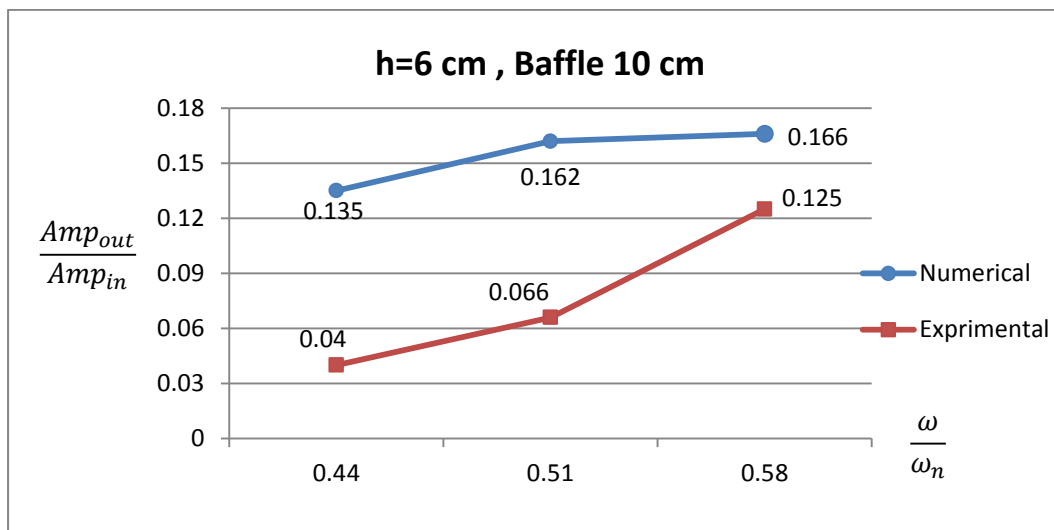




شکل (۵-۲۸) نمودارهای بی بعد مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در حالت وجود تیغه ۶ سانتی متر



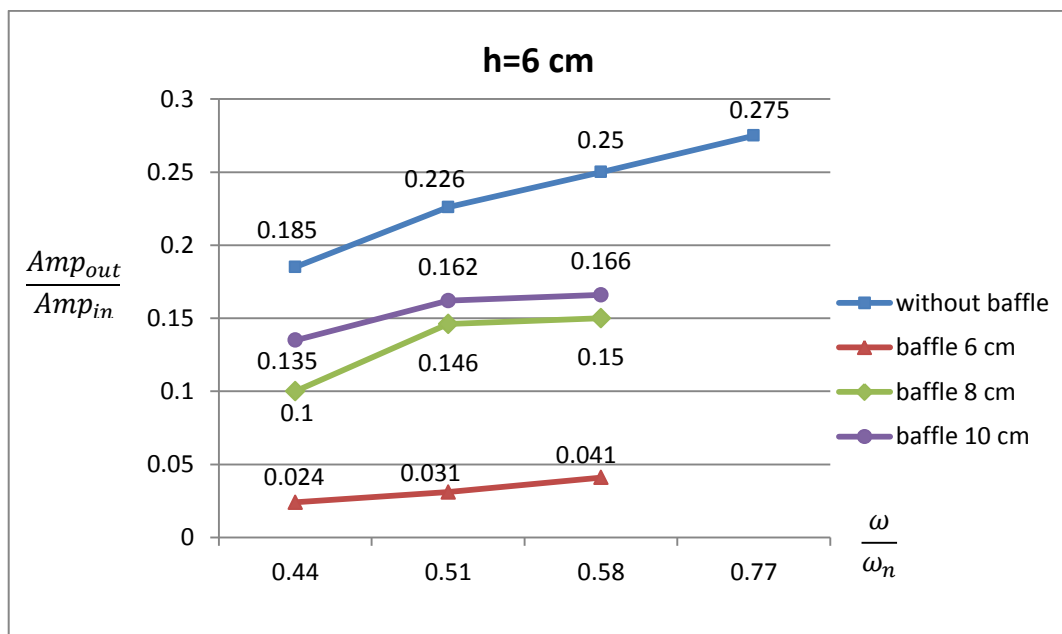
شکل (۵-۲۹) نمودارهای بی بعد مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در حالت وجود تیغه ۸ سانتی متر



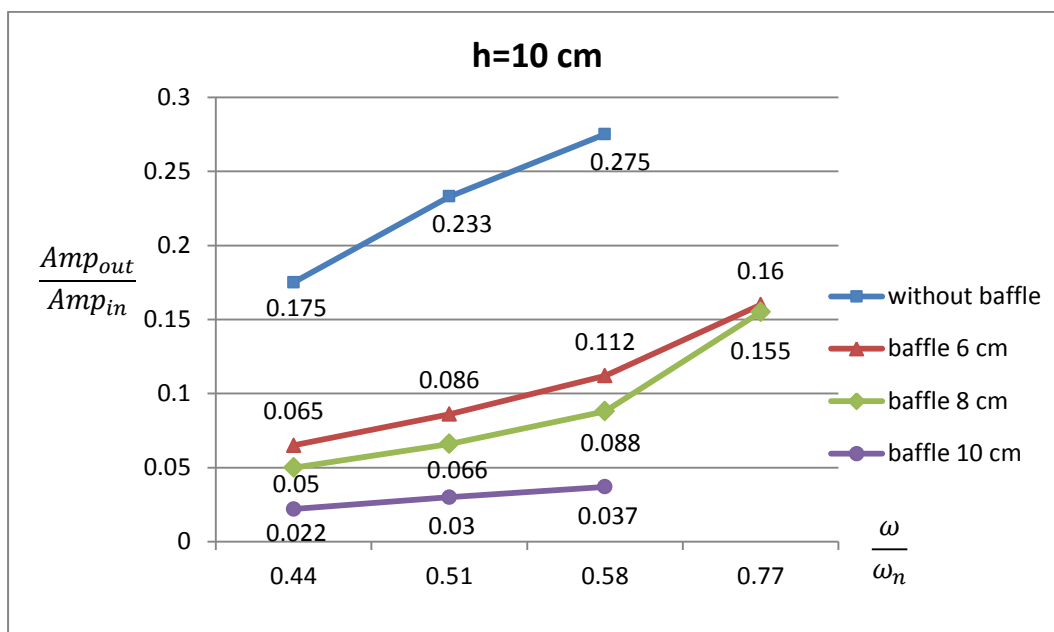
شکل (۵-۳) نمودارهای بی‌بعد مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در حالت وجود تیغه ۱۰ سانتی‌متر

## ۵-۴-۱ ترسیم نمودارهای مقایسه‌ای بی‌بعد

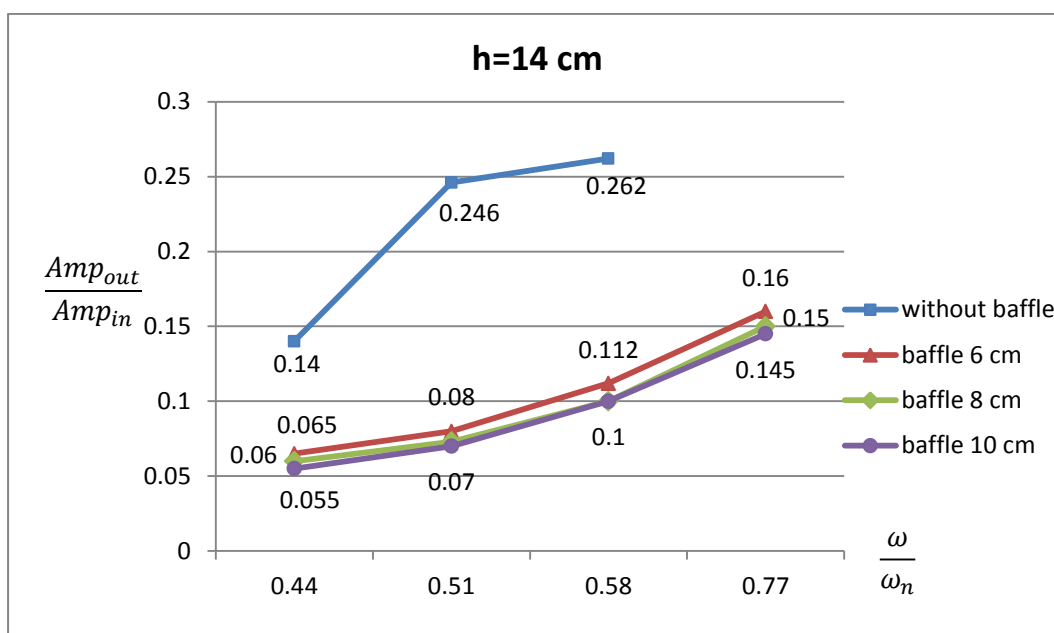
مشابه نمودارهای ارائه‌شده در اشکال (۵-۲۰) تا (۵-۲۲) که با داده‌های آزمایشگاهی ترسیم‌شده بودند، می‌توان برای بررسی حضور تیغه میرا کننده و تأثیرات تغییر ارتفاع آن، نمودارهای مقایسه‌ای را با استفاده از داده‌های عددی، ارائه کرد که در آن‌ها در یک ارتفاع ثابت مایع در مخزن، نمودار نسبت دامنه برحسب نسبت فرکانس، در حالات مختلف وجود و عدم وجود تیغه میرا کننده ترسیم می‌شود (اشکال (۵-۳۱) تا (۵-۳۳)).



شکل (۵-۳۱) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت تیغه و ارتفاع مایع ۶ سانتی‌متر

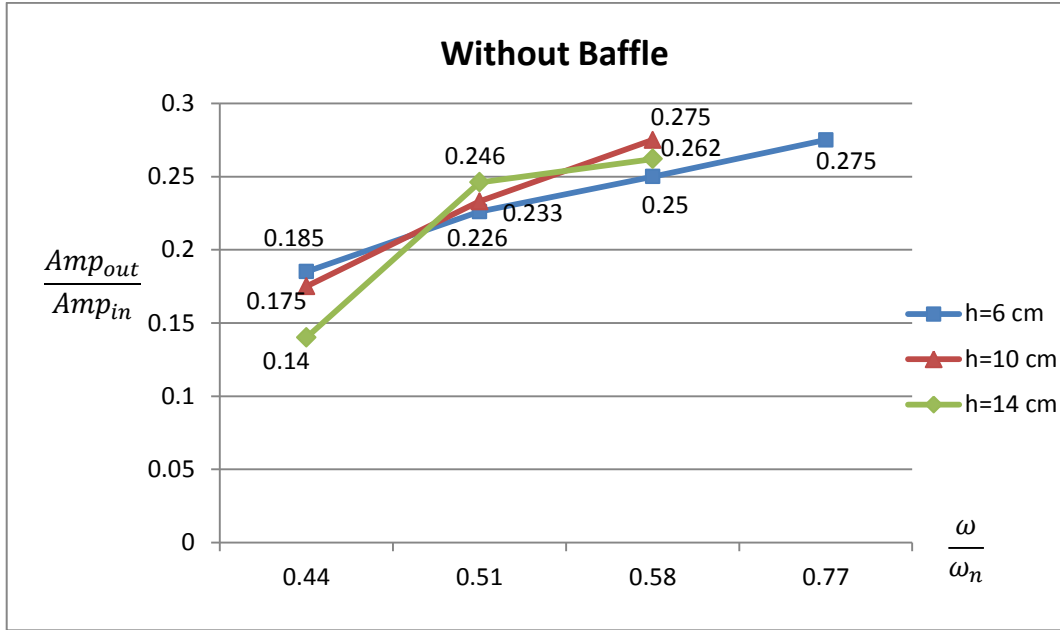


شکل (۵-۳۲) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت تیغه و ارتفاع مایع ۱۰ سانتی‌متر

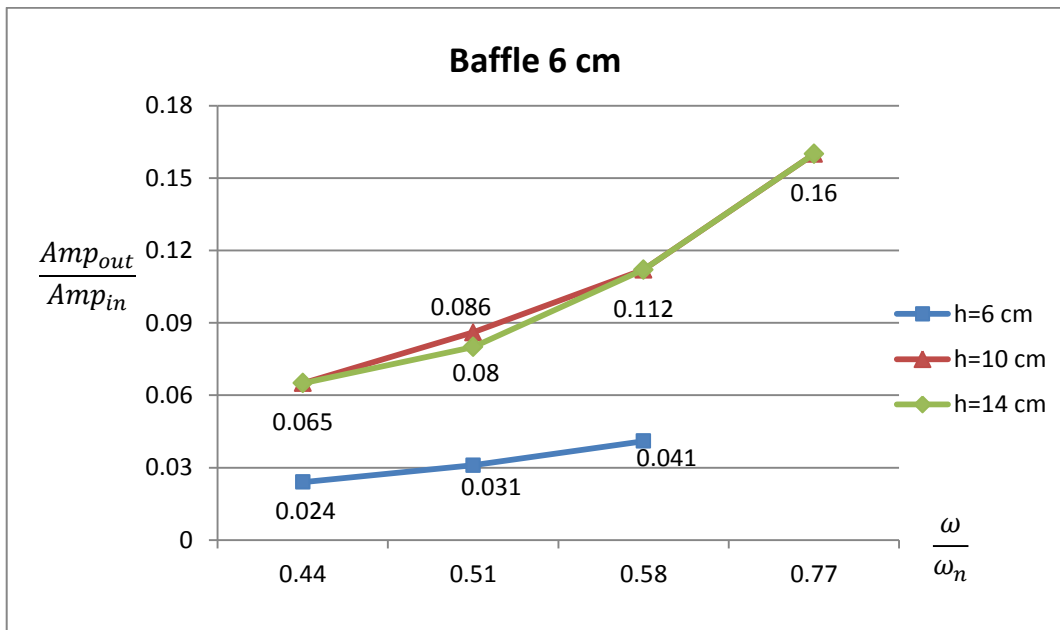


شکل (۵-۳۳) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت تیغه و ارتفاع مایع ۱۴ سانتی‌متر

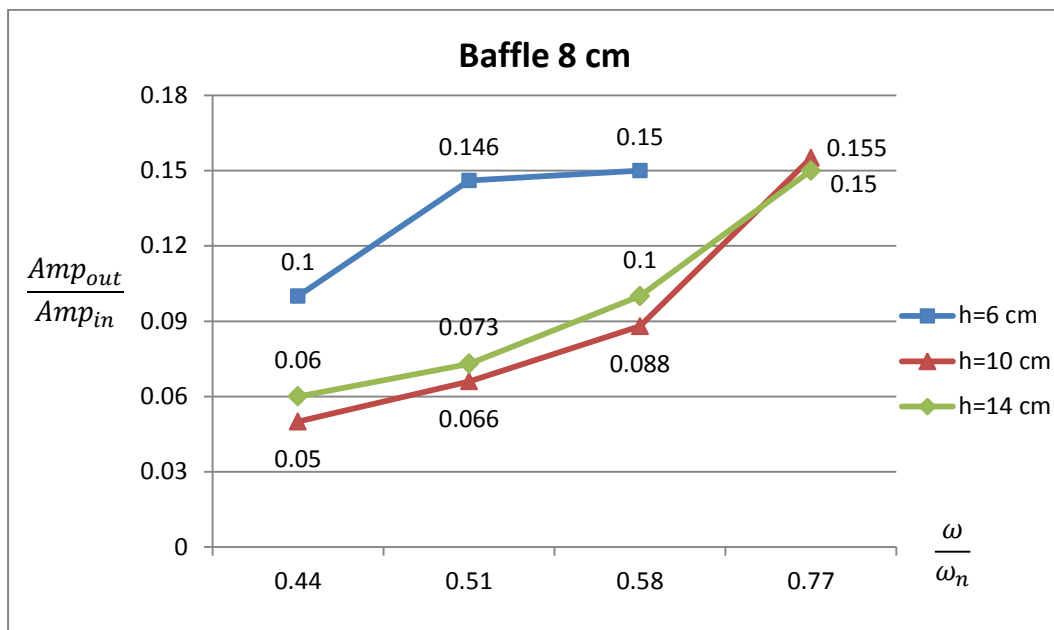
مشابه نمودارهای ارائه‌شده در اشکال (۵-۲۳) تا (۵-۲۶)، می‌توان نمودارهای مقایسه‌ای را به نحو دیگری نیز نشان داد و با در نظر گرفتن ارتفاع تیغه یکسان برای نمودار، هر نمودار مقایسه‌ای را برای ارتفاع‌های متفاوت مایع به صورت زیر ترسیم کرد و امکان مقایسه دامنه پاسخ با ارتفاع سیال در داخل مخزن ایجاد می‌شود (اشکال (۵-۳۴) تا (۵-۳۷)).



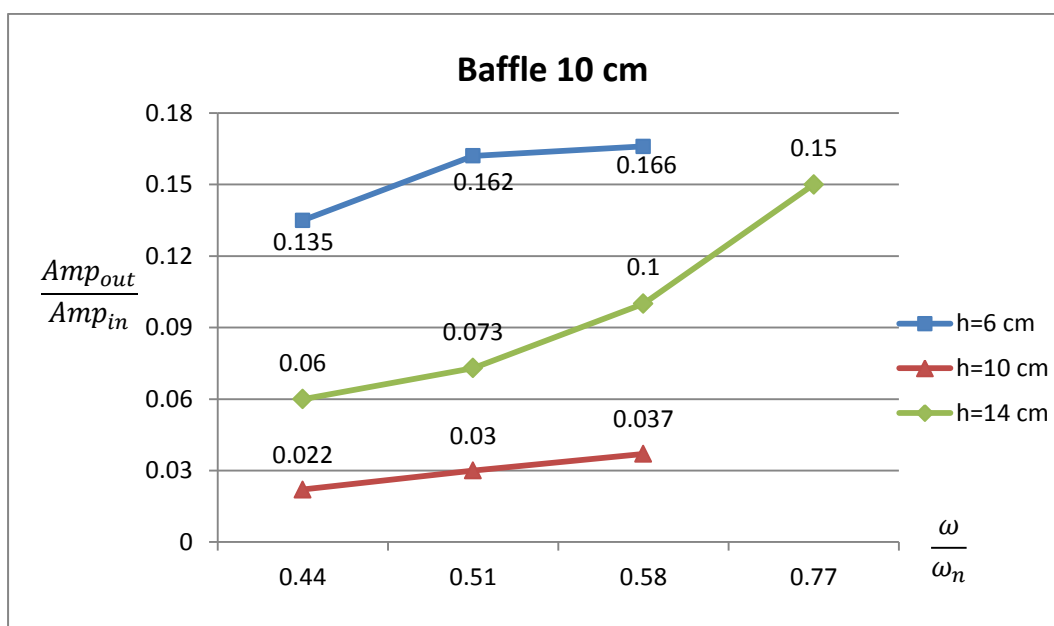
شکل (۵-۳۴) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و حالت عدم وجود تیغه میرا کننده



شکل (۵-۳۵) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و حالت وجود تیغه ۶ سانتیمتر



شکل (۳۶-۵) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و حالت وجود تیغه ۸ سانتیمتر



شکل (۳۷-۵) نمودار مقایسه‌ای بی‌بعد در ارتفاع‌های متفاوت مایع و حالت وجود تیغه ۱۰ سانتیمتر





فصل ششم

تحلیل نتایج، نتیجه گیری و پیشنهادها

هدف از انجام این پایان نامه بررسی تجربی و ارزیابی عددی فشار وارد از مایع متلاطم بر دیواره‌ی مخزن نیمه پر با تیغه میرا کننده است. همان طور که پیش تر اشاره شد، برای بررسی تجربی پدیده تلاطم و بررسی اثرات ناشی از آن، یک سیستم آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. در این سیستم آزمایشگاهی از یک مخزن مکعب مستطیلی شفاف استفاده شده است که با استفاده از یک مکانیسم مکانیکی، تحت تحریک عرضی قرار می گیرد. برای بررسی اثرات فشار ناشی از تلاطم سیال روی دیواره مخزن، از مانومتر استفاده شده است. برای این منظور برای هر یک از نقاط مورد نظر روی دیواره، یک مانومتر تعبیه شده است. با استفاده از این مانومترها امکان بررسی نحوه تغییرات فشار روی دیواره و همچنین بیشینه مقدار فشار وارد در هر نقطه مشخص می شود. نحوه انجام بررسی های آزمایشگاهی و عددی پیش تر در فصول گذشته به تفصیل توضیح داده شد. حال با توجه به داده های حاصل و نمودارهای به دست آمده، هدف این است که تأثیر عوامل مختلف روی فشار ناشی از تلاطم مایع را، مورد بررسی قرار داده و همچنین با تحلیل نمودارهای به دست آمده، نتایج به دست آمده گزارش شده است.

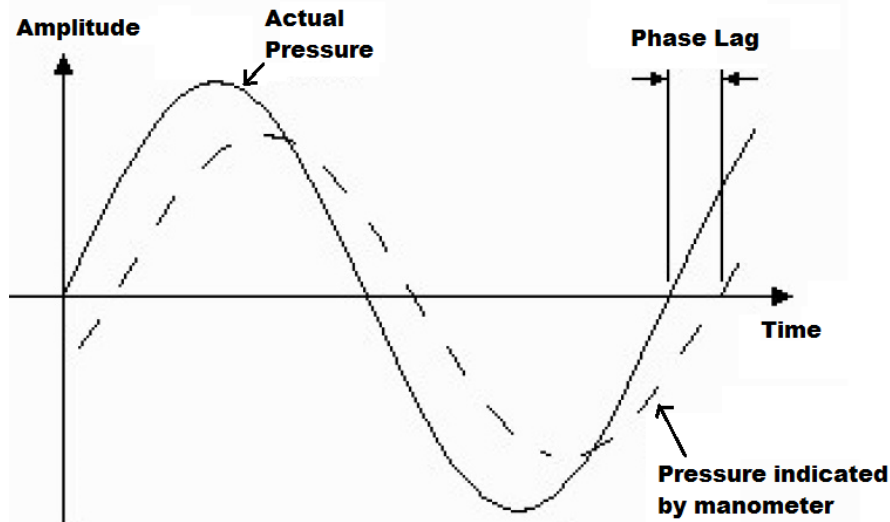
## ۶-۱ تحلیل نتایج

همان طور که در ابتدای فصل پنجم بیان شد، برای بررسی ارتباط بین تحریک و پاسخ در مانومتر یک سیستم آزمایشگاهی تک مانومتری طراحی شد. با توجه به اینکه از نتایج حاصل از سیستم آزمایشگاهی اصلی (مخزن و مانومتر)، دامنه تغییرات ارتفاع مایع روی نقاط متفاوت روی دیواره مخزن موجود است، می توان میزان مینیمم و ماکزیمم مقادیر را مشخص کرد. از طرفی فرکانس های اعمالی به مخزن در شرایط متفاوت آزمایش مشخص بود. لذا مقدار مینیمم، ماکزیمم و متوسط دامنه پاسخ به همراه مقدار مینیمم، ماکزیمم و متوسط فرکانس های اعمالی را انتخاب می شود. با انجام ۹ تست متفاوت، ارتباط بین تحریک و پاسخ به صورت میزان نسبت تفاضل دامنه ورودی و خروجی به دست می آید. با استفاده از داده های حاصل اشکال (۵-۹) تا (۵-۱۵) ترسیم شد. با بررسی این نمودارها می توان نتایج زیر را به دست آورد.

- ۱- با افزایش دامنه پاسخ در فرکانس ثابت تحریک، میزان نسبت تفاضل دامنه کاهش می‌یابد. این کاهش به این نحو است که برای مقادیر بیشتر از دامنه پاسخ متوسط، این کاهش ۲ برابر میزان کاهش برای مقادیر کمتر از دامنه پاسخ متوسط است.
- ۲- با افزایش فرکانس تحریک در مانومتر در یک دامنه پاسخ ثابت، میزان نسبت تفاضل دامنه، افزایش پیدا می‌کند. این افزایش به این نحو است که در مقادیر کمتر از فرکانس متوسط، این افزایش حدوداً  $1/6$  برابر میزان افزایش برای مقادیر بیشتر از فرکانس متوسط است.
- از طرفی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فرکانس تحریک اختلاف بین دامنه تحریک و پاسخ بیشتر می‌شود. این بدین معناست که اگر فرکانس دامنه تحریک خیلی بزرگ باشد عملاً در خروجی مانومتر، دامنه پاسخ نزدیک به صفر است. در این حالت نسبت اختلاف دامنه برابر  $0/100$  است. این مطلب را می‌توان با استفاده از خاصیت انتشار اطلاعات در سیالات نیز توجیه کرد.
- با توجه به این موارد می‌توان گفت که دقت مانومتر در فرکانس‌های تحریک بالا بسیار پایین است و مانومتر در این فرکانس‌ها قابل استفاده نیست. از طرفی زمانی که فرکانس تحریک در مانومتر کم باشد، میزان نسبت اختلاف دامنه کم بوده و با کاهش فرکانس اعمالی به‌عنوان فرکانس تحریک، مقدار نسبت تفاضل دامنه کاهش می‌یابد. زمانی که فرکانس تحریک ناچیز باشد (نزدیک به صفر)، رفتار سیال در مانومتر به حالت استاتیک نزدیک است و می‌توان برای بررسی رفتار مایع در مانومتر از روابط استاتیکی استفاده کرد.
- مشاهدات نشان می‌دهد که در تمامی موارد دامنه تحریک از دامنه پاسخ بزرگ‌تر بوده و میزان اختلاف این دو دامنه به فرکانس اعمالی ارتباط مستقیم دارد. از طرفی مشاهده رفتار سیال در مانومتر نشان می‌دهد که بین تحریک و پاسخ لگ<sup>۱</sup> زمانی وجود دارد (شکل (۶-۱)). همیشه بین ورودی و خروجی این لگ زمانی وجود دارد که باید توجه داشت در موارد متفاوت این لگ زمانی متفاوت خواهد

<sup>۱</sup>Lag

بود. به طور مثال میزان لگ زمانی بین ورودی و خروجی در یک سیستم الکترونیکی بسیار کمتر از یک سیستم مکانیکی است. مقدار لگ زمانی در آزمایش‌های انجام‌شده مقداری زیر ۰/۵ ثانیه است.



شکل (۱-۶) نمودار لگ (تأخیر) زمانی و اختلاف دامنه بین تحریک و پاسخ

با توجه به موارد ذکر شده می‌توان گفت که در صورتی که ورودی یا تحریک به صورت

$$h_1 = A_1 \sin(\omega t) \text{ باشد، خروجی یا پاسخ به صورت } h_2 = A_2 \sin(\omega(t - T_{Lag})) \text{ خواهد بود که در آن}$$

$$A_2 \leq A_1 \text{ داریم.}$$

۱-۱-۶ تغییرات دامنه پاسخ با فرکانس تحریک در ارتفاع تیغه ثابت و ارتفاع مایع ثابت

اگر به نمودارهای بی‌بعد رسم شده در اشکال (۱۶-۵) تا (۱۹-۵) توجه شود، مشاهده می‌شود که

هر یک از این نمودارها در یک ارتفاع ثابت مایع و ارتفاع ثابت تیغه رسم شده‌اند. همان‌طور که از این

نمودارها مشخص است، محور افقی نسبت فرکانس تحریک به فرکانس تشدید است. با بررسی مقدار

فرکانس تحریک در حرکت رفت و برگشتی مخزن با فرکانس پاسخ در مانومترها، می‌توان برابری این

دو را مشاهده کرد. محور عمودی برابر نسبت دامنه تغییرات ارتفاع مایع در پاسخ مانومترها به دامنه

تحریک (دامنه حرکت مخزن مکعب مستطیلی) است.

با بررسی و مشاهده این نمودارها می‌توان به نتایج زیر رسید:

۱- با افزایش فرکانس تحریک، نسبت دامنه پاسخ به دامنه تحریک افزایش پیدا می‌کند. این افزایش به این نحو است که با افزایش میزان نسبت فرکانس، شیب افزایش نسبت دامنه، بیشتر می‌شود تا در نهایت در صورت ادامه این نمودارها، در حالت نسبت فرکانس برابر یک، مقدار نسبت دامنه بین‌هایت خواهد شد.

۲- افزایش نسبت دامنه پاسخ به دامنه تحریک، ربطی به وجود و یا عدم وجود تیغه ندارد و در تمامی حالات این افزایش رخ می‌دهد. منتها این افزایش در تمامی موارد وجود تیغه میرا کننده، منظم‌تر بوده و شیب نمودار مدام در حال افزایش است؛ اما در حالت عدم وجود تیغه میرا کننده، این افزایش وجود دارد ولی شیب نمودار روند یکنواختی نداشته و در مواردی کاهش شیب مشاهده می‌شود.

برای بررسی رفتار دینامیک<sup>۱</sup> سیال در مانومتر می‌توان روابطی را نیز ارائه کرد. معادله دیفرانسیل رفتار دینامیک سیال در مانومتر را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

نیروی حاصل از شتاب مایع:

$$F_a = (\rho AL) \frac{d^2z}{dt^2} \quad (۱-۶)$$

نیروی حاصل از فشار:

$$F_s = A \Delta p \quad (۲-۶)$$

وزن مایع درون ستون مایع:

$$W = \rho gh(A) \quad (۳-۶)$$

نیروی اصطکاک سیال ناشی از ویسکوزیته مایع:

$$F_f = \rho A^2 R \frac{dz}{dt} \quad (۴-۶)$$

<sup>۱</sup> Dynamic

$$R = \frac{128\mu L}{\pi \rho d^4} \quad (5-6)$$

لذا با نوشتن رابطه نیوتون خواهیم داشت:

$$F_a = F_s - W - F_f \quad (6-6)$$

رابطه نیوتون با استفاده از رابطه‌های بالا در نهایت می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\tau^2 \frac{d^2 z}{dt^2} + 2\xi\tau \frac{dz}{dt} + z = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (7-6)$$

که در آن داریم:

$$\xi = \frac{RA}{2g\tau}, \quad \tau = \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (8-6)$$

در رابطه بالا تحریک را به صورت سینوسی در نظر می‌گیریم و خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{P_0 \sin(\omega t)}{\rho g} = \frac{\rho g H \sin(\omega t)}{\rho g} = H \sin(\omega t) \quad (9-6)$$

در رابطه بالا،  $H$  دامنه تحریک و  $\omega$  فرکانس تحریک است.

در روابط بالا کمیت  $\zeta$  نسبت میرایی نام دارد که می‌تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد که به

ازای مقادیر متفاوت آن، شرایط متفاوتی در پاسخ ایجاد می‌شود.

در حالت  $\zeta < 1$  سیستم زیر میراست<sup>۱</sup> و در این حالت پاسخ رفتار رفت و برگشتی از خود نشان

می‌دهد.

در حالت  $\zeta = 1$  سیستم در حالت میرایی بحرانی<sup>۲</sup> قرار دارد و سیستم رفتار یکنواختی از خود

نشان می‌دهد.

در حالت  $\zeta > 1$  سیستم بالا میراست<sup>۳</sup> و در این حالت نیز سیستم رفتار یکنواختی از خود

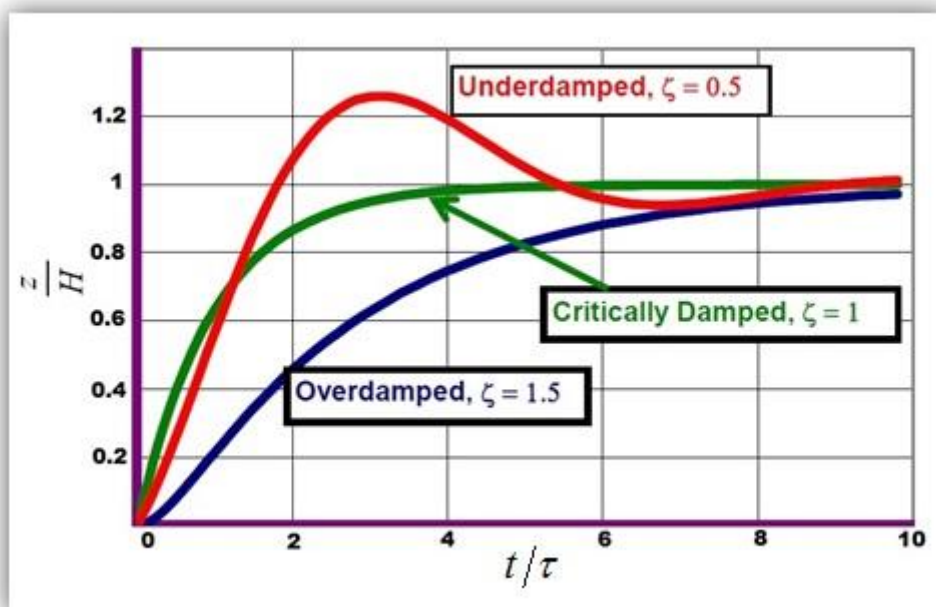
نشان می‌دهد و پاسخ با شیب ملایم به تحریک می‌رسد. نمودار تغییرات نسبت دامنه پاسخ به تحریک

<sup>1</sup> Under Damped

<sup>2</sup> Critically Damped

<sup>3</sup> Over Damped

برحسب زمان بی بعد به ازای مقادیر متفاوت  $\zeta$  در زیر نشان داده شده است.



شکل (۲-۶) نمودار بی بعد تغییرات نسبت دامنه برحسب زمان بی بعد

نمودار (۲-۶) برای حالت وجود فشار پله‌ای در یک سمت مانومتر ترسیم شده است که در آن بعد از گذر مدت زمان مشخصی، مایع درون مانومتر به حالت استاتیک می‌رسد ( $z/h = 1$ ). مشخصاً در حالت وجود تحریک سینوسی نمودار به صورت تکرارپذیر با زمان ادامه پیدا خواهد کرد. همان‌طور که در نمودار بالا مشخص است، به ازای مقادیر متفاوت  $\zeta$  شرایط متفاوتی برای رفتار سیال در مانومتر اتفاق می‌افتد. در نمونه‌ی آزمایشگاهی انجام شده، مقدار  $L$  که طول حاوی سیال مانومتر هست برابر ۲ متر و  $d$  قطر داخلی مانومترها برابر ۲ میلی‌متر است. با این شرایط مقدار  $\zeta$  برابر ۰/۴۴۷ است. با توجه به اینکه مقدار  $\zeta$  کوچک‌تر از یک است، رفتار مایع در مانومتر به صورت رفت و برگشتی خواهد بود. اگر به اشکال (۵-۱۶) تا (۵-۱۹) توجه شود، مشاهده می‌شود که نسبت دامنه‌های پاسخ به تحریک، با فرکانس، افزایش پیدا می‌کند.

با توجه به شکل (۲-۶) مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی مشابهت کامل به نتایج حاصل از حل تحلیلی دارد و با توجه به مقدار زیر ۱ برای  $\zeta$  در نمونه‌های آزمایشگاهی هم

شاهد رفتار سینوسی رفت و برگشتی برای مایع درون مانومتر خواهیم بود؛ و همان طور که در نمودار شکل (۶-۲) نشان داده شده است، در حالت  $\gamma$  کوچک تر از یک، نسبت دامنه پاسخ به تحریک با گذر زمان، افزایش می یابد تا به نقطه ماکزیمم خود برسد و دوباره جهت نمودار تغییر کرده و نسبت دامنه کاهش می یابد و این تغییرات تا زمانی که مایع به حالت استاتیک برسد ادامه دارد. شایان ذکر است که در حالت وجود تحریک سینوسی به جای تحریک پله، این نمودار با دامنه یکسان بازمان ادامه پیدا خواهد کرد.

#### ۶-۱-۲ بررسی تأثیرات حضور تیغه روی دامنه تغییرات بی بعد در ارتفاع ثابت مایع

با مقایسه نمودارهای موجود در اشکال (۵-۱۶) تا (۵-۱۹) با یکدیگر در قالب یک نمودار می توان نتایج حاصل را باهم مقایسه کرد و تأثیر حضور تیغه میرا کننده و همچنین تأثیر ارتفاع آن را، بر روی دامنه بی بعد (نسبت دامنه پاسخ به دامنه تحریک)، مشخص کرد.

برای این منظور نمودارهای بی بعد ترسیم شده را در قالب یک نمودار در ارتفاع ثابت مایع ترسیم می کنیم. با توجه به اینکه ۳ ارتفاع متفاوت مایع در داخل مخزن داریم، ۳ نمودار مقایسه ای ترسیم می شود. این نمودارها در شکل (۵-۲۰) نشان داده شده اند. با مشاهده نمودارهای مذکور، می توان نتایج زیر را گرفت.

۱- همواره بیشترین میزان تلاطم در حالت عدم وجود تیغه میرا کننده، اتفاق می افتد و دامنه تغییرات ارتفاع مایع روی نقاط متفاوت روی دیواره مخزن، در این حالت بیشتر از حالات دیگر است.

۲- وجود تیغه میرا کننده همواره تأثیر مثبت روی تأثیرات ناشی از تلاطم مایع درون مخزن داشته و در حالت وجود تیغه میرا کننده، تغییرات ارتفاع مایع روی نقاط متفاوت دیواره مخزن، کاهش می یابد. این کاهش در حالت وجود تیغه ۳۰ تا ۶۰ درصد حالت عدم وجود تیغه است. این کاهش به این نحو است که در فرکانس های پایین تر میزان کاهش ۳۰



درصد و با افزایش میزان فرکانس، میزان کاهش بیشتر شده و در فرکانس های بالاتر تا ۶۰ درصد کاهش صورت میگیرد.

۳- در حالتی که ارتفاع تیغه بیشتر از ارتفاع مایع باشد به نحوی که مایع امکان جابه جایی از یک سمت تیغه به سمت دیگر را نداشته باشد، شرایط به نحوی است که مخزن مورد نظر به دو مخزن کوچکتر تبدیل می شود (دو مخزن با طول نصف مخزن اصلی) و وجود تیغه تأثیر کمی روی تغییرات ارتفاع مایع روی نقاط مورد نظر روی دیواره مخزن، خواهد داشت. با توجه به اشکال (۵-۲۰) و (۵-۳۱) می توان نتیجه گرفت که با کاهش طول مخزن، اثرات ناشی از تلاطم کاهش پیدا خواهد کرد. مشاهدات نشان می دهد که این کاهش به این نحو است که با نصف کردن طول مخزن، میزان تأثیرات ناشی از تلاطم روی دیواره مخزن، ۲۵ تا ۳۵ درصد با توجه به فرکانس اعمالی، کاهش پیدا می کند.

۴- تأثیر حضور تیغه در حالتی که ارتفاع مایع با ارتفاع تیغه برابر باشد، ماکزیمم است و در این حالت دامنه بی بعد تغییرات ناشی از تلاطم مقدار مینیمم خود را خواهد داشت. پس بهترین حالت برای بی تأثیر کردن تأثیرات ناشی از تلاطم در حالتی است که ارتفاع مایع را برابر با ارتفاع تیغه در نظر بگیریم. میزان کاهش تلاطم و تأثیرات فشار ناشی از آن روی دیواره مخزن، در حالت وجود تیغه با ارتفاع برابر با ارتفاع مایع، به میزان ۸۷ درصد کمتر از حالت عدم وجود تیغه است که نشان دهنده تأثیر بسزای وجود تیغه با ارتفاع برابر با ارتفاع مایع است. از طرفی می توان گفت که میزان کاهش اثرات ناشی از تلاطم روی دیواره مخزن در این حالت، ۲۷ تا ۵۰ درصد بهتر از حالت وجود تیغه با ارتفاع کمتر یا بیشتر از ارتفاع مایع است.

۵- افزایش ارتفاع تیغه در حالتی که ارتفاع تیغه کمتر از ارتفاع مایع است، تأثیر زیادی روی اثرات ناشی از تلاطم نخواهد داشت ولی حضور تیغه تأثیر خوبی روی تأثیرات ناشی از تلاطم دارد. به طور مثال زمانی که ارتفاع مایع درون مخزن برابر ۱۰ سانتی متر است، حالت بهینه تیغه زمانی است که ارتفاع تیغه برابر ۱۰ سانتی متر باشد اما تغییر ارتفاع تیغه از ۶ به ۸

سانتی متر تأثیر زیادی روی تأثیرات ناشی از تلاطم ندارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاهش ارتفاع تیغه در حالتی که ارتفاع آن کمتر از ارتفاع مایع است، حداکثر ۲۰ درصد تأثیرات ناشی از تلاطم را کاهش می‌دهد.

#### ۳-۱-۶ بررسی تأثیرات ارتفاع مایع روی دامنه تغییرات بی‌بعد در ارتفاع ثابت تیغه

بررسی نمودارهای بی‌بعد به دست آمده و مقایسه آن‌ها در قالب یک نمودار برای حالاتی که ارتفاع تیغه مقداری ثابت است، این امکان را فراهم می‌کند که تأثیر ارتفاع مایع روی اثرات ناشی از تلاطم در هر مورد باهم مقایسه شود. برای این منظور با توجه به اینکه از ۳ تیغه متفاوت در بررسی تجربی این پژوهش استفاده شده است و در یک حالت تیغه میرا کننده حضور ندارد، جمعاً ۴ نمودار مقایسه‌ای ترسیم شده است که در شکل (۵-۲۱) گزارش شده است. با بررسی این نمودارها می‌توان نتایج زیر را به دست آورد.

- ۱- مشابه نمودارهای ارائه شده در شکل (۵-۲۰) در این نمودارها نیز قابل مشاهده است که حالت بهینه زمانی رخ می‌دهد که ارتفاع مایع با ارتفاع تیغه یکسان باشد.
- ۲- در حالت عدم وجود تیغه میرا کننده، میزان تلاطم‌ها با افزایش ارتفاع مایع درون مخزن، کاهش می‌یابد. این بدین معناست که به‌طور مثال میزان اثرات ناشی از تلاطم روی دیواره مخزن در حالت ارتفاع ۱۴ سانتی متر از حالت ارتفاع ۶ سانتی متر کمتر است. قابل ذکر است که باید توجه داشت میزان تلاطم سیال در مخزن در ارتفاع بیشتر مایع، کمتر بوده ولی مشخصاً به علت ارتفاع بیشتر مایع درون مخزن، در نقطه معین و مشخصی از مخزن، میزان فشار وارد بر دیواره بیشتر خواهد بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در حالت عدم وجود تیغه با دو برابر کردن ارتفاع مایع، ۲۰ تا ۳۰ درصد تأثیرات ناشی از تلاطم روی دیواره مخزن، کاهش می‌یابد.

۳- در حالت وجود تیغه میرا کننده، در حالتی که ارتفاع تیغه از ارتفاع مایع درون مخزن کمتر است، تغییرات ارتفاع مایع تأثیر زیادی روی اثرات ناشی از تلاطم ندارد و در ارتفاع متفاوت مایع (در حالتی که ارتفاع مایع بیشتر از ارتفاع تیغه است)، نتایج مشابهی به دست می‌آید.

#### ۴-۱-۶ بررسی و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی

همان‌طور که در فصل چهارم به تفصیل بیان شد، تمامی شرایط هندسی در نمونه آزمایشگاهی به همراه شرایط آزمایش، در شبیه‌سازی عددی وارد شده است و دقیقه مشابه بررسی تجربی، بررسی عددی نیز با استفاده از نرم‌افزار منبع باز OpenFOAM انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی حاصل، مورد مقایسه قرار گرفته است که در اشکال (۵-۲۲) تا (۵-۲۵) گزارش شده‌اند. با مشاهده و بررسی این نمودارها می‌توان نتایج زیر را به دست آورد.

۱- مشابه نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی، نسبت دامنه (دامنه بی‌بعد) با افزایش فرکانس، افزایش پیدا می‌کند.

۲- در حالت عدم وجود تیغه میرا کننده، اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی قابل توجه است و در این حالت استفاده از روش‌های عددی نادرست است و روش عددی در این حالت جواب نمی‌دهد.

۳- در حالت وجود تیغه میرا کننده مطابقت بسیار خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج حاصل از بررسی تجربی وجود دارد. اختلاف ناچیزی که بین این نتایج وجود دارد، با افزایش نسبت فرکانس، افزایش پیدا می‌کند.

۴- در صورتی که ارتفاع تیغه میرا کننده از ارتفاع مایع بیشتر باشد، نتایج مشابه حالت عدم وجود تیغه است و در این حالت اختلاف بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج حاصل از بررسی تجربی زیاد می‌شود.

۵- در تمامی مواردی که تیغه وجود دارد و ارتفاع تیغه میرا کننده کمتر یا مساوی ارتفاع مایع است، اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی زیر ۱۰ درصد است.

## ۲-۶ پیشنهادها

در انجام این پژوهش می توان از ابزار و تجهیزات دقیق تر و مناسب تر استفاده کرد. همچنین می توان شرایط هندسی مانومتر نظیر قطر لوله را تغییر داده و تأثیرات این تغییر را مورد بررسی قرار داد. برای مخزن حامل سیال می توان اشکال هندسی پیچیده تر در نظر گرفت و همچنین ابعاد مخزن را می توان تغییر داد؛ زیرا در مواردی صنعتی ممکن است شکل مخازن مورد استفاده پیچیده باشد و نیاز به بررسی های دقیق تر وجود داشته باشد. به طور مثال ممکن است در مخازن استوانه ای با مقطع بیضوی شرایط تلاطم با تغییر نسبت شعاع بزرگ به شعاع کوچک تغییر کند. جنس مخزن می تواند انعطاف پذیر بوده و با تلاطم مایع تغییر شکل دهد. برای حرکت مخزن و در نهایت ایجاد تلاطم در مایع داخل آن، می توان علاوه بر حرکت خطی در یک بعد، با تغییر ارتفاع مخزن نیز مایع داخل مخزن را متلاطم کرد. از طرفی حرکت هایی مشابه حرکت دورانی و چرخشی یا پاندول نیز می تواند نمونه های پیشنهادی برای حرکت مخزن شامل مایع باشد. علاوه بر حرکت های ذکر شده می توان با ایجاد لرزش در مخزن مایع داخل مخزن را متلاطم کرد که در مخازن ثابت که تحت تأثیر زلزله یا عوامل دیگر مرتعش می شوند، کاربرد فرارانی دارد. برای بررسی اثرات ناشی از تلاطم و همچنین راه های کاهش یا کنترل این اثرات، می توان از تیغه های میرا کننده با اشکال و ابعاد دیگر نیز استفاده کرد. استفاده از تیغه های تعبیه شده روی دیواره مخزن، استفاده از تیغه شناور<sup>۱</sup> در مایع و همچنین تیغه های با جنس انعطاف پذیر می تواند نمونه هایی از این موارد باشد. برای بررسی فشار ناشی از تلاطم سیال روی تیغه یا دیواره مخزن می توان از حس گرهای الکتریکی هم استفاده کرد که مشخصاً دارای هزینه بیشتری نسبت به حس گر مکانیکی تعبیه شده در این پژوهش، است.

<sup>1</sup> Float Baffle

## پیوست ۱

### مشخصه‌های موتور IEC 0034-1

ولتاژ در حالت موتوری: ۲۲۰ ولت

ولتاژ در حالت ژنراتوری: ۳۸۰ ولت

جریان در حالت موتوری: ۱/۹ آمپر

جریان در حالت ژنراتوری: ۱/۱ آمپر

سرعت چرخش: ۱۳۴۰ دور بر دقیقه

فرکانس: ۵۰ هرتز

## پیوست ۲

### مشخصه‌های اینورتر LS مدل SV004Ie5-1

از اینورتر جهت تغییر دور موتور استفاده می‌شود که اطلاعات آن در زیر آمده است.

ورودی : تک فاز با ولتاژ ۲۰۰ تا ۲۳۰ ولت و شدت جریان ۵/۵ آمپر

خروجی : سه فاز با ولتاژ صفر تا ولتاژ ورودی و شدت جریان ۲/۵ آمپر

ابعاد: ۶۸×۱۲۸×۸۵ میلی‌متر

کنترل ولتاژ و فرکانس

رنج تغییرات فرکانس خروجی: ۰/۱ تا ۲۰۰ هرتز

دارای درجه حفاظتی IP20

گشتاور قابل تغییر به صورت دستی و اتوماتیک

## پیوست ۳

### مشخصه‌های دوربین دیجیتال Fujifilm FinePix HS20

این دوربین عکاسی مجهز به لنز Super EBC Fujinon با بزرگنمایی اپتیکال ۳۰ برابر است. از ویژگی‌های این دوربین می‌توان به حسگر ۱۶ مگا پیکسلی و سیستم فیلم‌برداری Full HD و صفحه‌نمایش چرخشی ۳ اینچ اشاره کرد.

#### مشخصات عدسی:

فاصله کانونی عدسی: ۲۴ تا ۷۲۰ میلی‌متر

زوم اپتیکال: ۳۰ برابر

لرزش‌گر: دارد

فوکوس دستی و خودکار: دارد

نورسنجی: نقطه‌ای، میانگین، چندگانه، ۲۵۶ ناحیه TLT

زوم اپتیکال در حین فیلم‌برداری: دارد

#### مشخصات حسگر:

نوع حسگر: CMOS EXR

پیکسل: ۱۶ مگا پیکسل

ابعاد حسگر: ۱ در ۲ اینچ

اندازه تصویر: ۱۰۸۰×۱۹۲۰ تا ۳۴۵۶×۴۶۰۸

فرمت RAW: دارد

## فیلم برداری:

ابعاد فیلم: ۱۹۲۰×۱۰۸۰ با کیفیت Full HD

سرعت فیلم: ۳۰ فریم در هر ثانیه

## عکاسی:

حداکثر سرعت شاتر: ۱ به ۴۰۰ ثانیه

حداقل سرعت شاتر: ۳۰ ثانیه

حداقل حساسیت: ۱۰۰

حداکثر حساسیت: ۱۲۸۰۰

ایزو: خودکار، ۸۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۳۲۰۰، ۱۶۰۰ و ۱۲۸۰۰

تنظیمات وایت بالانس: خودکار، سایه، نور روز، ابری، لامپ و مهتابی

عکاسی پی در پی: دارد، با سرعت ۸ فریم در ثانیه

فلاش: داخلی با برد ۷ متر

فناوری‌های بکار رفته: تشخیص چهره، کاهش قرمزی چشم

## مانیتور:

اندازه مانیتور: ۳ اینچ چرخشی

دقت صفحه‌نمایش: ۴۶۰۰۰۰ پیکسل

چشمی: دارد

## حافظه:

نوع کارت حافظه: SD / SDHC / SDXC

کارت حافظه داخلی: ۲۰ مگابایت



مراجع

- [1]. Yan Li, Yuxing Li, Qihuilu, Wuchang wang, Bin Xie and Xichong Yu.(2015) "Sloshing resistance and gaz-liquid distribution performance in the entrance of LNG plate-fin heat exchangers" **Appl Thermal Eng**, 82:182-193.
- [2]. Zhao Y, Chen H.G.(2015) "Numerical Simulation of 3D sloshing flow in partially filled LNG tank using a coupled level-set an volume-of-fluid method" **Ocean Eng**, 104:10-30.
- [3]. Souto-Iglesias A, Delorme L,Perez-Rojas L and Abril Perez S.(2006) "Liquid moment amplitude assessment in sloshing type problems with smooth particle hydrodynamics" **Ocean Eng**, 33:1462-84
- [4]. Mitra S and Sinhamahapatra K.P.(2008) "2D simulation of fluid-structure intraction using finite element method" **Finite Elem Anal Des**, 45:52-59
- [5]. Shekari M.R, Khaji N Ahmadi M.T.(2009) "A coupled BE-FE study for evalution of seismically isolated cylindrical liquid storage tanks considering fluid-structure interaction" **J Fluids Struct**, 25:567-585
- [6]. Livaoglu R and Dogangun A. (2007) "Effect of foundation embedment on seismic behavior of elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction" **Soil Dynam Earthquake Eng**, 27:855-863
- [7]. Aliabadi S, Johnson A and Abedi J. (2003) "Camparison of finite element and pendulum models for simulation of sloshing" **Comput Fluids**, 32:535-545.
- [8]. Lloyd N, Vaiciurgis E and Langrish T.A.G. (2002) "The effect of baffle design on longitudinal liquid movement in road tankers: an experimental investigation" **Trans IChemE**, Part B, 80:181-185.
- [9]. delorme L, Colagrossi A, Souto Iglesias A, Zamora-Rodriguez R and Botia Vera E. (2009) "A set of canonical problems in sloshing, Part I:pressure field in forced rollcomparison between experimental results and SPH" **Ocean Eng**, 36:168-78
- [10]. Akkose M, Anadur S, Bayraktar A and Domannoglu A.A, (2008) "Elasto-plastic earthquake response of arch dams including fluid-structure interaction by the lagrangian approach" **Appl Math Model**, 32:2396-412.
- [11]. Liu D, Lin P. (2009) "Three-dimentional liquid sloshing in a tank with baffles" **Ocean Eng**. 36:202-212

- [12]. Popov G, Sankar S, Sankar T.S and Vatistas V.H. (1992) "Liquid sloshing in rectangular road containers" **Comput Fluids**, 21:551-69
- [13]. Lee D.H, Kim M.H, Kwon S.H, Kim J.W and Lee Y.B. (2007) "A parametric sensitivity study on LNG tank sloshing load by numerical simulations" **Ocean Eng**, 34:3-9.
- [14]. Veldman A.E.P, Gerrits J, Luppens R, Helder J.A and Vreeburg J.P.B, (2007) "The numerical simulation of liquid sloshing on board spacecraft" **J Comput Phys**, 224:82-99
- [15]. Wei W, Junfeng L and Tianshu W. (2008) "Modal analysis of liquid sloshing with different contact line boundary conditions using FEM" **J Sound Vib**, 317:739-759.
- [16]. Cheng X, Hu M and Wen J. (2008) "Dynamic characteristics of liquid sloshing in a transversely vibrating spherical tank with a spacer under low gravity" **J Hydrodynam**, Ser B.20:762-769
- [17]. Zhou Z and Huang H.(2015) "Constraint surface model for large amplitude sloshing of the space craft with multiple tank" **Acta Ast**, 111:222- 229
- [18]. Rebouillat S and Liksonov D. (2010) "Fluid-structure interaction in partially filled liquid containers: A comparative review of numerical approaches" **Comput Fluids**, 39:739-46.
- [19]. Lin D, Lin P. (2008) "A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks" **J Comput Phys**, 227:3921-39
- [20]. Akyildiz H and Unal N.E. (2006) "Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: numerical simulation and experimental validation" **Ocean Eng**, 33:2135-49
- [21]. Chen Y.G, Djidjeli K and Price W.G. (2009) "Numerical simulation of liquid sloshing phenomena in partially filled containers" **Comput Fluids**,38:830-842
- [22]. Esvaran M, Saha U.K and Maity D. (2009) "Effect of baffles on a partially filled cubic tank: numerical simulation and experimental validation" **Comput Struct**, 87:198-205

- [23]. Schotte J-S and Ohayon R. (2009) "Various modelling levels to represent internal liquid behavior in the vibration analysis of complex structures" **Comput Methods Appl Mech Eng**, 198:1913-25
- [24]. Virella J.C, Godoy L.A and Suarez L.E. (2006) "Fundamental modes of tank liquid system under horizontal motions" **Eng struct**, 28:1450-61
- [25]. Panigrahy P.K, Saha U.K and Maity D. (2009) "Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquid in baffled tanks" **Ocean Eng**, 36:213-222
- [26]. Abramson H.N, (1966) "The dynamic behavior of liquid in moving containers" **NASA Sp-106**, Southwest Research institute for the national Aeronautics and Administration.
- [27]. Abramson H.N. (1968) "Propellant Slosh Loads" NASA SP8009
- [28]. Ibrahim A.R. (2005) "Liquid Sloshing Dynamics" **Cambridge University Press**; [ISBN:9780521838856]
- [29]. Akyildiz H. (2011) "A numerical study of the effects of the vertical baffle on liquid sloshing in two-dimensional rectangular tank" **J Sound Vib**, 331:41-52
- [30]. Tsukamoto M.M, Cheng L-Y, Nishimoto K. (2011) "Analytical and numerical study of the effects of an elastically-linked body on sloshing" **Comput Fluids**, 49:1-21
- [31]. Godderidge B, Turnock S, Tan M, Earl C. (2008) "An investigation of multiphase CFD modelling of a lateral sloshing tank" **Comput Fluids**, 38:183-193
- [32]. Hasheminejad S.M, and Aghabeigi M. (2011) "Sloshing characteristics in half-full horizontal elliptical tanks with vertical baffles" **Appl Math Model**, 36:57-71
- [33]. Hasheminejad S.M, Aghabeigi M. (2011) "Transient sloshing in half-full horizontal elliptical tank under lateral excitation" **J Sound Vib**, 330:3507-25
- [34]. Wu C-H and Chen B-F, (2009) "Sloshing waves and resonance modes of fluid in a 3D tank by time-independent finite difference method" **Ocean Eng**, 36:500-510

- [35]. Faltinsen M.O and Timokha A.N. (2009) "Sloshing" Cambridge University Press, [ISBN:9780521881111]
- [36]. P.Pal, S.K.Bhattacharyya, (2010) "Sloshing in partially filled liquid containers numerical and experimental study for 2-D problems" **J Sound Vib**, 329:4466-85
- [37]. Pirker S, Aigner A, Wimmer G. (2011) "Experimental and numerical investigation of sloshing resonance phenomena in aspring-mounted rectangular tank" **Chem Eng Scien**
- [38]. Sarreshtehdari A, Shahmardan M.M, Gharayi R (2011)"The numerical simulation of liquid sloshing in partially filled tank with baffle and experimental validation"**Journal of solid and fluid mechanics**
- [39]. Marsh A, Prakash M, Semercigil E and Turan O.F. (2009) "A numerical investigation of energy dissipation with a shallow depth sloshing absorber" **Appl Math Model**
- [40]. Akyildiz H, Unal N.E, Aksoy H. (2013) "An experimental investigation of the effects of the ring baffles on liquid sloshing in a rigid cylindrical tank" **Ocean Eng**, 59:190-197
- [41]. Lakis A.A, Bursuc G and Toorani M.H. (2009) "Sloshing effect on the dynamic behavior of horizontal cylindrical shells" **Nuclear Eng Des**, 239:1193-1206
- [42]. Juang J.H, Yoon H.S, Lee C.Y, Shin S.C. (2012) "Effect of the vertical baffle height on the liquid sloshing in a three-dimensional rectangular tank" **Ocean Eng**, 44:79-89
- [43]. Souto -Iglesias A, Botia-Vera E, Martin A and Perez-Arribas F. (2011) "A set of canonical problems in sloshing part 0: Experimental setup and data processing" **Ocean Eng**, 38:1823-1830
- [44]. Naser T, Sannasiraj S.A and Sundar V. (2008) "Experimental study of liquid sloshing dynamic in a barge carrying tank" **Fluid Dynam Res**, 40:427-45
- [45]. Lu L, Jiang S.C, Zhao M, Tang G.Q. (2015) "Two-dimensional viscous numerical simulation of liquid sloshing in rectangular tank with/without baffles and comparison with potential flow solution" **Ocean Eng**, 108:662-677

- [46]. Koh C.G, Lu M, Ga M, Bai W. (2013) “Modelling of liquid sloshing with constrained floating baffle” **Computers And Str**, 122:270-279
- [47]. Maleki A, Ziaefar M. (2007) “Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles” **J Sound Vib**, 311:372-385
- [48]. Akyildiz H, Eridem U. (2005) “Experimental investigation of pressure disturbance on a rectangular tank due to the liquid sloshing” **Ocean Eng**, 32:1503-16
- [49]. Singh B.G, Singh S. (2014) “An experimental and CFD analysis of sloshing in a tanker” **Procedia Technology**, 14:490-496
- [50]. Hasheminejad S.M, Mohammadi M.M. (2010) “Effect of anti-slosh baffles on free liquid oscillations in partially filled horizontal circular tanks” **Ocean Eng**
- [51]. Cao X.Y, Ming F.R, Zhang A.M. (2014) “Sloshing in a rectangular tank based on SPH simulation” **Appl Ocean Res**, 47:241-254
- [52]. Zhao H.E, Ren-chuan Z.H.U, Gua-ping M.I.A.O. (2010) “The simulation and analysis of tank sloshing with porosity girder by multi-domain boundary element method” **J Hydrodynam**, 22:546-53
- [53]. Sigulski R. (2011) “Boundary element analysis of liquid sloshing in baffled tanks” **Eng Anal Bound Elem**, 35:978-83
- [54]. Jin H, Liu Y, Li H.J. (2014) “Experimental study on sloshing in a tank with an inner horizontal perforated plate” **Ocean Eng**, 82:75-84
- [55]. Biswal K.C, Bhattacharyya. (2010) “Dynamic response of structure coupled with liquid sloshing in laminated composite cylindrical tank with baffle” **Finite Anal Des**, 46:966-981
- [56]. Zahrai S.M, Abbasi S, Samali B, Vrcelj Z. (2011) “Experimental investigation of utilizing TLD with baffles in a scaled down 5-story benchmark building” **J Found Struct**
- [57]. Tiagarajan K.P, Rakshit D and Repalle N, (2011) “The air-water sloshing problem :Fundamental analysis and parametric studies on excitation and fill levels” **Ocean Eng**, 38:498-508
- [58]. Eslamdoost A. (2010) “Roll motion of a box and interaction with free-surface”

Project work for PHD course in CFD with open source software. **Chalmers University Of Thechnology**.

[59]. Bhattacharjee E, Halder L and Sharma R.P, (2013) "An exprimental study on tuned liquid damper for mitigation of structural response" **Advance Structural engineering** 5:3.

[۶۰]. شاهرمان م.م، سررشته‌داری ع و قرایی ر، (۱۳۹۰)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: " شبیه‌سازی عددی و تجربی مایع

متلاطم در مخزن نیمه‌پر همراه با تیغه میرا کننده " دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

## **Abstract**

Sloshing phenomenon is one of the important phenomena in the fluid mechanics that it is very applications in planing structural-fluid collection and investigate the phenomenon of sloshing is very important. Among the applications of this problem, we can pointed out LNG gas cylinders, air displacement, displacement of marine and ships, that fluid and free surface have important role in it. fluid forces in the components leads to choosing the material and suitable geometry for the equipment. Because of the phenomenon of sloshing, considerably pressure enter of the tank structure. In a lot of cases, use from baffle for decreasing slosh waves. In this paper we purpose that with experimental investigating of pressure of fluid on the tank walls, with fluid and lateraly moving force and validating results from that with the results from numerical simulating, effect of presence of baffle in this parameter, investigated and determing, optimum height of baffle for minimize pressure on the walls.

for this purpose, a partially filled rectangular tank with external laterally moving force source and different frequencies on the tank and different heights of liquid in two kind of baffle and without baffle in different heights investigated. For experimental study we made a experimental setup that in it a rectangular tank filled to certain height from fluid. By a mechanical movitation mechanism adjoin to a source of external power generation and placed under external excitation. Parameters such external frequencies on the tank from source of power generation, sway domain, fluid height on the tank and height of embedded baffle in the tank, chanches for more accurate review. Baffle is mounted in the half and bottom of tank and thickness of baffle is thin. The ratio of baffle height ( $h_b$ ) to initial liquid height ( $h$ ) has been changed in the range  $0 \leq h_b/h \leq 1.66$ . for better analysis, results of experimental fluid sloshing data in the tank with baffle validated with results of numerical simulation that good agreement reported between numerical and experimental results.

**Key Words:** Liquid sloshing, the finite volume method, Baffle, Numerical method





Shahrood University of Technology  
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering  
MSc Thesis in Master of Science in Mechanical Engineering

# **Experimental and Numerical Study of Pressure of Liquid Sloshing on the Rectangular Tank's Wall**

**By: Majid Aghamohammadi**

Supervisors:

**Dr. Ali Sarreshtehdari**

September 2016