

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
وَأَنَّ اللَّهَ بِمَا تَعْمَلُونَ لَعِينٌ



دانشکده: مهندسی مکانیک  
گروه: تبدیل انرژی

# شبیه‌سازی عددی و تجربی مایع متلاطم در مخزن نیمه پر همراه با تیغه میراکننده

دانشجو: رسول قرایی

استاد راهنما:  
دکتر محمد محسن شاه‌مردان

استاد مشاور:  
دکتر علی سررشته‌داری

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۰  
دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: مهندسی مکانیک

گروه: تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای رسول قرایی

تحت عنوان: شبیه‌سازی عددی و تجربی مایع متلاطم در مخزن نیمه پر

همراه با تیغه میراکننده

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	دکتر علی سررشته‌داری		دکتر محمد محسن شاه‌مردان

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: دکتر علی عباس‌نژاد		نام و نام خانوادگی: دکتر محمود نوروزی
			نام و نام خانوادگی: دکتر پوریا اکبرزاده
			نام و نام خانوادگی:
			نام و نام خانوادگی:

تقدیم به آنان که

دوستان دارم و دوست می دارند مرا...

# مشکر و قدردانی

نخست بر خود می دانم که پروردگار خود را شکر گویم به پاس  
لبخندهای محبت بار  
دستان یاری رسان  
و تمام آنچه را که از رحمت او دریافت کرده‌ام.  
از او می خواهم که لیاقت تشکر از استاد را بر من ارزانی کند که  
قدر استاد نکو دانستن، حیف! استاد به من یاد نداد، ...

از استاد فرهیخته جناب آقای دکتر محمد محسن شاه‌مردان

به خاطر راهنمایی‌های بی‌منتشان

از استاد فرزانه‌ام جناب آقای دکتر علی سررشته‌داری

به خاطر راهنمایی‌های بی‌دریغشان

از جناب آقای خراطها

به خاطر کمک‌های فراوانشان

کمال تشکر را دارم.

و برای این عزیزان آرزوی سربلندی و روزگاری سبز دارم.

## تعهد نامه

اینجانب **رسول قرایی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **تبدیل انرژی** دانشکده **مهندسی مکانیک** دانشگاه **صنعتی شاهرود** نویسنده پایان نامه **شبیه سازی عددی و تجربی مایع متلاطم در مخزن نیمه پر همراه با تیغه میراکننده** تحت راهنمایی **دکتر محمد محسن شاه مردان** و مشاوره **دکتر علی سررشته داری** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت های 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 اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ :

امضاء دانشجو :

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

در این پایان‌نامه، سطح آزاد مایع متلاطم تحت تاثیر تحریک عرضی در یک مخزن مستطیلی شکل همراه با ارتفاع‌های مختلف تیغه میراکننده (بافل<sup>۱</sup>) در وسط مخزن و بدون آن، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل با استفاده از مطالعه تجربی ارزیابی شده است. شبیه‌سازی عددی بر اساس روش کسر حجمی سیال<sup>۲</sup> (VOF) انجام شده است که امکان استخراج سطح آزاد را در چنین مسأله‌ای فراهم می‌سازد. در مطالعه آزمایشگاهی از دو مخزن با دیواره‌های شفاف، یکی بدون تیغه میراکننده و دیگری با تیغه 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. این وسیله مکانیکی یک حرکت متناوب عرضی برای تحریک مخزن ایجاد می‌کند. سطح آزاد مایع متلاطم در مخزن مستطیلی با تصویربرداری و استفاده از پردازش تصویر استخراج شده است.

مقایسه نتایج عددی با آزمایش‌های مشابه برای تحریک‌هایی با دامنه و فرکانس‌های متفاوت، در بیشترین و کمترین جابجایی سطح آزاد مطابقت خوبی نشان می‌دهد به نحوی که خطای نسبی برآورد شده برای تمام آزمایش‌ها کمتر از ده درصد می‌باشد. هر چند که با افزایش دامنه و فرکانس تحریک، مقدار اختلاف‌ها به علت ایجاد رفتار غیرخطی و پیچیده سطح آزاد افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** تلاطم سیال، روش کسر حجمی سیال، جابجایی سطح آزاد، تیغه میراکننده.

---

<sup>۱</sup> Baffle

<sup>۲</sup> Volume of Fluid

## لیست مقاله‌های مستخرج از پایان‌نامه

۱. سررشته‌داری ع، شاه‌مردان م.م و قرایی ر. (۱۳۹۰) "شبیه‌سازی عددی و ارزیابی تجربی تلاطم سطح آزاد مایع تحت تحریک عرضی در یک مخزن مستطیلی" **مجله علمی و پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها**. شماره ۱، دوره ۱.



## فهرست

عنوان	صفحه
۱- مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- تاریخچه.....	۸
۳-۱- تعریف مساله.....	۱۴
۴-۱- مروری بر فصل‌ها.....	۱۵
۲- روش‌های تحقیق.....	۱۶
۱-۲- دیدگاه عددی.....	۱۷
۲-۱-۱- روش هندسی مستقیم با شبکه‌های FE ، FD و FV.....	۱۷
۲-۱-۲- روش هیدرودینامیک ذره روان (SPH).....	۲۴
۲-۲- دیدگاه تجربی.....	۲۵
۳-۲- دیدگاه تحلیلی.....	۲۶
۳- مطالعه آزمایشگاهی.....	۲۷
۱-۳- ساخت مجموعه آزمایشگاهی.....	۲۸
۲-۳- روش آزمایش.....	۳۷
۳-۳- شرایط آزمایشگاهی.....	۳۹
۴-۳- پردازش تصویر.....	۳۹
۴- شبیه‌سازی محاسباتی.....	۴۱
۱-۴- نرم‌افزار OpenFOAM.....	۴۲
۲-۴- معادله‌های حاکم و ساختار حل عددی.....	۴۳
۳-۴- مدل‌سازی عددی.....	۴۸
۴-۴- رسیدن به حالت پایا.....	۵۱
۵- نتایج و تحلیل آن‌ها.....	۵۲
۱-۵- نتایج آزمایشگاهی و عددی.....	۵۳
۲-۵- تحلیل نتایج.....	۸۱
۱-۲-۵- خطای نسبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی.....	۸۲
۲-۲-۵- دامنه ثابت و فرکانس متغیر در حالت بدون تیغه.....	۸۲

۸۴	.....۳-۲-۵- دامنه ثابت و فرکانس متغیر در حالت با تیغه
۸۵	.....۴-۲-۵- فرکانس ثابت و دامنه متغیر در حالت بدون تیغه
۸۶	.....۵-۲-۵- فرکانس ثابت و دامنه متغیر در حالت با تیغه
۸۷	.....۶-۲-۵- دامنه و فرکانس ثابت و ارتفاع مایع متغیر در حالت بدون تیغه
۸۸	.....۷-۲-۵- دامنه، فرکانس و ارتفاع تیغه ثابت و ارتفاع مایع متغیر
۸۹	.....۸-۲-۵- تاثیر تیغه میراکننده (بافل) بر تلاطم
۹۱	.....۹-۲-۵- ارتفاع بهینه تیغه میراکننده
۹۳	.....۶- جمع بندی و پیشنهاد
۹۴	.....۱-۶- نتیجه گیری و جمع بندی
۹۶	.....۲-۶- پیشنهادها
۹۷	..... پیوست ۱
۹۸	..... پیوست ۲
۱۰۰	..... مراجع

## فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) تلاطم در مخازن کامیون‌های بارکش.....	۳
شکل (۲-۱) تلاطم ناشی از چرخش فضاپیما.....	۳
شکل (۳-۱) (الف) تلاطم آرام (ب) تلاطم شدید.....	۵
شکل (۱-۲) شبکه‌بندی (الف) مخزن صلب و (ب) مخزن کشسان.....	۲۱
شکل (۲-۲) (الف) شکل دقیق سطح مشترک، (ب) توزیع تابع $\alpha$ .....	۲۲
شکل (۳-۲) (الف) شکل دقیق، (ب) استفاده از المان‌های قائم.....	۲۳
شکل (۴-۲) (الف) شکل دقیق و توزیع تابع $\alpha$ ، (ب) روش SOLA، (ج) روش PLIC.....	۲۴
شکل (۵-۲) مدل کردن تلاطم با روش SPH.....	۲۵
شکل (۱-۳) طرح کلی مجموعه آزمایشگاهی.....	۲۹
شکل (۲-۳) طرح مورد نظر برای مکانیزم انتقال قدرت.....	۳۰
شکل (۳-۳) مکانیزم انتقال قدرت.....	۳۰
شکل (۴-۳) چگونگی چیدمان مکانیزم انتقال قدرت.....	۳۰
شکل (۵-۳) ایجاد سوراخ بر روی صفحه آلومینیمی.....	۳۱
شکل (۶-۳) شاتون و پین‌های اتصالی آن.....	۳۱
شکل (۷-۳) نحوه اتصال شاتون و صفحه آلومینیمی.....	۳۲
شکل (۸-۳) میز متحرک.....	۳۲
شکل (۹-۳) ریل‌های کشویی.....	۳۲
شکل (۱۰-۳) جایگاه قرارگیری مخزن.....	۳۳
شکل (۱۱-۳) نحوه اتصال شاتون با میز متحرک.....	۳۳
شکل (۱۲-۳) مخزن بدون تیغه میراکننده (با فل). شکل (۱۳-۳) مخزن با تیغه میراکننده (با فل). شکل (۱۴-۳) تیغه‌های میراکننده (با فل).	۳۴
شکل (۱۵-۳) ثابت و آب‌بند کردن سرپوش مخزن.....	۳۵
شکل (۱۶-۳) موتور DC.....	۳۵
شکل (۱۷-۳) منبع تغذیه متغیر موتور DC (اتو ترانس). شکل (۱۸-۳) اتصال پولی با موتور توسط تسمه..... شکل (۱۹-۳) پایه ساخته شده برای موتور.....	۳۶
شکل (۲۰-۳) مجموعه آزمایشگاهی.....	۳۷
شکل (۲۱-۳) آزمون تراز بودن مخزن.....	۳۷

- شکل (۳-۲۲) تعیین دامنه حرکت..... ۳۸
- شکل (۳-۲۳) استخراج سطح آزاد توسط پردازش تصویر..... ۴۰
- شکل (۴-۱) نمایش کلی حرکت‌های یک جسم شناور..... ۴۵
- شکل (۴-۲) حرکت نوسانی مخزن..... ۴۸
- شکل (۴-۳) رئوس و بلوک‌های مخزن بدون تیغه میراکننده..... ۴۹
- شکل (۴-۴) رئوس و بلوک‌های مخزن با تیغه میراکننده..... ۴۹
- شکل (۴-۵) شبکه‌بندی مخزن بدون تیغه میراکننده..... ۵۰
- شکل (۴-۶) شبکه‌بندی مخزن با تیغه میراکننده..... ۵۰
- شکل (۴-۷) مقدار باقیمانده خطا برای مایع متلاطم در کمترین دامنه و فرکانس..... ۵۱
- شکل (۵-۱) تاثیر افزایش فرکانس بر بیشینه ارتفاع مایع در حالت بدون تیغه..... ۸۳
- شکل (۵-۲) کاهش ارتفاع بیشینه مایع با افزایش فرکانس..... ۸۴
- شکل (۵-۳) تاثیر افزایش فرکانس بر بیشینه ارتفاع مایع در حالت با تیغه..... ۸۴
- شکل (۵-۴) تاثیر افزایش دامنه بر بیشینه ارتفاع مایع در حالت بدون تیغه..... ۸۵
- شکل (۵-۵) تاثیر افزایش دامنه بر بیشینه ارتفاع مایع در حالت با تیغه..... ۸۶
- شکل (۵-۶) تاثیر افزایش ارتفاع مایع بر جابجایی ارتفاع مایع در حالت بدون تیغه..... ۸۸
- شکل (۵-۷) تاثیر افزایش ارتفاع مایع بر جابجایی ارتفاع مایع در حالت با تیغه..... ۸۹
- شکل (۵-۸) تاثیر تیغه میراکننده در کاهش تلاطم..... ۹۰
- شکل (۵-۹) آشفتگی مایع داخل مخزن به دلیل حضور تیغه..... ۹۰
- شکل (۵-۱۰) تاثیر ارتفاع تیغه بر بیشینه ارتفاع مایع..... ۹۱
- شکل (۵-۱۱) تاثیر ارتفاع تیغه بر کاهش فشار هیدرواستاتیکی وارد بر دیواره مخزن..... ۹۲

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۸	جدول (۱-۲) مدل‌های عددی تلاطم.....
۳۹	جدول (۱-۳) خواص سیال‌ها.....
۴۶	جدول (۱-۴) ضرایب بکار رفته برای تامین حرکت مخزن.....
۵۴	جدول (۱-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن بدون تیغه میراکننده.....
۶۴	جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده.....
۷۸	جدول (۳-۵) بیشترین و کمترین ارتفاع مایع داخل مخزن بدون تیغه میراکننده.....
۷۹	جدول (۴-۵) بیشترین و کمترین ارتفاع مایع داخل مخزن با تیغه میراکننده.....

## فهرست علائم

$(\text{m/s}^2)$ g	شتاب گرانش
$(\text{m/s})$ U	سرعت
$(\text{kg/m}^3)$ $\rho$	چگالی
$(\text{N/m}^2)$ p	فشار
$\nabla$	اپراتور دل
$\alpha$	کسر حجمی
$\varphi$	خاصیت فیزیکی
$(\text{m}^2/\text{s})$ v	ضریب لزجت سینماتیکی
$(\text{kg/ms})$ $\mu$	ضریب لزجت دینامیکی
$(\text{N})$ $F_s$	نیروی تنش سطحی
$(\text{m})$ CofG	مختصات مرکز نوسان
$(\text{rad})$ rollAmax	بیشترین دامنه چرخش
$(\text{rad})$ rollAmin	کمترین دامنه چرخش
$(\text{m})$ heaveA	حرکت بالا و پایین
$(\text{m})$ swayA	حرکت چپ و راست
Q	ضریب میرایی
$(\text{s})$ $T_p$	زمان تناوب برای مایع
$(\text{s})$ $T_{pn}$	تناوب طبیعی مخزن
$(\text{s})$ $T_{pi}$	تناوب چرخش جریان
$(\text{s})$ $dT_i$	گام زمانی مرجع

$dT_p$	افزایش $T_p$ بر واحد $dT_i$
(Hz) $W_r$	بسامد
(rad) $ph_r$	فاز جریان برای چرخش
(rad) $ph_s$	فاز جریان برای حرکت به سمت چپ و راست
(rad) $ph_n$	فاز جریان برای حرکت به سمت بالا و پایین
(rad) rollA	دامنه چرخش
(m) T	بردار انتقال
(rad) R	کواترنیون چرخش
(m) TR	سپترنیون جابجایی

## فصل اول

### مقدمه



## 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 می‌گردد. این حرکت نوسانی که به اصطلاح تلاطم<sup>۱</sup> سیال خوانده می‌شود، در اثر تغییر عوامل موثر در آن، می‌تواند اثرات مختلفی بر سازه یا یک مخزن متحرک داشته باشد.

تلاطم سطح آزاد یکی از پدیده‌های مهم در مکانیک سیالات است که کاربرد فراوانی در طراحی مجموعه‌های سازه-سیالی دارد. به عنوان مثال نیروهای ناشی از تلاطم در طراحی مخازن و کشتی‌های حامل گاز طبیعی مایع<sup>۲</sup> (LNG) 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، فشارهای دینامیکی قابل ملاحظه‌ای بر ساختار مخزن وارد می‌سازد [۱]. به‌علاوه سر ریز شدن مخازن با سطح آزاد مایع در برخی از کاربردهای صنعتی، یک مشکل اساسی در طراحی ساختار مخازن و ظروف حاوی مایع به ویژه در حامل‌های متحرک می‌باشد.

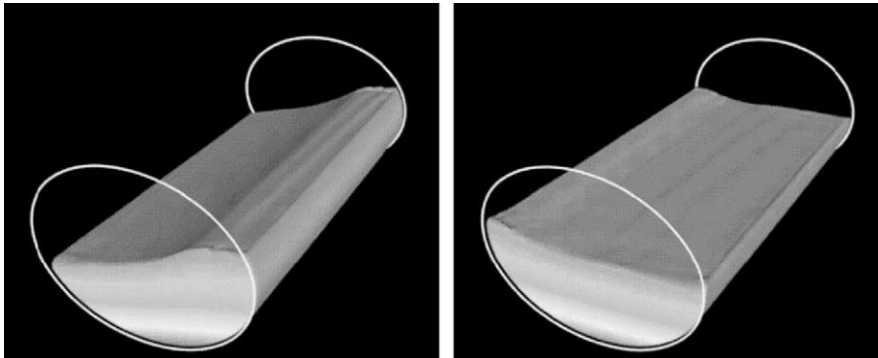
پدیده حرکت مایع در مخزن یا تلاطم آن، که گاهی اثر ضربانی مایع نامیده می‌شود، نوعی حرکت نوسانی<sup>۳</sup> است که در موارد مختلف صنعتی و کاربردی اهمیت یافته و شناخت دقیق این پدیده را حیاتی می‌سازد. از جمله موارد کاربردی که این پدیده در آن‌ها مشاهده می‌گردد می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

<sup>۱</sup> Sloshing

<sup>۲</sup> Liquefied Natural Gas

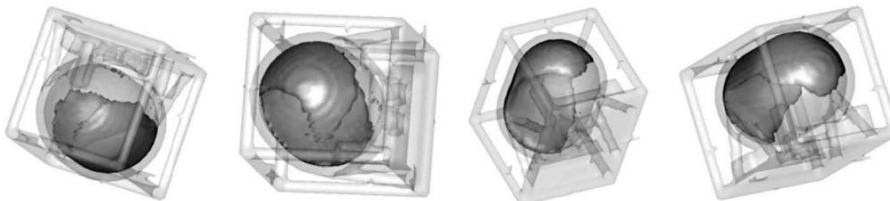
<sup>۳</sup> منظور از حرکت نوسانی همان تلاطم و حرکت حجمی مایع است که در مقاله‌ها و منابع به عنوان sloshing از آن نام برده می‌شود. در اینجا از هر دو لفظ تلاطم و حرکت نوسانی استفاده شده است. در ضمن این اصطلاح، اثر ضربانی مایع نیز ترجمه شده است.

- مخازن یا تانکرهای متحرک حامل سیال‌های مایع اعم از کامیون‌های بارکش و کشتی‌های حمل سوخت مایع [۲-۴].



شکل (۱-۱) تلاطم در مخازن کامیون‌های بارکش [۵]

- وسایل نقلیه هوایی مانند هواپیماها، موشک‌ها و ماهواره‌ها [۶-۸].



شکل (۲-۱) تلاطم ناشی از چرخش فضاپیما [۶]

- سیستم‌های 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 به کار می‌روند.
- مخازن ثابتی که تحت تحریک نوسانی قرار می‌گیرند نظیر منابع ذخیره آب، تحت زمین‌لرزه [۹-۱۱].

- صنعت خودرو و مسابقات اتومبیل رانی [۵، ۱۲، ۱۳].

- مساله شکست مانع<sup>۱</sup> که تا حدی می‌تواند به تلاطم وابسته شود [۱۴].

این پدیده از دو منظر متفاوت و در دو شاخه از علوم مطرح می‌گردد. یکی از این مباحث علم

<sup>۱</sup> Dam Break

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 هیدروالاستیسیته<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 دلیل 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 داخلی 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، اثرات این تداخل دینامیکی شدیدتر خواهد بود، 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 می‌باشد.

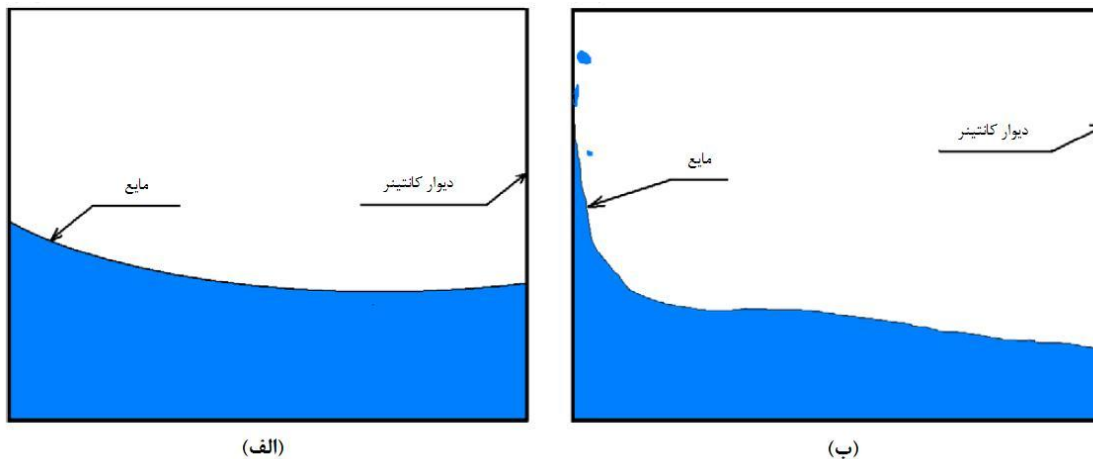
در مورد اجسام متحرکی که مخازن حامل مایع‌ها را حمل می‌کنند مساله تا حدودی متفاوت است. در این مورد، اثرات لرزش‌های الاستیک این جسم، سبب ایجاد نوعی تداخل دینامیکی بین حرکت مایع داخلی مخزن و چگونگی حرکت جسم و تغییر شکل‌های الاستیک بدنه آن خواهد شد، بنابراین مساله وجود حرکت در مایع داخلی مخازن، در طراحی سازه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

<sup>۱</sup> Hydro Dynamic

<sup>۲</sup> Hydro Elasticity

می‌باشد.

پدیده تلاطم را می‌توان از دیدگاه‌های دیگری نیز دسته‌بندی نمود، یکی از این دیدگاه‌ها که تلاطم را به دو بخش تقسیم می‌کند عبارت است از: تلاطم آرام (دامنه کوچک) و تلاطم شدید (دامنه بزرگ) که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



شکل (۱-۳) (الف) تلاطم آرام (ب) تلاطم شدید [۱۵]

به طور کلی برای تلاطم با دامنه کوچک، نتایج عددی بدست آمده در تحقیق‌ها مطابقت نسبتاً خوبی با تئوری‌های خطی دارند. همچنین با افزایش دامنه تلاطم، اختلاف بین نتایج عددی و حل‌های تحلیلی به دلیل امواج شدید غیرخطی در فرآیند تلاطم، افزایش می‌یابد [۱۶].

دیدگاه دیگری که می‌توان پدیده تلاطم را از منظر آن دسته‌بندی نمود، بررسی این پدیده در شرایط گرانشی متفاوت است. از این منظر، این پدیده به دو دسته 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 حمل و نقل مایع‌ها، کشتی‌های حمل سوخت و موشک‌های سوخت مایع که میدان گرانشی حاکم در آن‌ها برابر با شتاب گرانشی زمین و بیشتر از آن است- که در بعضی موارد تا چندین  $g$  می‌رسد- در میدان گرانشی زیاد بررسی می‌گردد. نکته مهمی که سبب این تفاوت بوده و باعث می‌گردد تا این نوع دسته‌بندی انجام شود، تاثیر جاذبه کم در تلاطم

<sup>۱</sup> Low or Micro Gravity

<sup>۲</sup> High Gravity

است، که با مشخصه‌هایی، به نحوه برخورد سیال مایع با سطح جامد ظرفی که در آن واقع شده، مرتبط می‌باشد، این مشخصه‌ها عبارتند از: نیروهای تنش سطحی، زاویه برخورد و منحنی سطح آزاد سیال، در نتیجه در چنین تحلیلی اثر نیروهای کشش سطح سیال - در مقایسه با حالت میدان گرانشی زیاد - 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 موثر، ارتفاع سیال در مخزن، میدان شتاب و حرکت اغتشاشی مخزن اشاره کرد [۱۷].

محاسبه حرکت مایع در داخل مخازن در رشته‌های مهندسی بیشماری، کاربرد پیدا کرده است [۱۸]. مخازن نیمه پر 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 یافته و باعث ایجاد فشار ضربه‌ای شدید و متمرکز بر روی دیواره‌ها و سقف مخزن می‌گردد که می‌تواند باعث خرابی مخزن شود [۱۹]. علاوه بر این، تلاطم وقتی به وسیله تشدید افزایش یابد، می‌تواند تاثیر مخربی بر پایداری وسیله حمل‌ونقل بگذارد [۲۰، ۲۱]. بنابراین بایستی پدیده تلاطم و رفتار برهم‌کنش سازه-سیال در طراحی مخازن بررسی شود. طراحی مخازن (شکل، مواد با رفتار کشسان<sup>۱</sup>، ویسکوالاستیک<sup>۲</sup> یا الاستوپلاستیک<sup>۳</sup>) می‌تواند تاثیر مهمی بر تضعیف دینامیکی امواج تلاطم داشته باشد [۹، ۱۰، ۱۴، ۲۲]. در بسیاری از موارد، تیغه‌های میراکننده (بافل) در داخل مخازن استفاده شده که در کاهش امواج تلاطم موثر بوده‌اند [۲، ۱۷، ۲۰، ۲۳].

بررسی مساله اثرهای حرکت مایع داخل مخازن در اجسام متحرک پرنده از حساسیت زیادی برخوردار است، در این موارد ظریف بودن بیش از حد سازه که به علت نیاز به کاهش وزن در این

<sup>۱</sup> Elastic

<sup>۲</sup> Viscoelastic

<sup>۳</sup> Elastoplastic

وسایل امری الزامی است، سبب کاهش سختی سازه‌ای در این مخازن می‌گردد. در نتیجه تغییر شکل-های نسبتاً بزرگتری در آنها روی می‌دهد. همچنین این اجسام اغلب مخازن بزرگی از سوخت مایع (نسبت به ابعاد وسیله حامل این مخازن) را حمل می‌کنند که این مساله عامل مهمی در تاثیر پدیده حرکت مایع درونی مخازن در عملکرد آنها است. علاوه بر این، حرکت این نوع وسایل (وسایل پرنده) اغلب همراه با شتاب‌ها، جابجایی‌ها 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 تند بادها، تغییر برنامه‌ای در وضعیت وسیله مورد نظر، پالس-های کنترلی وضعیت پایداری و ضربه‌های ناشی از جدایش جریان ایجاد گردد.

در وسایل پرنده توجه به اثر حرکت مایع درون مخازن سوخت، از نظر مساله کنترل و پایداری آن-ها، از اهمیت به سزایی برخوردار است. این امر به ویژه در موشک‌های سوخت مایع به علت بزرگی بیش از حد حجم مایع درونی آنها، همچنین شرایط محیطی بسیار متغیر که به سرعت بر این سیستم‌ها تاثیر می‌گذارند و باعث اعمال انواع فرکانس‌های تحریک بر مایع درون مخازن می‌گردند، به علاوه پایین بودن سطح پایداری آنها، به ویژه در لحظه‌های اولیه پرتاب که بالاترین حجم سوخت در موشک وجود دارد، بسیار اهمیت می‌یابد و نسبت به هواپیماها حالت بحرانی‌تری وجود دارد.

مساله حرکت مایع درونی مخازن به علت تداخل همه جانبه بین حرکت سازه محتوی مایع و تغییر شکل‌های الاستیک آن با حرکت مایع داخلی، می‌تواند بسیار پیچیده باشد. بنابراین در بسیاری از موارد می‌توان با اعمال برخی فرض‌های ساده‌کننده که در مورد مساله مورد نظر قابل طرح است تا حدودی مدل ساده‌تری به دست آورد. به عنوان مثال می‌توان مخزن حامل مایع را صلب فرض نمود.

مهمترین زمانی که اثر حرکت مایع درونی، در دینامیک حرکت سازه موثر می‌باشد، زمانی است که اولاً: فرکانس‌های تحریک مایع داخلی مخزن کوچک باشد [۲۴] (بین صفر تا حداکثر ده 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 مخازن

هنگامی که تعادل نیرویی، سطح پایینی از پایداری را برای این وسیله ایجاد کرده باشد و یا هدف، حداقل نمودن استفاده از مکانیزم‌های کنترلی<sup>۱</sup> جهت کاهش مقدار مانورهای پروازی لازم برای کنترل جسم در مسیر تعیین شده باشد الزامی می‌شود.

## ۲-۱- تاریخچه

مراجع مختلفی در حوزه بررسی تلاطم وجود دارد، به عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات آبرامسون<sup>۲</sup> [۲۵] اشاره کرد که جزو کارهای پیشرو در دیدگاه‌های تحلیلی مایع متلاطم است و پس از گذشت سال‌ها، همچنان مرجع مطالعه‌های بسیاری در این زمینه می‌باشد و 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، هر چند که محدودیت‌های زیادی در نوع تحریک مخزن، شرایط مایع و شرایط محیطی در آن وجود دارد. کارهای ابراهیم<sup>۳</sup> [۲۶] نیز به راه حل‌های تحلیلی برای یافتن معادله‌های دینامیکی مایع متلاطم جهت استخراج شکل موده‌های سطح آزاد اختصاص دارد. نمونه دیگر از این تحقیق‌ها، فعالیت‌های تحلیلی-عددی دنگ‌مینگ لیو<sup>۴</sup> و پنگژی لین<sup>۵</sup> [۱۶] است که به شبیه‌سازی سه بعدی مایع متلاطم با استفاده از روش کسر حجمی سیال (VOF) پرداخته شده است. در این مطالعه یک حل تحلیلی خطی و سه بعدی برای مایع متلاطم تحت حرکت نوسانی، توسعه یافته است. روش عددی بر خلاف حل تحلیلی موجود، برای مایع متلاطم سه بعدی و سیال لزج یا غیرلزج معتبر می‌باشد. نتایج عددی به دست آمده با حل تحلیلی، زمانی مطابق خواهند بود که دامنه تحریک خیلی کوچک باشد. وقتی دامنه تحریک زیاد گردد، تلاطم غیرخطی و اختلاف بین نتایج عددی و حل تحلیلی زیاد می‌گردد. در تحقیقی دیگر از مارکیو

<sup>۱</sup> Optimal Design of Control System

<sup>۲</sup> Abramson

<sup>۳</sup> Ibrahim

<sup>۴</sup> Dongming Liu

<sup>۵</sup> Pengzhi Lin

میچیهارو تسوکاموتو<sup>۱</sup> و همکاران [۲۷] به مطالعه تحلیلی و عددی تاثیرهای اتصال جسم کشسان بر تلاطم در داخل مخزن پرداخته شده است. دیدگاه تحلیلی بر اساس نظریه پتانسیل و دیدگاه عددی بر اساس روش ذرات متحرک نیمه ضمنی<sup>۲</sup> می باشد و در نهایت نتایج این دو دیدگاه با هم مقایسه شده است. لازم به ذکر که نظریه پتانسیل، محدودیت‌هایی را به مساله تلاطم اعمال می‌سازد. نمونه دیگر از این تحقیق‌ها، فعالیت‌های تجربی-عددی برنهارد گدریگ<sup>۳</sup> و همکاران [۲۸] است که به بررسی تلاطم عرضی مخزن نیمه پر با استفاده از مدل چند فازي ناهمگن<sup>۴</sup> پرداخته شده است. این مدل تنها با داده‌های فشار آزمایشگاهی مطابقت نسبتاً خوبی دارد. بررسی سرعت نسبی در سطح مشترک سیال تایید می‌کند که مدل ناهمگن با استفاده از برخی فرض‌ها، مدل مناسبی برای شبیه‌سازی جریان متلاطم می‌باشد. در این زمینه چن<sup>۵</sup> و همکاران [۲۹] به شبیه‌سازی عددی پدیده تلاطم در مخازن نیمه پر با استفاده از دیدگاه دو سیالی که مبنی بر روشی در حل معادله‌های ناویراستوکس رینولدز متوسط<sup>۶</sup> است و برای فازهای مایع و گاز و سطح مشترک آن‌ها مانند تغییر خواص سیال رفتار کرده و در نتیجه هیچ عمل خاصی برای توصیف سطح آزاد نیاز نیست، پرداخته شده است. مقایسه نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی حاکی از آن بوده که روش عددی مذکور تنها در شبیه‌سازی فشار دینامیکی وارد بر دیواره‌ها و سقف مخزن توسط تلاطم سیال، نسبتاً موفق بوده است. در مطالعه تجربی-عددی دیگر از چی-هوا وو<sup>۷</sup> و بنگ-فو چن<sup>۸</sup> [۳۰] به بررسی امواج تلاطم و مودهای تشدید سیال در یک مخزن مستطیلی به روش تفاضل محدود مستقل از زمان<sup>۹</sup> پرداخته شده است و برای اعتبارسنجی، نتایج بدست آمده با مطالعه‌های قبلی مقایسه گردیده است. در تحقیق‌های تجربی-

<sup>۱</sup> Marcio Michiharu Tsukamoto

<sup>۲</sup> Moving Particle Semi-implicit

<sup>۳</sup> Bernhard Godderidge

<sup>۴</sup> Inhomogeneous Multiphase Model

<sup>۵</sup> Y.G. Chen

<sup>۶</sup> Reynolds-Averaged Navier-Stokes

<sup>۷</sup> Chih-Hua Wu

<sup>۸</sup> Bang-Fuh Chen

<sup>۹</sup> Time-independed Finite Difference



عددی فالتینسن<sup>۱</sup> و تیموخا<sup>۲</sup> [۳۱] 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 به ویژه توزیع فشار ناگهانی بر روی بدنه سازه‌های مورد مطالعه، بوده است. در کار عددی و ارزیابی تجربی مایع متلاطم توسط پال<sup>۳</sup> و باتاچاریا<sup>۴</sup> [۳۲]، به بررسی رفتار تلاطم در مخازن نیمه پر با استفاده از حل معادله لاپلاس بدون نیاز به شبکه‌بندی و با شرایط مرزی خاص، برای تعیین شکل سطح آزاد پرداخته شده که اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین نتایج عددی و تجربی گزارش شده است. در مطالعه فیروزآبادی و همکاران [۳۳] با روش المان مرزی<sup>۵</sup> به بررسی تلاطم مایع در مخازن سه‌بعدی پرداخته و از جریان پتانسیل تراکم‌ناپذیر و ترم‌های پتانسیل سرعت روی سطح آزاد مایع استفاده شده است که نتایج به دست آمده نشان از قابلیت و درستی تکنیک مدل کردن کاهش مرتبه برای تحلیل تلاطم در روش مذکور دارد. هر چند که فرض جریان پتانسیل، محدودیت زیادی را در عمل به مساله تحمیل می‌سازد. در مطالعه‌ای دیگر از پیرکر<sup>۶</sup> و همکاران [۳۴] به بررسی عددی و آزمایشگاهی پدیده تلاطم در یک مخزن مستطیلی که بر روی یک سیستم فنری-کنترلی نصب شده، پرداخته شده است. برای شبیه‌سازی حرکت سطح آزاد مایع از روش کسر حجمی سیال (VOF) و برای محاسبه حرکت مخزن از دیدگاه اویلری لاگرانژی قراردادی<sup>۷</sup> استفاده شده است. در خصوص بررسی‌های عددی نیز تلاش‌های فراوانی انجام شده است که می‌توان به کارهای عددی آدام مارش<sup>۸</sup> و همکاران [۳۵] اشاره نمود که به بررسی عددی پراکنده‌سازی انرژی به وسیله یک جذب کننده تلاطم برای مایع کم عمق با استفاده از روش هیدرودینامیک ذره روان<sup>۹</sup> (SPH) پرداخته شده است.

---

<sup>۱</sup> Faltinsen

<sup>۲</sup> Timokha

<sup>۳</sup> P. Pal

<sup>۴</sup> S.K Bhattacharyya

<sup>۵</sup> Boundary Element Method

<sup>۶</sup> S. Pirker

<sup>۷</sup> Arbitrary Lagrangian Eulerian

<sup>۸</sup> Adam Marsh

<sup>۹</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics

در مطالعه عددی از لاکیس<sup>۱</sup> و همکاران [۳۶] به بررسی تاثیر 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>۲</sup> (FE)، تحلیل دینامیکی سیال و برهم‌کنش سازه-سیال بین سازه انعطاف‌پذیر و جریان غیرلزج و تراکم‌ناپذیر در این نوع مخازن صورت گرفته است. در کار عددی دیگر از تیاگاراگان<sup>۳</sup> و همکاران [۳۷] به بررسی عددی مایع متلاطم در مخزن مستطیلی پرداخته شده است. سطح مشترک بین آب و هوا با روش کسر حجمی سیال (VOF) مشخص گردیده و نتایج محاسبه‌ها تنها برای فشار برخورد با داده‌های منتشر شده در مقاله‌های قبلی مطابقت خوبی دارد. نمونه دیگر از این تحقیق‌ها، فعالیت‌های تجربی ناسار<sup>۴</sup> و همکاران [۳۸] است که به مطالعه آزمایشگاهی دینامیک مایع متلاطم در مخزنی که توسط قایق حمل می‌گردد و در معرض موج‌های منظم قرار دارد پرداخته شده است. در مطالعه تجربی سوتو ایگلسیاس<sup>۵</sup> و همکاران [۳۹] به توصیف آزمایشگاهی پدیده تلاطم و پردازش داده‌ها پرداخته شده است. در این کارها به چگونگی آزمایش، عوامل موثر در تلاطم و همچنین استخراج داده‌ها اشاره شده است. در یک تحقیق مروری توسط ربویلات<sup>۶</sup> و لیکسونو<sup>۷</sup> [۱۵] که به مساله مدل کردن برهم‌کنش سازه-سیال در مخازن نیمه‌پر اختصاص داشته است، ملاحظه می‌شود که روش‌های بکار رفته، بسیار تابع فرض‌های ساده‌کننده در جریان یا سیال متلاطم بوده، تغییر در شرایط هندسی و نوع سیال، اختلاف قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با نتایج تجربی موجود نشان می‌دهد.

در زمینه تاثیر تیغه میراکننده (بافل) در کاهش تلاطم نیز تحقیق‌هایی صورت گرفته است که به عنوان نمونه می‌توان به فعالیت‌های تجربی-عددی عباس ملکی و منصور ضیایی فر [۴۰] اشاره کرد که

<sup>۱</sup> A.A. Lakis

<sup>۲</sup> Finite Element

<sup>۳</sup> K.P. Thiagarajan

<sup>۴</sup> T. Nasar

<sup>۵</sup> A. Souto-Iglesias

<sup>۶</sup> S. Rebouillat

<sup>۷</sup> D. Liksonov

به بررسی کاهش تلاطم در مخازن استوانه‌ای با استفاده از تیغه میراکننده پرداخته شده است. با کمک حل معادله دیفرانسیل لاپلاس، تاثیر تیغه‌های حلقوی و عمودی در کاهش تلاطم در این مخازن بررسی شده و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده و این نتیجه حاصل شده است که تیغه‌های حلقوی بیشترین تاثیر را در کاهش تلاطم در اینگونه مخازن دارند. در مطالعه دیگری از اسواران<sup>۱</sup> و همکاران [۲۰] امواج تلاطم برای مخازن تیغه‌دار و بدون تیغه بر اساس روش کسر حجمی سیال تحلیل شده است. این بررسی با استفاده از روش المان محدود انجام گرفته است. نتایج به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده تا تاثیر تیغه در کاهش تلاطم سیال نشان داده شود. در مطالعه دنگمینگ لیو و پنگژی لین [۲]، به شبیه‌سازی سه بعدی سطح آزاد مایع متلاطم در یک مخزن تیغه‌دار با استفاده از روش کسر حجمی سیال پرداخته شده است. تیغه در داخل مخزن به کمک روش نیروی مرزی مجازی<sup>۲</sup> مدل شده است. نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مطابقت نسبی دارد. در فعالیت‌های تجربی-عددی هاشمی‌نژاد و آقابگی [۴۱] با استفاده از روش پتانسیل خطی<sup>۳</sup> به مطالعه مایع متلاطم در داخل یک مخزن استوانه‌ای افقی نیمه‌پر با سطح مقطع بیضی و با یک جفت تیغه سخت که به صورت افقی در کناره‌ها و در امتداد سطح آزاد مایع قرار گرفته‌اند و بدون آن‌ها، پرداخته شده است. در مطالعه‌ای دیگر از این دو [۴۲] با استفاده از همان روش به بررسی مشخصه‌های تلاطم دو بعدی در همان مخازن همراه با تیغه‌های عمودی پرداخته شده است. در این تحقیق تاثیر تیغه‌های عمودی بر روی شکل موده‌های فشار هیدرودینامیکی و جریان متلاطم بررسی شده است. تحقیق‌های تجربی-عددی این دو [۴۳] به همین جا ختم نشده و در زمینه شبیه‌سازی عددی تلاطم گذرا در مخازن استوانه‌ای که تحت تحریک عرضی قرار دارند، ادامه پیدا کرده و تاثیر نسبت ابعاد مخزن، زمان ورودی تحریک و موقعیت تیغه در داخل مخزن بر روی ویژگی‌های تلاطم بررسی شده است. در تمام تحقیق‌های این دو نفر، نتایج به دست آمده با نتایج عددی و تحلیلی موجود

<sup>۱</sup> M. Eswaran

<sup>۲</sup> Virtual Boundary Force

<sup>۳</sup> Linear Potential Theory

و داده‌های آزمایشگاهی مطابقت نسبتاً خوبی دارد هر چند که روش پتانسیل همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد محدودیت‌هایی به مساله تلاطم تحمیل می‌نماید. نمونه دیگر، تحقیق هاشمی‌نژاد و محمدی [۴۴] است که براساس نظریه پتانسیل خطی به بررسی تاثیر ارتفاع تیغه و نحوه قرار گرفتن آن و همچنین عمق مایع بر تلاطم سیال داخل مخزن استوانه‌ای افقی پرداخته، که در آن مایع تراکم‌ناپذیر و غیرلزج فرض شده است. در مطالعه بلاکروم<sup>۱</sup> و همکاران [۴۵] به مطالعه تاثیر تیغه‌ها بر تلاطم در مخازن نیمه پر با استفاده از روش المان محدود پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان از تاثیر تیغه در کاهش تلاطم دارد. در تحقیق عددی-تجربی ژاو<sup>۲</sup> و همکاران [۴۶] به شبیه‌سازی و تحلیل مایع متلاطم غیرخطی در مخازن همراه با جسم متخلخل<sup>۳</sup> با استفاده از روش المان مرزی چند دامنه-ای<sup>۴</sup> پرداخته شده است. نتایج حاصل با اعمال فرض‌هایی، با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد. در تحقیق هاگان آکیلدیز<sup>۵</sup> [۴۷] به مطالعه تاثیر تیغه عمودی بر روی رفتار غیرخطی مایع متلاطم با استفاده از روش کسر حجمی سیال و تقریب تفاضل محدود<sup>۶</sup> (FD) در مخزن مستطیلی و به صورت دو بعدی پرداخته شده است. در مطالعه‌ای دیگر از ریسزارد سیگولسکی<sup>۷</sup> [۴۸] شکل موده‌های مایع متلاطم در مخازن مستطیلی و استوانه‌ای بدون تیغه و تیغه‌دار با استفاده از روش المان مرزی بررسی شده است. مایع مورد نظر غیرلزج و تراکم‌ناپذیر و دامنه نوسان‌ها کوچک فرض شده است. در زمینه مطالعه تقابل سازه و سیال در شرایط سیال متلاطم نیز می‌توان به کارهای اخیر بیسوال<sup>۸</sup> و باتاچاریا<sup>۹</sup> [۴۹] اشاره کرد که با استفاده از روش المان محدود به بررسی برهم‌کنش مایع و تیغه کامپوزیتی مخزن پرداخته شده است. در این تحقیق مایع تراکم‌ناپذیر و غیرلزج و جریان غیرچرخشی فرض شده

<sup>۱</sup> R. Belakroum

<sup>۲</sup> H.E Zhao

<sup>۳</sup> Porose

<sup>۴</sup> Multi-domain Boundary Element Method

<sup>۵</sup> Hakan Akyildiz

<sup>۶</sup> Finite Difference

<sup>۷</sup> Ryszard Sygulski

<sup>۸</sup> K.C. Biswal

<sup>۹</sup> S.K. Bhattacharyya

است و نتایج به دست آمده نشان از تاثیر تیغه در کاهش تلاطم مایع داخل مخزن دارد. نمونه دیگر از این تحقیق‌ها، فعالیت‌های تجربی زهرایی<sup>۱</sup> و همکاران [۵۰] است که به مطالعه آزمایشگاهی تاثیر تیغه‌های قابل چرخش بر کاهش تلاطم در مخازن مستطیلی پرداخته شده است. در مطالعه عددی از می-آن کو<sup>۲</sup> و پنگزی لین [۵۱] با استفاده از روش نیروی مرزی مجازی به بررسی عددی تاثیر تیغه حلقوی بر کاهش تلاطم مایع لزج در مخازن مستطیلی پرداخته شده است.

### ۳-۱- تعریف مساله

هر چند مطالعه‌های بسیار زیادی در زمینه بررسی شبیه‌سازی مایع متلاطم و تاثیر تیغه میراکننده در کاهش تلاطم با روش‌های مختلف تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته است ولی گستردگی متغیرها و رفتار پیچیده فیزیکی، به‌ویژه در جابجایی‌های بزرگ، سبب ایجاد محدودیت‌هایی در هر یک از این روش‌ها شده است. محدود کردن معادله‌های حاکم و انجام فرض‌ها و شرایط مرزی خاص و تلاش‌هایی که در زمینه کاهش خطا در نتایج انجام شده است، منجر به عدم استخراج روشی نهایی و قابل اعمال برای کلیه مسایل با هندسه‌های مختلف و شرایط مرزی و محیطی متنوع شده است.

بر این اساس در این پایان‌نامه سطح آزاد مایع متلاطم، توسط نرم‌افزار منبع باز OpenFOAM با روش کسر حجمی سیال شبیه‌سازی شده است. اعمال شرایط مرزی و فیزیکی واقعی از جمله اعمال سیال لزج و استفاده از حداقل فرض‌ها یعنی جریان تراکم‌ناپذیر و آرام، به علاوه امکان دستیابی به سرعت بالای محاسبه‌های عددی و در نتیجه صرفه‌جویی در زمان از شاخص‌های این نرم‌افزار بوده و استخراج شکل موده‌های سطح آزاد و نقاط کمینه و بیشینه در سطح مایع را با کمترین خطا فراهم ساخته و وجه تمایز روش عددی مذکور را در مقایسه با کارهای اخیر به خوبی نشان می‌دهد. همچنین این روش امکان حل مسایل با پیچیدگی‌های هندسی بیشتر برای بررسی رفتار سطح آزاد مایع در مبحث تلاطم را مورد بررسی و تایید قرار می‌دهد.

<sup>۱</sup> Seyed Mehdi Zahrai

<sup>۲</sup> Mi-An Xue

## 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 می‌باشد.

در فصل سوم به تفصیل به مطالعه آزمایشگاهی که شامل ساخت مجموعه آزمایشگاهی، روش آزمایش، شرایط آزمایشگاهی و پردازش تصویر می‌باشد، پرداخته شده است.

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

در فصل پنجم نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده و نتایج حاصل از حل عددی ارائه و مقایسه و دقت روش عددی مورد نظر تحقیق شده است. تحلیل نتایج بدست آمده در این فصل صورت گرفته است.

در فصل پایانی (فصل ششم) به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی نتایج حاصل از بخش‌های قبلی و پیشنهادهایی برای کارهای آتی پرداخته شده است.

فصل دوم

روش‌های تحقیق

پدیده تلاطم نیز مانند دیگر پدیده‌های فیزیکی از سه جنبه قابل بررسی و تحلیل می‌باشد. این سه دیدگاه عبارتند از:

## ۲-۱- دیدگاه عددی

### ۲-۱-۱- روش هندسی مستقیم با شبکه‌های FE، FD و FV

از جمله روش‌های مدل کردن عددی مستقیم در مورد مساله تلاطم، روش المان محدود (FE)، روش تفاضل محدود (FD) و روش حجم محدود (FV)<sup>۱</sup> می‌باشد. مدل‌های دو و سه‌بعدی متنوع و زیادی توسط محققان مختلف ارائه شده که مهمترین آن‌ها در جدول (۲-۱) شرح داده شده است.

<sup>۱</sup> Finite Volume



جدول (۱-۲) مدل‌های عددی تلاطم

شماره مقاله	شکل و ابعاد مخزن	جنس مخزن	تیغه	سیال	روش	نوع سیال	شرایط مرزی	کوپلینگ	درستی نتایج	کاربرد
[۱]	مکعب مستطیلی ۰/۶۴×۰/۱۴×۰/۲۵۲ (متر)	صلب	ندارد	آب	SPH 2D	لزوج، تراکم‌پذیر، تک-فاز	مخزن نیمه‌پر، چرخش سینوسی، گرانش	-	مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد	کشتی (صنایع دریایی)
[۱۷]	مکعب مستطیلی ۰/۹۲×۰/۶۲×۰/۴۶ (متر)	صلب	صلب با اشکال مختلف	آب	FDM 3D VOF(SOLA)	همگن، ایزوتروپیک، لزج و نیوتنی	مخزن نیمه‌پر، چرخش سینوسی، گرانش	-	مطابقت اندکی با نتایج آزمایشگاهی دارد	اشاره نشده است
[۱۹]	مکعب مستطیلی (متر) ۰/۱۸×۰/۵×۰/۴ باشیب (متر) ۰/۹×۰/۶	صلب	ندارد	آب+هوا	FDM	غیر لزج، تراکم‌ناپذیر، دو فاز، ناوراستوکس، اوپلر	مخزن نیمه‌پر، چرخش سینوسی با گرانش	-	دقت قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد	کشتی‌های حمل‌کننده LNG
[۲۰]	مکعب ۰/۶×۰/۶×۰/۶ (متر)	الاستیک	الاستیک با اشکال مختلف	آب	FEM 3D VOF	غیرلزج، تراکم‌ناپذیر، تک فاز و نیوتنی	مخزن نیمه‌پر، چرخش سینوسی، گرانش	دارد	مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد	کاربردهای فراوانی ذکر شده است
[۹]	مکعب مستطیلی ۱۹/۶×۱۲/۳ (متر)	دیواره‌ها الاستیک، کف صلب	ندارد	آب	FEM 2D	سیال غیرلزج، تراکم‌پذیر، همگن	مخزن نیمه‌پر، تحریک به صورت زمین لرزه، گرانش	دارد	مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج محققان دیگر دارد	کانتینر آب آشامیدنی

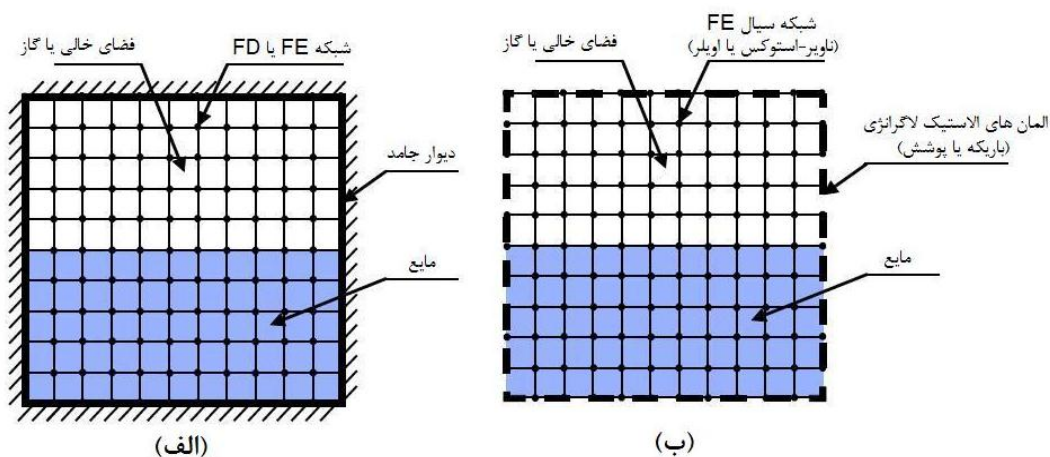
ادامه جدول (۱-۲) مدل‌های عددی تلاطم

شماره مقاله	شکل و ابعاد مخزن	جنس مخزن	تیغه	سیال	روش	نوع سیال	شرایط مرزی	کوپلینگ	درستی نتایج	کاربرد
[۱۸]	مکعب مستطیلی ۳۰×۱۳×۱۵ (متر)	صلب	دارد	اشاره نشده است	FEM 2D	غیرلزج، تراکم‌پذیر، تک‌فاز، همگن	مخزن نیمه‌پر، تحریک به صورت زمین لرزه، گرانش	-	مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج محققان برای فرکانس‌های طبیعی دارد	واکنش مخازن مایع در برابر زمین لرزه
[۳]	مکعب مستطیلی ۱/۰×۰/۶ (متر)	صلب	ندارد	آب-هوا، گاز-LNG	FDM 2D VOF	تراکم‌ناپذیر، دوفازی، لزج	مخزن نیمه‌پر، چرخش سینوسی، گرانش	-	مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد	کشتی‌های حمل کننده LNG
[۶]	قسمت استوانه ای با طولی برابر شعاع و دو سرپوش نیم کره در دو انتها، با حجم ۸۶/۹۱ (متر)	صلب	ندارد	آب	FEM 2D/3D VOF	تراکم‌ناپذیر، تک-فازی، لزج	مخزن نیمه‌پر، چرخش، بدون گرانش	دارد	با نتایج آزمایشگاهی مطابقت نسبتاً خوبی دارد	فضاپیمای FLEVO
[۵]	بیضی‌گون (متر) ۲×۱/۴ به طول (متر) ۴	صلب	ندارد	سوخت (بنزین)	FEM 3D	اشاره نشده است	مخزن نیمه‌پر، شتاب خطی (ترمز و دور زدن) با گرانش	-	مطابقت آن با مدل دیگر بستگی به شرایط دارد	وسایل حمل و نقل جاده‌ای (کامیون-های نفت کش)
[۱۳]	مکعب مستطیلی با ابعاد مختلف	صلب	ندارد	اشاره نشده است	FDM 2D	تراکم‌ناپذیر، تک-فازی، لزج	مخزن نیمه‌پر، شتاب قراردادی (شتاب سپس ترمز)، گرانش	-	مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد	وسایل حمل و نقل جاده‌ای

ادامه جدول (۱-۲) مدل‌های عددی تلاطم

شماره مقاله	شکل و ابعاد مخزن	جنس مخزن	تیغه	سیال	روش	نوع سیال	شرایط مرزی	کوپلینگ	درستی نتایج	کاربرد
[۱۶]	مکعب مستطیلی ۰/۵۷×۰/۱۵×۰/۳۱ (متر)	صلب	ندارد	آب+هوا	FDM 2D/3D VOF	هر دو مدل لزج و غیرلزج، تراکم‌ناپذیر، دوفازی، معادلات ناویراستوکس	مخزن نیمه‌پر، چرخش سینوسی با گرانش	-	مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد	کشتی (صنایع دریایی)
[۲۸]	مکعب مستطیلی ۱/۲×۰/۶ (متر)	صلب	ندارد	آب+هوا	FEM 2D	چند فازی، تراکم-پذیر، لزج	مخزن نیمه‌پر، چرخش سینوسی با گرانش	-	برای مدل غیرهمگن مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد	کشتی‌های حمل کننده LNG
[۵۲]	مکعب مستطیلی ۲×۱ (متر)	صلب	ندارد	آب	FEM 2D	تک فاز، غیرلزج	مخزن نیمه‌پر، امواج سینوسی و برآشفتگی تصادفی در دو جهت، گرانش	-	مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد	کشتی (صنایع دریایی)
[۵۳]	مکعب مستطیلی ۰/۱۸×۰/۳ (متر)	صلب+الاستیک	ندارد	آب	FEM 2D	تک فاز، تراکم‌ناپذیر، غیرلزج	مخزن نیمه‌پر، شتاب افقی موج سینوسی، گرانش	دارد	مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد	اشاره نشده است
[۵۴]	استوانه‌ای با شعاع ۰/۱ (متر) و ارتفاع‌های مختلف	صلب	ندارد	آب	FDM 2D VOF	تک فاز، تراکم‌ناپذیر، لزج	مخزن نیمه‌پر، چرخش مخزن، شتاب گرانش مختلف	-	مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد	فضا

نوعی ساختار برای حالت دو بعدی وجود دارد که در شکل (۱-۲) برای دیواره‌های صلب و کشسان نشان داده شده است.



شکل (۱-۲) شبکه‌بندی (الف) مخزن صلب و (ب) مخزن کشسان [۱۵]

مدل کردن سطح آزاد سیال در پدیده تلاطم اهمیت زیادی دارد. مدل‌های متعددی برای تقریب سطح آزاد استفاده شده است. روش کسر حجمی سیال (VOF) یکی از متداول‌ترین روش‌ها در شبیه‌سازی چنین جریان‌هایی می‌باشد [۲، ۱۶، ۲۰، ۲۸، ۵۵، ۵۶]. در این روش از حل معادله‌های انتقال برای به دست آوردن جز حجمی سیال استفاده شده و معادلات ناویلر-استوکس بر روی شبکه ثابت اویلری حل می‌گردد. این روش بطور موفقیت‌آمیزی برای طیف وسیعی از مسائل کاربردی مرتبط با سطح آزاد استفاده شده است. از آنجایی که در این پایان‌نامه از روش کسر حجمی سیال در شبیه‌سازی سطح آزاد مایع متلاطم استفاده شده است به توضیح بیشتر این روش می‌پردازیم.

این روش نسبت به روش‌های دیگر عمومیت بیشتری یافته است. در این روش بقای جرم، به طور مستقیم برای هر سیال اعمال می‌گردد. همچنین تغییرهای توپولوژی سطح مشترک مستقیماً حساب شده و هیچگونه تمهید خاصی برای شبیه‌سازی جدا شدن سطح و به هم پیوستن آن لازم نیست. این روش به راحتی قابل تعمیم به حالت سه‌بعدی می‌باشد و برای الگوریتم‌های موازی نیز کاربرد دارد.

در این روش، کسر حجمی  $\alpha$ ، برای یکی از سیال‌ها مقدار یک و برای سیال دیگر مقدار صفر را می‌پذیرد. به کمک این تابع می‌توان خواص فیزیکی سیال را در هر نقطه از دامنه حل تعریف نمود. اگر  $\phi$

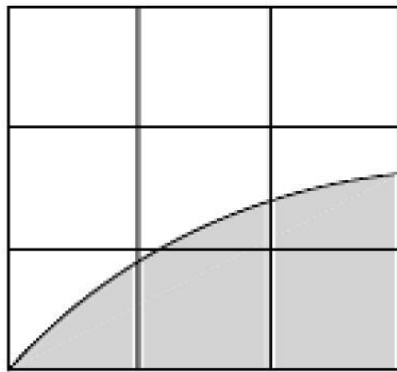
را به عنوان یک خاصیت فیزیکی مانند چگالی، لزجت و ... در نظر بگیریم برای این خاصیت در کل میدان داریم:

$$\varphi = \varphi_2 + \alpha(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1-2)$$

که اندیس  $\varphi$  نشانگر سیال مورد نظر می‌باشد. نمایش ریاضی تابع  $\alpha$  به فرم زیر می‌باشد:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{سیال یک} \\ 0 & \text{سیال دو} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{سطح مشترک} \end{cases} \quad (2-2)$$

به عبارت دیگر می‌توان گفت که  $\alpha$ ، نسبت حجم سیال یک به حجم کل سلول می‌باشد. بنابراین در سلول‌هایی که تنها سیال یک موجود می‌باشد مقدار این تابع برابر با یک و در سلول‌هایی که تنها سیال دو حضور دارد مقدارش برابر با صفر می‌باشد. پر واضح است که مقدار  $\alpha$  در سلولی که هر دو سیال موجود باشند (سطح مشترک) بین صفر و یک خواهد بود. شکل (۲-۲) به واضح‌تر شدن مساله کمک می‌کند.



(الف)

0	0	0
0	0.3	0.5
0.5	0.9	1

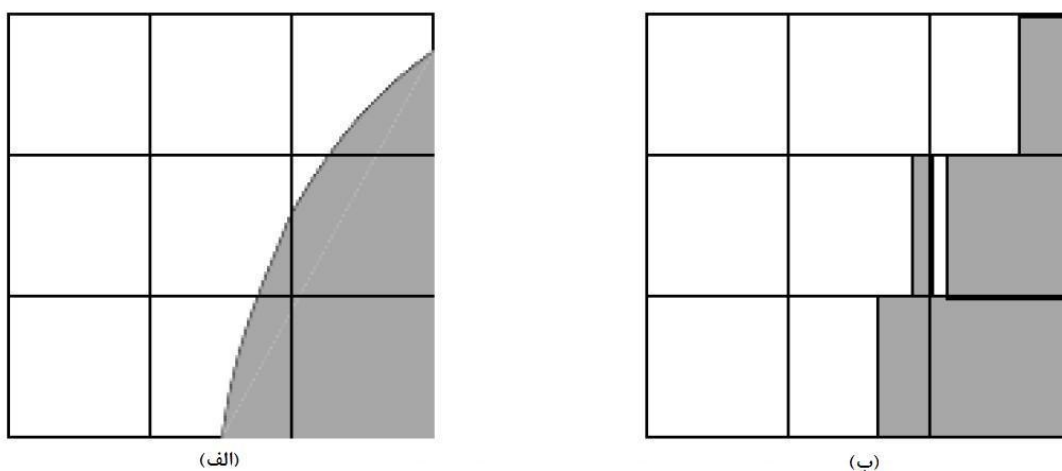
(ب)

شکل (۲-۲) (الف) شکل دقیق سطح مشترک، (ب) توزیع تابع  $\alpha$ 

در قسمت (الف) شکل (۲-۲) ناحیه تیره، سیال یک و ناحیه سفید سیال دو را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برخی از سلول‌ها شامل هر دو ناحیه سفید و تیره بوده که در حقیقت همان سطح مشترک می‌باشند. با مقایسه دو قسمت شکل (۲-۲) مشاهده می‌شود که در سلول‌هایی که مرز سطح مشترک در آن‌ها واقع است، تابع  $\alpha$  مقداری به جز صفر و یک می‌باشد. هر چه ضخامت این ناحیه کمتر باشد، پاسخ دقیق‌تری خواهیم داشت. در روش VOF، برای رسیدن به این دقت، تکنیک‌هایی در

نظر گرفته شده است. در این روش در سلول‌های ناحیه سطحی یک تقریب هندسی برای سطح در نظر گرفته می‌شود. این کار سبب می‌شود که در جابجایی  $\alpha$  در میدان حل به کمک میدان سرعت، شار عبوری از سطوح سلول با دقت بیشتری محاسبه شده و پراکندگی عددی آن کاهش یابد. بر همین اساس روش‌های مختلفی ابداع شده است که در اینجا به سیر تکاملی آن می‌پردازیم.

اولین روش، روش<sup>۱</sup> SLIC بوده که در این روش بسته به انتخاب کاربر، سطوح مشترک می‌توانند تنها به صورت افقی یا عمودی باشند. این روش در شکل (۲-۳) مشاهده می‌گردد.



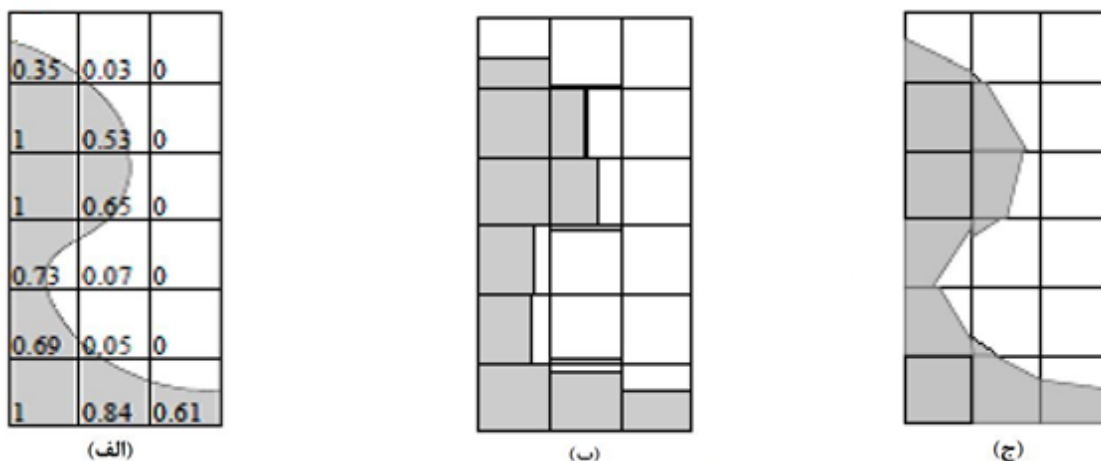
شکل (۲-۳) (الف) شکل دقیق، (ب) استفاده از المان‌های قائم

در روش<sup>۲</sup> SOLA، سطح مشترک در هر سلول بسته به مقدار گرادیان  $\alpha$  در آن سلول می‌تواند افقی یا عمودی باشد (شکل (۲-۴) (ب)). روش دیگری به نام<sup>۳</sup> PLIC در این زمینه موجود است که سطح مشترک در هر سلول با استفاده از یک خط شیبدار تقریب زده می‌شود. همانطور که انتظار می‌رود دقت این روش از روش‌های قبلی بیشتر و سطح مشترک به سطح مشترک واقعی نزدیک‌تر است. شکل (۲-۴) این واقعیت را به خوبی نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Simplified Line Interface Calculation

<sup>۲</sup> Solution Algorithm

<sup>۳</sup> Piece-wise Linear Interface Calculation

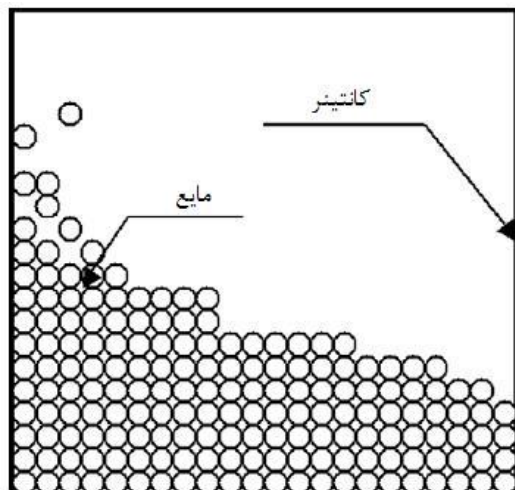


شکل (۲-۴) (الف) شکل دقیق و توزیع تابع  $\alpha$ ، (ب) روش SOLA، (ج) روش PLIC

### ۲-۱-۲- روش هیدرودینامیک ذره روان (SPH)

یک روش لاگرانژی است که برای مدل‌سازی جریان سطح سیال و انتقال حرارت به کار می‌رود و به جای استفاده از شبکه‌های ثابت اویلری، محیط سیال با ذراتی تقریب زده می‌شود که براحتی قادر به حرکت می‌باشند (شکل (۲-۵)). در واقع ذرات ذکر شده، صرفاً نقاط متحرکی می‌باشند که خواص فیزیکی سیال نظیر دما، آنتالپی، چگالی و ... را با خود حمل می‌کنند. مزیت این روش در هنگام سر و کار داشتن با سطح آزاد می‌باشد. در واقع مشکلات سطح آزاد در روش<sup>۱</sup> SPH وجود ندارد زیرا ذرات به طور ضمنی در موقعیت سطح آزاد معرفی شده‌اند [۱]. این روش ارائه شده، نتایج خوبی در جمله‌های نیروهای محلی و گشتاورها داشته و بخوبی با مدل کردن جریان‌های سطح آزاد با ذرات زیاد منطبق است [۴].

<sup>۱</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics



شکل (۲-۵) مدل کردن تلاطم با روش SPH

مزایای عمده روش SPH برای مدل‌سازی اینگونه جریان‌ها در کاربردهای صنعتی عبارت است از:

۱. سطح آزاد با اشکال بسیار پیچیده و رفتار سطح مشترک مواد، به طور طبیعی و به راحتی مدل‌سازی می‌شود.

۲. استفاده از چهارچوب لاگرانژی به معنی حذف جمله‌های غیرخطی در معادله ممنتوم است، بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که مسائل درگیر با انتقال ممنتوم غالباً به راحتی با این روش قابل حل است.

۳. فیزیک‌های پیچیده نظیر مسائل چند فازی، معادله حالت واقعی، تراکم‌پذیری، انجماد و جریان در محیط متخلخل براحتی مدل‌سازی می‌شود.

## ۲-۲- دیدگاه تجربی

روش دیگر استفاده از آزمایش‌های تجربی به اشکال مختلف است که در فصل سوم به بررسی این روش می‌پردازیم.

<sup>۱</sup> Momentum Dominated



## ۲-۳- دیدگاه تحلیلی

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. با افزایش دامنه تحریک، به ویژه در نزدیکی تشدید، جریان متلاطم بشدت غیرخطی می‌گردد. در این حالت روش تحلیلی بشدت مشکل بوده و تاثیرهای آشفتگی و لزجت رعایت نمی‌گردد [۱۶]. بنابراین روش تحلیلی فقط در مورد امواج تلاطم آرام و کوچک قابل اجراست.

پدیده تلاطم را می‌توان از نظر مواد نیز ارزیابی نمود. منظور از مواد، جنس و ساختار مخزن و تیغه میراکننده است که می‌تواند صلب یا کشسان باشد. هندسه مخزن نیز می‌تواند به صورت ساده (مستطیلی) یا پیچیده مطرح گردد. همچنین سیال می‌تواند تراکم‌پذیر یا تراکم‌ناپذیر، لزج یا غیرلزج فرض شود.

فصل سوم

مطالعه آزمایشگاهی

برای آشنایی اولیه با موضوع تلاطم آزمایش‌هایی در نظر گرفته شد که فقط جنبه مشاهده و تفهیم این پدیده را دارد. این آزمایش‌ها شامل موارد زیر می‌باشد:

#### ۱. نوسان عرضی:

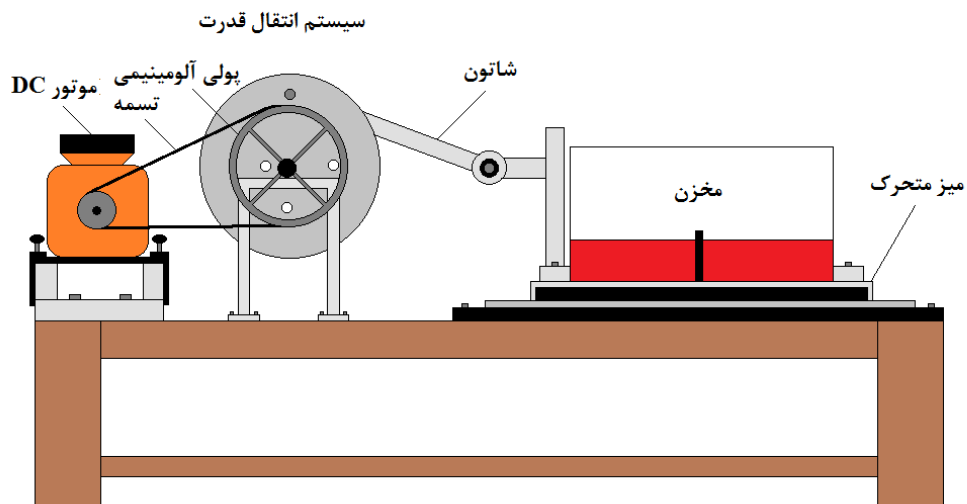
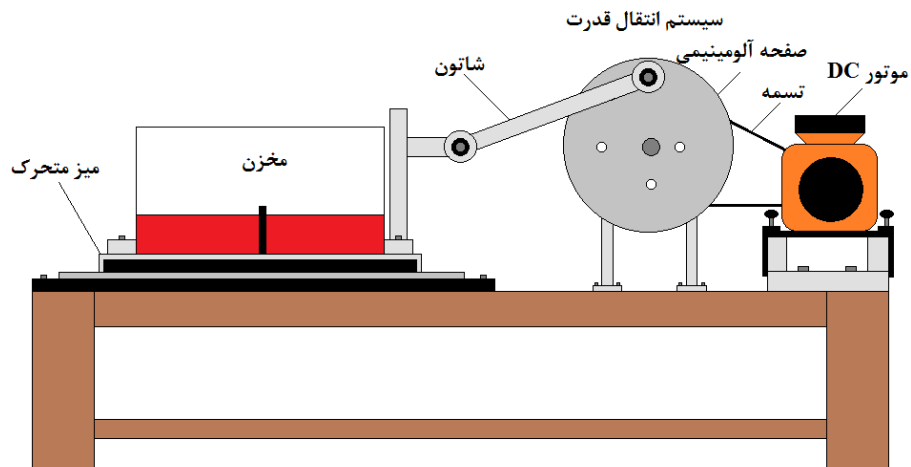
این آزمایش همانند آزمایش پاندول می‌باشد، بدین صورت که ظرفی را با طناب، آویزان و نیرویی به آن وارد می‌کنیم. ظرف به نوسان در آمده و مایع درون ظرف متلاطم می‌گردد. این آزمایش را می‌توان به روش‌های دیگر نیز انجام داد، مثلاً ظرف را بر روی تابی محکم کرده، تاب را به حرکت درآورد، این آزمایش نتیجه‌ای مشابه حالت قبل دارد. در این آزمایش نیروی وارد بر ظرف باعث ایجاد نوسان‌های عرضی در ظرف خواهد شد. نیرو به صورت افقی به ظرف وارد می‌گردد.

#### ۲. نوسان طولی:

در این آزمایش ظرف آب را بر روی یک ماشین لباس‌شویی قدیمی در حال کار قرار داده، آب درون ظرف همراه با حرکت ماشین شروع به نوسان می‌کند. در این آزمایش نیروی وارد بر ظرف باعث ایجاد نوسان‌های طولی در ظرف می‌شود. نیرو به صورت عمودی به ظرف وارد می‌گردد.

### ۳-۱- ساخت مجموعه آزمایشگاهی

در این پایان‌نامه نوسان‌های عرضی مد نظر است، برای این منظور به وسیله‌ای نیاز است که نیرو را به صورت افقی وارد کند. طرح کلی که برای این مجموعه آزمایشگاهی در نظر گرفته شد مطابق شکل (۳-۱) می‌باشد.

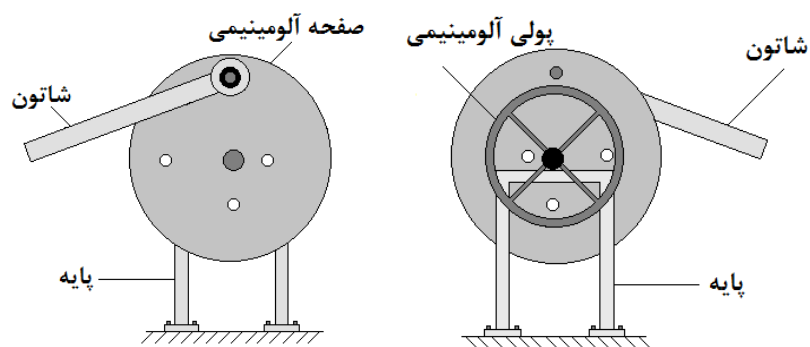


شکل (۳-۱) طرح کلی مجموعه آزمایشگاهی

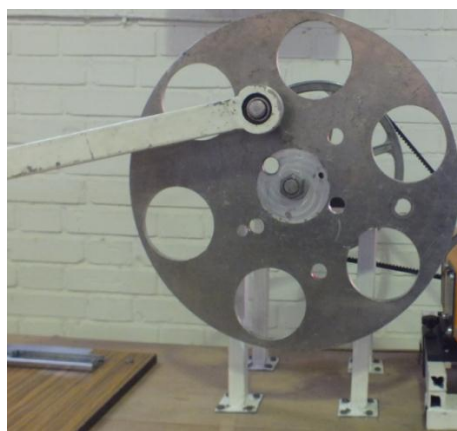
با بررسی مکانیزم‌های انتقال قدرت از مکانیزم میل‌لنگ استفاده شد تا این مکانیزم حرکت دورانی موتور را به حرکت رفت و برگشتی تبدیل کرده و همچنین دامنه‌های حرکتی مختلف برای حرکت مخزن فراهم نماید.

نقشه‌ای برای این مکانیزم، طراحی گردید (شکل (۳-۲)) که مطابق با آن، وسیله ساخته شد (شکل

(۳-۳)).



شکل (۲-۳) طرح مورد نظر برای مکانیزم انتقال قدرت



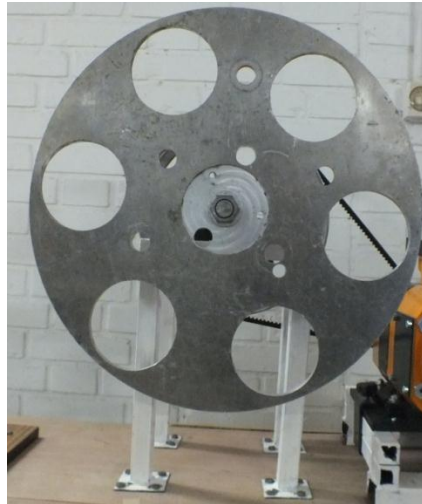
شکل (۳-۳) مکانیزم انتقال قدرت

برای ساخت این وسیله از یک میله آهنی توپر استفاده شد که در یک طرف آن پولی آلومینیمی و در طرف دیگر آن صفحه دایره‌ای از جنس آلومینیم نصب گردید. علت انتخاب جنس آلومینیم به دلیل سبک بودن و در عین حال استحکام بالای آن در برابر نیروهای دینامیکی می‌باشد. میله به کمک دو یاتاقان بر روی پایه‌ای که به همین منظور طراحی شده نصب می‌گردد. جنس این پایه از آهن انتخاب گردید. (شکل (۴-۳))



شکل (۴-۳) چگونگی چیدمان مکانیزم انتقال قدرت

بر روی صفحه آلومینیمی سوراخ‌هایی در فواصل مختلف از مرکز آن ایجاد گردید به طوری که امکان نصب شاتون را در هر یک از این سوراخ‌ها برای ایجاد دامنه‌های حرکتی مختلف مخزن میسر سازد. (شکل (۳-۵))



شکل (۳-۵) ایجاد سوراخ بر روی صفحه آلومینیمی

برای ساخت شاتون از صفحه آهنی توخالی (قوطی) استفاده شد تا علاوه بر مقاومت بالا در برابر بارهای دینامیکی، سبک نیز باشد و وزن آن بر روی حرکت دورانی صفحه آلومینیمی تاثیر چندانی نگذارد. لازم به ذکر است برای این که شاتون به راحتی همراه با صفحه آلومینیمی دوران کند و در واقع حرکت دورانی موتور را به حرکت رفت و برگشتی تبدیل نماید، بر روی شاتون، بلبرینگ نصب گردید (شکل (۳-۶)). پین آهنی از یک سمت در یکی از سوراخ‌های صفحه آلومینیمی به وسیله مهره، محکم گردیده و از سمت دیگر در داخل بلبرینگ شاتون قرار گرفته و شاتون با آسانی با صفحه می-چرخد (شکل (۳-۷)).



شکل (۳-۶) شاتون و پین‌های اتصالی آن



شکل (۷-۳) نحوه اتصال شاتون و صفحه آلومینیومی

هنگامی که پولی آلومینیومی دوران کند، صفحه آلومینیومی نیز چرخیده و شاتون حرکت دورانی موتور را به حرکت رفت و برگشتی تبدیل می‌کند.

در مرحله بعدی به راه‌کاری برای وارد کردن نیرو به مخزن نیاز است. برای این کار یک میز متحرک از جنس MDF طراحی شد که شامل یک صفحه ثابت و یک صفحه متحرک می‌باشد (شکل (۸-۳)) و توسط چهار ریل کشویی (شکل (۹-۳))، قابلیت رفت و برگشت دارد.



شکل (۸-۳) میز متحرک



شکل (۹-۳) ریل‌های کشویی

از آنجایی که جنس این میز متحرک از MDF است و در حرکت نوسانی، فشار دینامیکی زیادی بر آن اعمال می‌گردد و احتمال شکست آن زیاد است، این میز توسط ورقه‌های آهنی پشتیبانی شد. جایگاه قرارگیری مخزن نیز بر روی این ورقه‌های آهنی طراحی گردید (شکل (۳-۱۰)).



شکل (۳-۱۰) جایگاه قرارگیری مخزن

نحوه اتصال شاتون با میز متحرک نیز مانند اتصال صفحه آلومینیمی با شاتون می‌باشد که پیشتر

توضیح داده شد (شکل (۳-۱۱)).



شکل (۳-۱۱) نحوه اتصال شاتون با میز متحرک

بعد از ساخت این مجموعه نوبت به ساخت مخزن رسید. برای ساخت مخزن از صفحه‌های پلکسی با ضخامت ده میلیمتر استفاده شد تا علاوه بر شفافیت، در برابر نیروهای دینامیکی و ضربه مقاومت بالایی داشته باشد. برای این کار آزمایشگاهی، دو مخزن مشابه طراحی گردید.



یک مخزن بدون تیغه میراکننده (شکل (۳-۱۲)) و دیگری با تیغه که قابلیت تعویض آن نیز وجود دارد (شکل (۳-۱۳)).



شکل (۳-۱۲) مخزن بدون تیغه میراکننده (بافل)



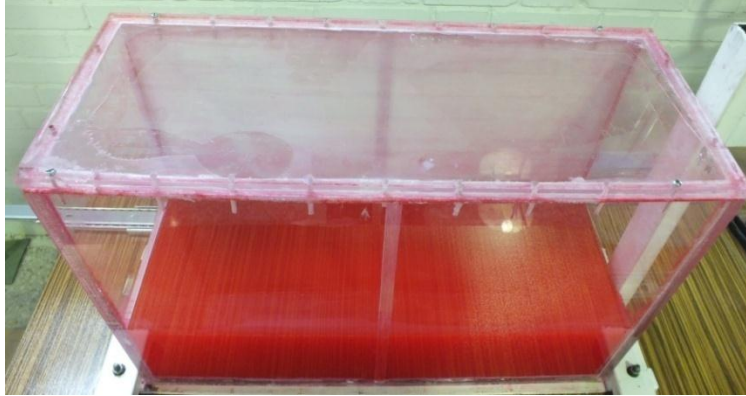
شکل (۳-۱۳) مخزن با تیغه میراکننده (بافل)

ابعاد هر دو مخزن  $31 \times 20 \times 49/5$  سانتیمتر می باشد. ارتفاع تیغه‌های میراکننده به ترتیب ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتیمتر لحاظ گردید (شکل (۳-۱۴)). لازم به ذکر است جنس این تیغه‌ها نیز از پلکسی می باشد.



شکل (۳-۱۴) تیغه‌های میراکننده (بافل)

سرپوش این مخزن‌ها با پیچ در روی بدنه کاملاً محکم شده و برای آب‌بند کردن آن از صفحه‌های پلاستیکی استفاده شده است (شکل (۳-۱۵)).



شکل (۳-۱۵) ثابت و آب‌بند کردن سرپوش مخزن

ویژگی‌های وسیله ساخته شده تا این مرحله، مربوط به مکانیزم انتقال قدرت، میز متحرک و مخزن در مجموعه آزمایشگاهی می‌باشد. برای راه انداختن این مجموعه از موتور جریان مستقیم (DC) استفاده شد (شکل (۳-۱۶)) که مشخصه‌های آن در پیوست ۱ موجود است.



شکل (۳-۱۶) موتور DC

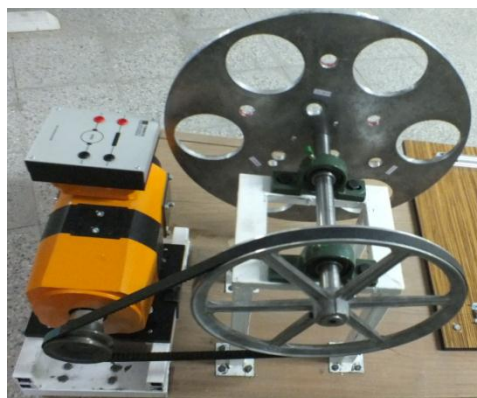
برای تخمین توان موتور مورد نیاز، با استفاده از نیروسنج، بیشترین نیروی لازم برای حرکت مخزن را به دست آورده و با توجه به بیشترین دامنه و فرکانس حرکت مخزن (کمترین دوره تناوب حرکت مخزن)، توان موتور را حساب کرده و برای اطمینان توان به دست آمده را پنج برابر کردیم. از این طریق موتور DC با توان ۴۰۰ وات برای انجام این آزمایش‌ها انتخاب گردید. لازم به ذکر است DC بودن موتور این امکان را می‌دهد تا با تغییر ولتاژ دو سر آن، دور موتور را تنظیم کرده و به فرکانس

حرکتی دلخواه خود دست یابیم که این امر توسط اتو ترانس (شکل (۳-۱۷)) محقق گردید.



شکل (۳-۱۷) منبع تغذیه متغیر موتور DC (اتو ترانس)

موتور به وسیله تسمه به سیستم انتقال قدرت متصل گردید (شکل (۳-۱۸)). لازم به ذکر است برای اینکه شیار پولی موتور و پولی آلومینیمی در یک راستا قرار گیرد، پایه‌ای از جنس آهن برای موتور طراحی شد تا موتور به صورت کشویی بر روی پایه حرکت نماید و بعد از قرارگیری در محل مناسب توسط پیچ بر روی پایه محکم گردد (شکل (۳-۱۹)).



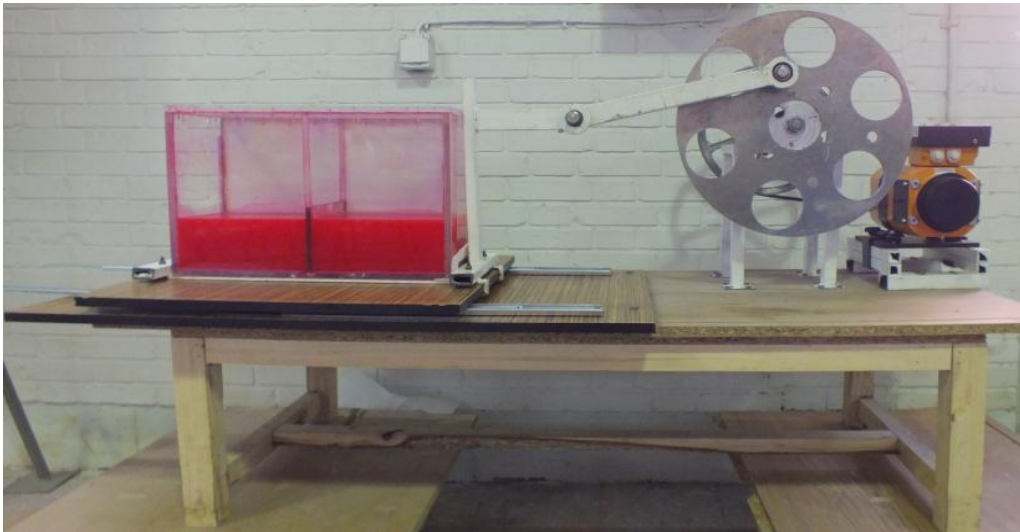
شکل (۳-۱۸) اتصال پولی با موتور توسط تسمه



شکل (۳-۱۹) پایه ساخته شده برای موتور

از آنجایی که بایستی برای پردازش تصویر از مخزن متحرک فیلم برداری شود، کل تجهیزات ساخته

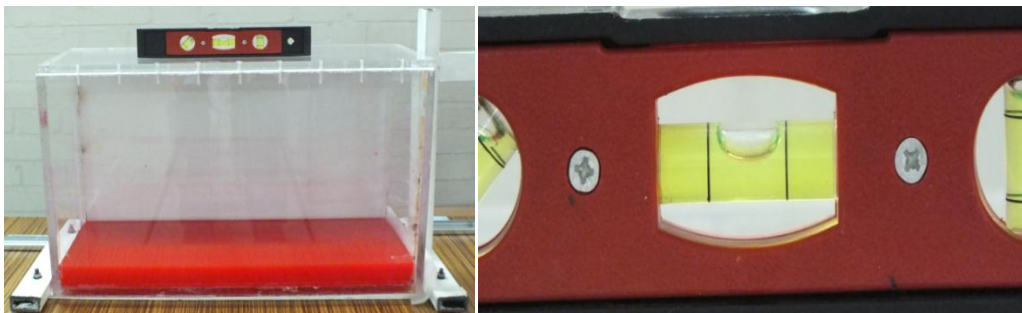
شده، بر روی یک میز ثابت مستقر گردید (شکل (۳-۲۰)).



شکل (۳-۲۰) مجموعه آزمایشگاهی

در نهایت مخزن را تراز کرده تا سطح آزاد مایع داخل آن بدون شیب و کاملاً افقی باشد و خطای

استخراج سطح آزاد، حداقل گردد (شکل (۳-۲۱)).



شکل (۳-۲۱) آزمون تراز بودن مخزن

### ۲-۲-۳- روش آزمایش

بررسی جابجایی سطح آزاد با تغییر دامنه و فرکانس میز متحرک انجام می‌گیرد. تغییر دامنه با تغییر محل نصب شاتون در راستای شعاع صفحه آلومینیمی و تغییر فرکانس با تغییر ولتاژ موتور DC امکان‌پذیر است. در این وسیله، اندازه‌گیری دامنه حرکت بر اساس محاسبه دقیق طول موثر شاتون یا همان کورس حرکتی بین نقاط مرگ انتهایی به‌دست آمده است. برای این منظور از کاغذ میلیمتری استفاده شد و نقاط مرگ انتهایی بر روی آن تعیین گردید. فاصله بین این دو علامت، دامنه حرکت را

در هر آزمایش مشخص می‌کند (شکل (۳-۲۲)).



شکل (۳-۲۲) تعیین دامنه حرکت

همچنین برای تعیین فرکانس حرکت مخزن از شمارش تعداد نوسان‌های میز متحرک و ثبت زمان آن با استفاده از کرنومتر در حین آزمایش استفاده شده است. برای کاهش خطا در تعیین فرکانس حرکت مخزن در هر آزمایش، زمان تناوب سی نوسان ثبت گردید.

آزمایش‌های انجام شده در این مجموعه برای فرکانس‌های حرکتی با مقادیر  $0/5$ ،  $0/67$ ،  $1$  و  $1/5$  هرتز و با تغییر دامنه نوسان در سه حالت  $8$ ،  $15$  و  $20/6$  سانتیمتر انجام شده است. البته بیشتر، نتایج فرکانس‌های  $0/5$  و  $0/67$  هرتز به دلیل تلاطم نسبتاً آرام ارائه شده است. این شرایط آزمایشی یک بار برای مخزن بدون تیغه میراکننده با ده ارتفاع مختلف مایع داخل مخزن انجام گردید که کمترین ارتفاع مایع  $3$  سانتیمتر و بیشترین ارتفاع آن  $13$  سانتیمتر است ( $3$  و  $5$  تا  $13$  سانتیمتر). سپس همان آزمایش‌ها برای مخزن با تیغه میراکننده نسبتاً صلب، با ارتفاع‌های  $6$ ،  $8$ ،  $10$  و  $12$  سانتیمتر در وسط مخزن، برای بررسی تاثیر تیغه روی تلاطم انجام شده است. انتخاب شرایط مذکور با توجه به محدودیت‌های بهره‌برداری تجهیزات آزمایشگاهی بوده است.

در هر آزمایش برای مشاهده تاثیر دامنه و فرکانس بر جابجایی سطح آزاد مایع متلاطم ابتدا دامنه حرکتی، ثابت در نظر گرفته شده است و در هر دامنه حرکت، فرکانس یا دور موتور به منظور ایجاد تغییر در دوره تناوب حرکت جابجایی تغییر داده شده است. پس از ایجاد شرایط تکرار شونده، که در آزمایش‌های مذکور بین  $60$  تا  $120$  ثانیه بوده، تصویربرداری انجام و نتایج ثبت شده است.

## ۳-۳- شرایط آزمایشگاهی

آزمایش‌های مورد نظر در فشار یک اتمسفر و دمای بیست و پنج درجه سانتیگراد انجام شده است. خواص فیزیکی سیال‌ها در جدول (۱-۳) آورده شده است.

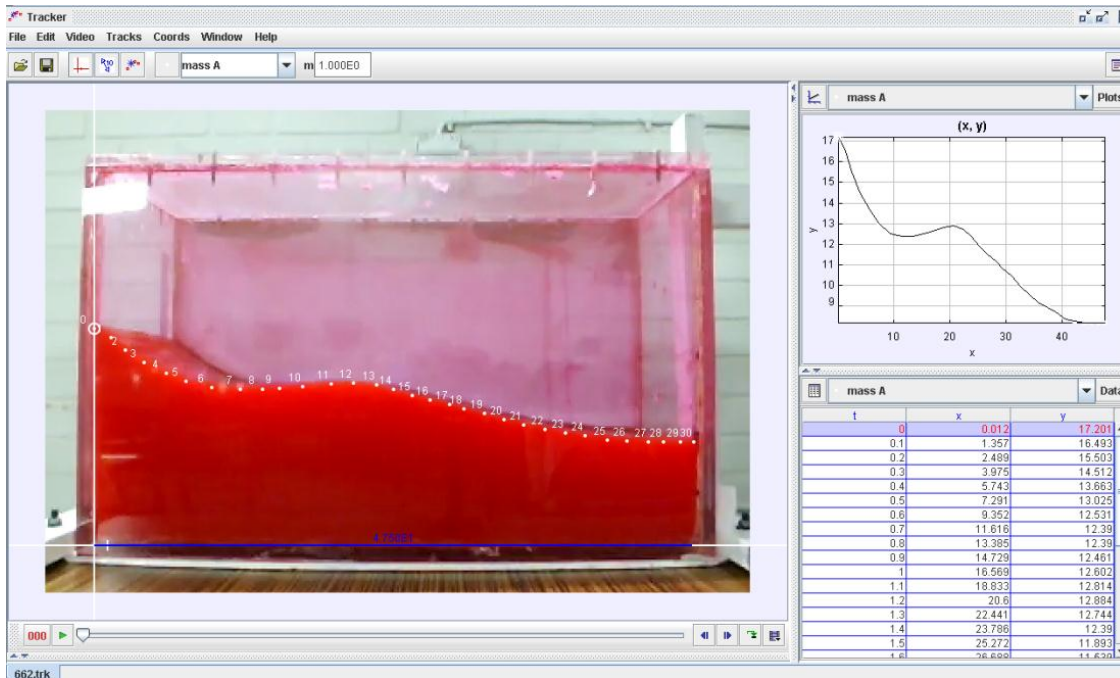
جدول (۱-۳) خواص سیال‌ها

خواص فاز ۱ (آب)			
$1/0 \times 10^{-6}$	$\nu_1$	$\frac{m^2}{s}$	ضریب لزجت سینماتیکی
۹۹۹/۸۲	$\rho_1$	$\frac{Kg}{m^3}$	چگالی
خواص فاز ۲ (هوا)			
$1/48 \times 10^{-5}$	$\nu_2$	$\frac{m^2}{s}$	ضریب لزجت سینماتیکی
۱/۰	$\rho_2$	$\frac{Kg}{m^3}$	چگالی

۳-۴- پردازش تصویر<sup>۱</sup>

برای اندازه‌گیری تجربی سطح آزاد مایع متلاطم، در هر آزمایش تصویربرداری پیاپی با فاصله‌های زمانی ثابت (۳۰ فریم در هر ثانیه) از مخزن متحرک انجام شده است. عکس‌های ثبت شده از مخزن در لحظه‌های مختلف حرکت توسط نرم‌افزار پردازش تصویر و استفاده از مقیاس‌های درون تصویر، کالیبره شده، سپس با نشانه‌گذاری و استخراج سطح آزاد، نقاط مرزی این سطح و به عبارت دیگر سطح مشترک گاز-مایع یا همان شکل موده‌های سطح آزاد تعیین شده است (شکل (۳-۲۳)).

<sup>۱</sup> Image Processing



شکل (۳-۲۳) استخراج سطح آزاد توسط پردازش تصویر

نام نرم‌افزار پردازش تصویر مورد استفاده، Tracker بوده که تحت زبان برنامه‌نویسی Java کار کرده و به صورت منبع باز می‌باشد. تصویربرداری توسط دوربین دیجیتال Fujifilm FinePix HS20 EXR انجام گرفته که ویژگی‌های این دوربین در پیوست ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است برای تصویربرداری، دوربین در حالت AUTO EXR که تنظیم‌ها را برای هر صحنه، خود دوربین انتخاب می‌کند قرار داده شد. ابعاد فیلم در حالت  $۴۸۰ \times ۶۴۰$  پیکسل و سرعت فیلم‌برداری در حالت ۳۰ فریم در ثانیه تنظیم گردید.

برای بدست آوردن خطای حاصل از استخراج سطح آزاد در پردازش تصویر، تا حدی که امکان داشت تصویر مورد نظر توسط این نرم‌افزار بزرگ گردید و ضخامت سطح مشترک با توجه به مقیاس - های درون تصویر بدست آورده شد. ضخامت بدست آمده ( $۰/۲۲۱$  سانتیمتر)، خطای مورد نظر می‌باشد.

فصل چهارم

شیء سازی محاسباتی



## ۴-۱- نرم‌افزار OpenFOAM

نرم‌افزار OpenFOAM<sup>۱</sup> یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که قادر به شبیه‌سازی هر نوع مساله شامل معادله‌های دیفرانسیل جزئی، از جمله حل عددی جریان سیال از مسائل ساده تا بسیار پیچیده می‌باشد. از نمونه موارد قابل مدل‌سازی توسط این نرم‌افزار می‌توان مساله‌های مربوط به جریان‌های آرام و آشفته، تک‌فاز و چندفاز، انتقال حرارت، واکنش شیمیایی، الکترومغناطیس، مکانیک جامدات و... اشاره نمود. این نرم‌افزار توسط "OpenCFD Ltd" به صورت منبع باز<sup>۲</sup> و آزاد موجود می‌باشد. این مطلب بدان معناست که برنامه آن به صورت رایگان در اختیار همه قرار دارد و به سهولت از شبکه جهانی اینترنت قابل دریافت است. همچنین به دلیل آزاد یا باز بودن منبع کد مذکور، امکان بررسی تمامی جنبه‌های برنامه‌نویسی از جمله تغییر و توسعه آن برای کاربر فراهم خواهد بود.

هسته انعطاف‌پذیر و کارآمد OpenFOAM، از مجموعه‌ای از کدهای نوشته شده توسط ++C ایجاد شده است. این مجموعه‌ها در ایجاد حل‌گرهایی<sup>۳</sup> برای شبیه‌سازی مسایل مطرح در مهندسی مکانیک و یا ایجاد کاربردها<sup>۴</sup> برای اعمال پیش‌پردازش<sup>۵</sup> و پس‌پردازش<sup>۶</sup>، همچنین به وجود آوردن کتابخانه‌هایی<sup>۷</sup> به منظور ایجاد جعبه ابزارهایی که در حل‌گرها/کاربردها، قابل دسترسی باشند و یا برای مدل‌های فیزیکی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نرم‌افزار با تعدادی حل‌گر از پیش ساخته، مثال‌های کاربردی و کتابخانه‌ها ارائه گردیده که می‌تواند به عنوان یک بسته شبیه‌سازی معمولی مورد استفاده قرار گیرد. در حالی که علاوه بر باز و آزاد بودن کد منبع آن، قابلیت توسعه در ساختار و سلسله مراتب

<sup>۱</sup> Open Field Operation and Manipulation

<sup>۲</sup> Open Source

<sup>۳</sup> Solvers

<sup>۴</sup> Utilities

<sup>۵</sup> Pre Processing

<sup>۶</sup> Post Processing

<sup>۷</sup> Libraries

حل‌گرها، مثال‌های کاربردی و کتابخانه‌ها را نیز دارا می‌باشد. نرم‌افزار OpenFOAM از شیوه عددی حجم محدود (FV) برای حل دستگاه معادله‌های دیفرانسیل با مشتق‌های جزئی استفاده می‌کند که به هر شبکه‌بندی غیر ساختار یافته سه بعدی، سلول‌های چند وجهی نسبت داده می‌شود.

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

حرکت مایع با سطح آزاد در داخل مخزن متحرک با توجه به ناپیوستگی در خواص سیال‌ها در سطح مشترک، متحرک بودن این سطح، وجود تغییر فاز در لایه‌های مجاور این سطح و بدون ضخامت بودن این سطح، شبیه‌سازی این‌گونه جریان‌ها را به مساله‌ای چالش برانگیز تبدیل کرده است. روش عددی که در این‌گونه جریان‌ها به کار گرفته شده است باید علاوه بر ارضا کردن معادله بقای جرم و مقرون به‌صرفه بودن از لحاظ محاسباتی، قادر به معرفی شکل و انحنای سطح نیز باشد. همچنین باید ضخامت سطح را تا حد امکان کوچک کرده و قابلیت تعمیم به شبکه‌های سه بعدی را نیز داشته باشد. با توجه به این مطالب روش کسر حجمی سیال (VOF) که قابلیت‌های مذکور را داشته و نسبت به روش‌های دیگر عمومیت بیشتری 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 عبارتند از:

معادله پیوستگی:

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

و معادله اندازه حرکت:

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

که در رابطه‌های بالا،  $\rho$  چگالی سیال،  $U$  سرعت سیال،  $\mu$  ضریب لزجت،  $g$  شتاب گرانش،  $p$  فشار سیال و  $F_s$  بیانگر نیروی تنش سطحی است که تنها در سطح مشترک دو سیال رخ می‌دهد. برای استفاده از روش کسر حجمی سیال در این معادله‌ها، بسته به این که ناحیه حل در کدام سیال واقع

شده، خواص همان سیال در رابطه پیوستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش دیدگاه اویلری نسبت به میدان جریان برقرار بوده، به این معنی که شبکه محاسباتی در تمام زمان حل ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. در این روش سطح به صورت صریح ردیابی نشده بلکه با ردیابی کسر حجمی  $\alpha$  که به هر کدام از سیال‌ها نسبت داده می‌شود، سطح نیز جابه‌جا می‌شود. کسر حجمی  $\alpha$ ، نسبت حجم سیال به حجم کل سلول محاسباتی بوده و برای مایع مقدار یک و برای گاز مقدار صفر را می‌پذیرد. لیکن بایستی توجه داشت که  $\alpha$  برای یک ذره از سیال همواره ثابت بوده، متاثر از رفتار جریان نمی‌باشد در نتیجه مشتق مادی آن صفر می‌باشد:

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

همانطور که پیشتر اشاره شد نمایش ریاضی  $\alpha$  به شکل زیر می‌باشد:

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

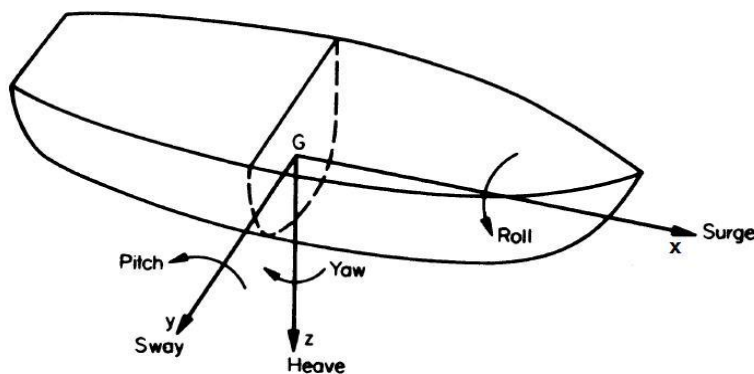
به کمک  $\alpha$  می‌توان خواص فیزیکی سیال را در هر نقطه از دامنه حل تعریف نمود. اگر  $\phi$  به عنوان یک خاصیت فیزیکی مانند چگالی، لزجت و... در نظر گرفته شود این خاصیت در کل میدان به صورت زیر می‌باشد:

$$\phi = \phi_2 + \alpha (\phi_1 - \phi_2) \quad (5-4)$$

که اندیس  $\phi$  نشانگر سیال مورد نظر می‌باشد.

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

حرکت مخزن در حالت کلی، شش درجه آزادی داشته که شامل چرخش (حول محورهای  $x^1$ ،  $y^2$  و  $z^3$ )، حرکت بالا و پایین<sup>۴</sup> (در امتداد محور  $z$ ) و حرکت چپ و راست<sup>۵</sup> (در امتداد محور  $y$ ) و حرکت جلو و عقب<sup>۶</sup> (در امتداد محور  $x$ ) می‌باشد (شکل (۱-۴)). در نرم‌افزار OpenFOAM برای پیاده‌سازی 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 می‌باشد، ضرایب‌هایی پیش‌بینی شده که با فرض‌های لازم امکان حرکت دلخواه را تامین می‌کند و می‌توان با تنظیم مقدار این ضرایب حرکت مورد نظر را شبیه‌سازی نمود. تعریف و واحد هر یک از این ضرایب که در معادله‌های حاکم برای به دست آوردن حرکت نوسانی مخزن مورد استفاده قرار گرفته‌اند در جدول (۱-۴) ارائه شده است.



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

<sup>۱</sup> Roll  
<sup>۲</sup> Pitch  
<sup>۳</sup> Yaw  
<sup>۴</sup> Heave  
<sup>۵</sup> Sway  
<sup>۶</sup> Surge

جدول (۱-۴) ضرایب بکار رفته برای تامین حرکت مخزن

ضریب	تعریف	نوع	بعد
CofG	مختصات مرکز نوسان مرکز ثقل مخزن	بردار	متر
rollAmax	بیشترین دامنه چرخش	اسکالر	رادیان
rollAmin	کمترین دامنه چرخش	اسکالر	رادیان
heaveA	حرکت بالا و پایین (حرکت انتقالی در امتداد 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 عبارتند از :

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

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

$$r = \frac{dT_p}{dT_i} \quad (۸-۴)$$

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

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

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

$$ph_h = ph_r + \frac{\pi}{2} \quad \text{فاز جریان برای حرکت به سمت بالا و پایین [rad]} \quad (12-4)$$

$$rollA = \max \left\{ rollA_{max} e^{-\frac{\sqrt{T_{pi}-T_{pn}}}{2Q}}, rollA_{min} \right\} \quad \text{دامنه چرخش [rad]} \quad (13-4)$$

$$T = \begin{bmatrix} 0 \\ swayA \times (\sin(w_r \times time + ph_s) - \sin(ph_s)) \\ heaveA \times (\sin(w_r \times time + ph_h) - \sin(ph_h)) \end{bmatrix} \quad \text{بردار انتقال [m]} \quad (14-4)$$

$$R = \text{quaternion} \begin{bmatrix} rollA \times \sin(w_r \times time + ph_r) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{کواترنیون چرخش [rad]} \quad (15-4)$$

$$TR = \text{septernion}[\text{septernion}(CofG + T) \times R \\ \times \text{septernion}(-CofG)] \quad \text{سپترنیون جابجایی [m]} \quad (16-4)$$

در این حرکت، کواترینین<sup>۱</sup> برای چرخش به صورت سه بعدی و سپترنیون<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 مولفه می‌باشد [۵۸].

حل عددی بر اساس روش حجم محدود (FV) می‌باشد. در این حل هر یک از عملگرهای دیفرانسیلی به روشی گسسته‌سازی شده است. برای مشتق زمانی از روش اویلر و برای عملگر گرادیان از روش خطی گوس برای گسسته‌سازی استفاده شده است. برای گسسته‌سازی عملگر دیورژانس در معادله‌های سرعت و کسر حجمی از روش وان‌لیر<sup>۳</sup> استفاده شده و گسسته‌سازی جملات لاپلاسین با استفاده از روش خطی گوس بوده است.

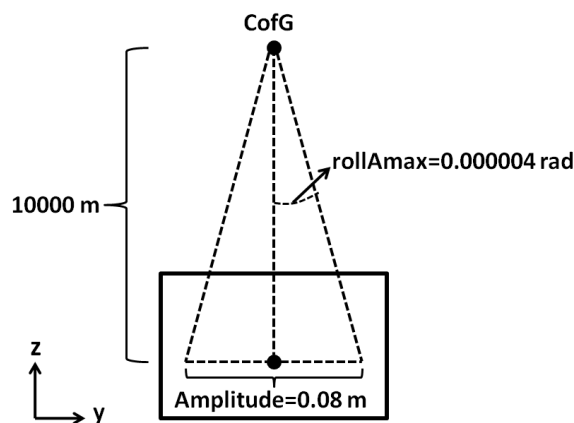
<sup>۱</sup> Quaternion

<sup>۲</sup> Septernion

<sup>۳</sup> VanLeer

## ۴-۳- مدل‌سازی عددی

با توجه به ضرایب معرفی شده، برای ایجاد یک حرکت جابجایی عرضی، لازم است تا مقدار این ضرایب به گونه‌ای تنظیم شود که مخزن یک حرکت نوسانی و متقارن در راستای محور  $y$  داشته باشد و به عبارت دیگر حرکتی یک درجه آزادی فراهم شود. برای این منظور باید مرکز نوسان (CofG) مرکز ثقل مخزن در فاصله بی‌نهایت فیزیکی قرار داده شود و از آنجایی که حرکت مخزن در صفحه  $y-z$  بررسی می‌شود، مختصات مرکز دوران به صورت  $(0 \ 0 \ 10000)$  برحسب متر در نظر گرفته شده است. با این کار وقتی مخزن حول این نقطه نوسان کند، به علت شعاع زیاد در نوسان‌های کم، می‌توان حرکت مخزن را خطی فرض کرد. برای دستیابی به دامنه حرکت دلخواه نیز زاویه نوسان بیشینه ( $rollAmax$ ) به صورت مناسب تنظیم شده است. به عنوان مثال برای رسیدن به دامنه حرکت  $0.08$  متر باید این زاویه برابر با  $0.000004$  رادیان انتخاب شود (شکل (۴-۲)). لازم به ذکر است در این مساله مرکز ثقل مخزن، در وسط آن و روی سطح مایع داخل آن در نظر گرفته شده است.

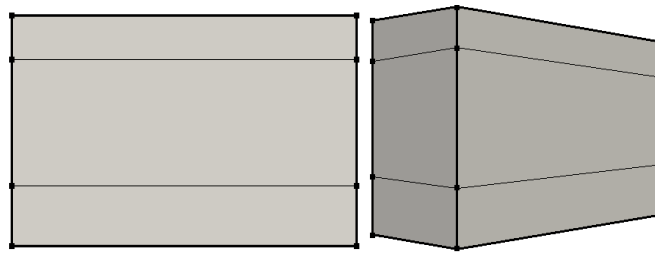


شکل (۴-۲) حرکت نوسانی مخزن

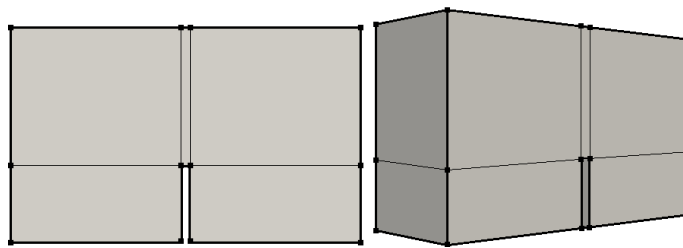
حرکت نوسانی مذکور با استفاده از حل‌گر `interDyMFoam`، که یکی از حل‌گرهای `OpenFOAM-1.7.0` برای شبیه‌سازی عددی جریان سیال‌ها با سطوح مشترک می‌باشد و در آن امکان استفاده از شبکه‌بندی پویا برقرار شده است اجرا می‌گردد. در حالت کلی این حل‌گر برای تحلیل عددی دو سیال غیرقابل تراکم، هم‌دما و مخلوط نشدنی که سطح مشترک بین دو سیال با روش کسر

حجمی سیال (VOF) با حرکت شبکه دلخواه، قابل اجرا می‌باشد [۵۹].

خواص فیزیکی برای دو فاز مایع و گاز مطابق با جدول (۳-۱) در فصل سوم قابل تنظیم می‌باشد. برای انجام شبیه‌سازی حاضر هندسه مساله با ابعاد واقعی به صورت سه‌بعدی تهیه و شبکه‌بندی شده است. هندسه مساله برای مخزن بدون تیغه شامل ۱۶ راس و ۳ بلوک (شکل (۴-۳)) و برای مخزن با تیغه شامل ۲۴ راس و ۵ بلوک (شکل (۴-۴)) می‌باشد.



شکل (۳-۴) رئوس و بلوک‌های مخزن بدون تیغه میراکننده



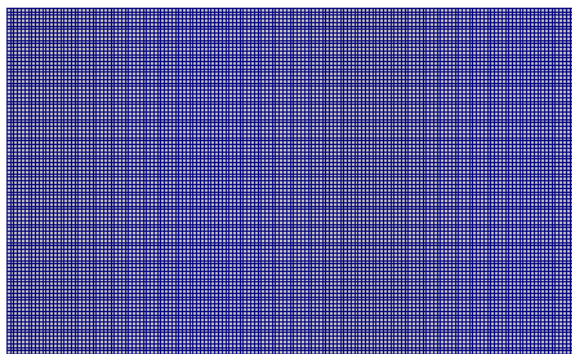
شکل (۴-۴) رئوس و بلوک‌های مخزن با تیغه میراکننده

هندسه شبیه‌سازی شده برای مخزن مستطیلی شکل در حالت بدون تیغه میراکننده (بافل) دارای مرزهای دیوار جانبی و در حالت با تیغه با یک دیوار میانی است. شرط به‌کار رفته روی مرزهای مذکور از جنس دیواره می‌باشد. مرز اولیه مایع و گاز نیز تنها در گام اول با تعیین مقدار ضریب  $\alpha$  برای میدان حل اولیه مساله تعریف می‌شود و در گام‌های بعدی توسط مساله محاسبه می‌گردد. شرایط اولیه سرعت و فشار در دیواره‌ها و همچنین ناحیه داخلی مخزن برابر با صفر است. تحریک و جابجایی دیواره‌ها با استفاده از روابطی که در بخش قبل اشاره شد در هر گام محاسبه و با استفاده از امکان شبکه‌بندی دینامیکی موجود در نرم‌افزار رفتار جابجایی مخزن در هر گام شبیه‌سازی می‌شود.

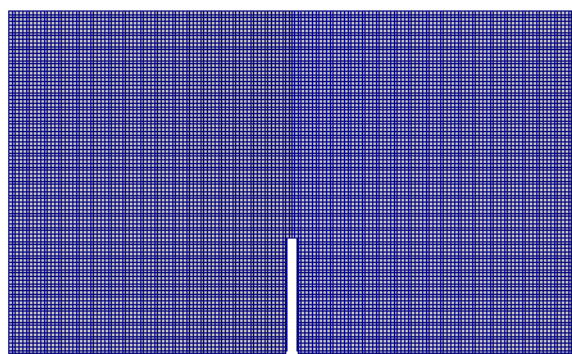
مخزن پس از شبکه‌بندی در حالت بدون تیغه شامل ۱۵۵۸۲ سلول محاسباتی (شکل (۴-۵)) و در



حالت با تیغه شامل ۱۵۶۸۰ سلول محاسباتی می‌باشد (شکل (۴-۶)). شبکه‌بندی به صورت یکنواخت و یکپارچه بوده، هیچ‌گونه کشیدگی یا فشردگی در قسمت‌های مختلف هندسه وجود ندارد. سلول‌های محاسباتی مربع شکل می‌باشند.



شکل (۴-۵) شبکه‌بندی مخزن بدون تیغه میراکننده

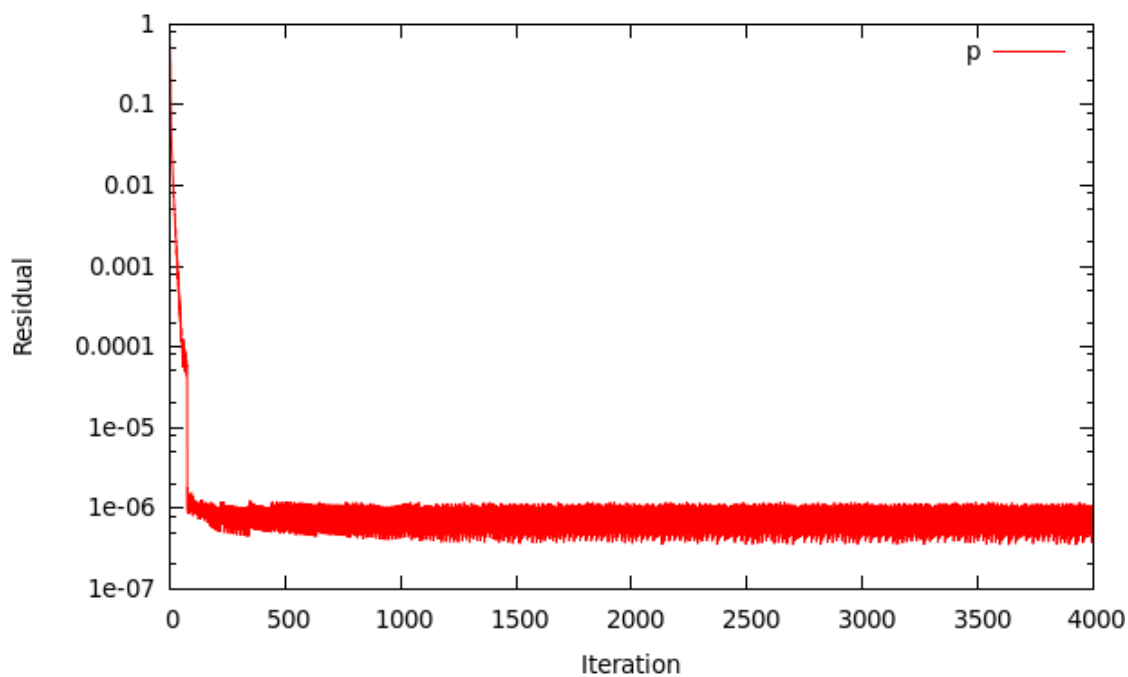


شکل (۴-۶) شبکه‌بندی مخزن با تیغه میراکننده

به منظور بررسی استقلال حل از شبکه‌بندی، شبیه‌سازی عددی مورد نظر پس از انجام با شبکه‌بندی اولیه که در بالا شرح داده شد بار دیگر با نصف و یک سوم برابر کردن تعداد سلول‌های محاسباتی صورت گرفت که نتایج به دست آمده به دلیل ضخیم شدن سطح مشترک دو سیال با نتایج حاصل از شبکه‌بندی اولیه، دارای اختلاف‌هایی بود. اما وقتی این شبیه‌سازی با تعداد شبکه دو و پنج برابر انجام گردید، تغییری در نتایج حاصل نشد.

## ۴-۴- رسیدن به حالت پایا

نرم افزار OpenFOAM به صورت پیش فرض مسائل را در حالت گذرا<sup>۱</sup> حل می‌کند. بنابراین برای حل مسائل پایا باید حل تا زمان مناسب ادامه پیدا کند تا به حالت پایا برسد و مقادیر باقیمانده خطا از مقدار مشخصی کمتر شود. شکل (۷-۴) مقادیر باقیمانده خطای فشار را برای مایع متلاطم در مخزن بدون تیغه، در دامنه ۸ سانتیمتر و فرکانس ۰/۵ هرتز نشان می‌دهد.



شکل (۷-۴) مقدار باقیمانده خطا برای مایع متلاطم در کمترین دامنه و فرکانس

<sup>۱</sup> Unsteady

فصل پنجم

نتیجہ و تکلیف آن ہا

## ۵-۱- نتایج آزمایشگاهی و عددی

مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی در خصوص ارتفاع سطح آزاد مایع متلاطم که در حالت‌های مختلف تحریک عرضی مخزن با تیغه میراکننده و بدون آن انجام شده، به صورت کیفی در جداول (۵-۱) و (۵-۲) و به شکل کمی در جداول (۵-۳) و (۵-۴) ارائه شده است.

جدول (۵-۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن بدون تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)
			۱/۱۲	۰/۵	۸	۳
			۰/۷۶	۰/۶۷	۸	۳
			۰/۴۹	۱	۸	۳
			۰/۳۶	۱/۵	۸	۳
			۰/۸۶	۰/۵	۸	۵

ادامه جدول (۵-۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن بدون تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)
			۰/۷۶	۰/۶۷	۸	۵
			۰/۵۶	۱	۸	۵
			۱/۱۲۲	۰/۵	۸	۶
			۰/۸	۰/۶۷	۸	۶
			۱/۱۸۸	۰/۵	۸	۷

ادامه جدول (۵-۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن بدون تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)
			۰/۶۳	۰/۶۷	۸	۷
			۰/۷۹	۰/۵	۸	۸
			۰/۶۹	۰/۶۷	۸	۸
			۰/۷۶	۰/۵	۸	۹
			۰/۷۶	۰/۶۷	۸	۹

ادامه جدول (۵-۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن بدون تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)
			۰/۴۶	۰/۵	۸	۱۰
			۰/۶۹	۰/۶۷	۸	۱۰
			۱/۵۲	۰/۵	۸	۱۱
			۰/۵۹	۰/۶۷	۸	۱۱
			۱/۱۸۸	۰/۵	۸	۱۲



ادامه جدول (۵-۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن بدون تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)
			۰/۶۳	۰/۶۷	۸	۱۲
			۰/۵۹	۰/۵	۸	۱۲
			۰/۲۶	۰/۶۷	۸	۱۲
			۰/۸۹	۰/۵	۱۵	۳
			۰/۷۹	۰/۶۷	۱۵	۳

ادامه جدول (۵-۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن بدون تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)
			۰/۴۶	۱	۱۵	۳
			۰/۶۹	۰/۵	۱۵	۵
			۰/۵۳	۰/۶۷	۱۵	۵
			۱/۲۵	۰/۵	۱۵	۶
			۰/۴۹	۰/۶۷	۱۵	۶

ادامه جدول (۵-۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن بدون تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)
			۰/۶۹	۰/۵	۱۵	۷
			۱/۱۵	۰/۵	۱۵	۸
			۱/۵۵	۰/۵	۱۵	۹
			۱/۶۲	۰/۵	۱۵	۱۰
			۱/۵۶	۰/۵	۱۵	۱۱

ادامه جدول (۵-۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن بدون تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)
			۰/۴۹	۰/۵	۱۵	۱۲
			۰/۵۹	۰/۵	۱۵	۱۲
			۰/۶۹	۰/۵	۲۰/۶	۳
			۰/۷۹	۰/۶۷	۲۰/۶	۳
			۱/۴۲	۰/۵	۲۰/۶	۵

ادامه جدول (۵-۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن بدون تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)
			۰/۸۲	۰/۶۷	۲۰/۶	۵
			۰/۴۶	۰/۵	۲۰/۶	۶
			۰/۷۶	۰/۶۷	۲۰/۶	۶
			۱/۱۲	۰/۵	۲۰/۶	۷
			۰/۴	۰/۵	۲۰/۶	۸

ادامه جدول (۵-۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن بدون تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)
			۰/۴۳	۰/۵	۲۰/۶	۹
			۱/۲۲	۰/۵	۲۰/۶	۱۰
			۰/۵۶	۰/۵	۲۰/۶	۱۱
			۰/۵۳	۰/۵	۲۰/۶	۱۲
			۰/۵۶	۰/۵	۲۰/۶	۱۳

جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۰/۴	۰/۵	۸	۳	۶
			۱/۱۲	۰/۶۷	۸	۳	۶
			۰/۵۹	۱	۸	۳	۶
			۰/۴	۰/۵	۸	۵	۶
			۰/۴	۰/۶۷	۸	۵	۶

ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۰/۴۳	۱	۸	۵	۶
			۱/۲۲	۰/۵	۸	۶	۶
			۰/۴۳	۰/۶۷	۸	۶	۶
			۰/۹۹	۰/۵	۸	۷	۶
			۱/۲۵	۰/۶۷	۸	۷	۶



ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۱/۱۹	۰/۵	۱۵	۳	۶
			۱/۱۲	۰/۶۷	۱۵	۳	۶
			۰/۴	۱	۱۵	۳	۶
			۰/۳	۰/۵	۱۵	۵	۶
			۰/۷۳	۰/۶۷	۱۵	۵	۶

ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۰/۴۹	۰/۵	۱۵	۶	۶
			۰/۵۸	۰/۶۷	۱۵	۶	۶
			۱/۱۲	۰/۵	۱۵	۷	۶
			۰/۳۶	۰/۵	۲۰/۶	۳	۶
			۰/۵۳	۰/۶۷	۲۰/۶	۳	۶

ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۱/۱۵	۰/۵	۲۰/۶	۵	۶
			۰/۹۶	۰/۶۷	۲۰/۶	۵	۶
			۱/۱	۰/۵	۲۰/۶	۶	۶
			۰/۶۹	۰/۶۷	۲۰/۶	۶	۶
			۱/۲۲	۰/۵	۲۰/۶	۷	۶

ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۰/۷۹	۰/۵	۸	۷	۸
			۱/۱	۰/۶۷	۸	۷	۸
			۰/۹۶	۰/۵	۸	۸	۸
			۰/۴۳	۰/۶۷	۸	۸	۸
			۱/۱۹	۰/۵	۸	۹	۸

ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۰/۶۹	۰/۶۷	۸	۹	۸
			۰/۳۳	۰/۵	۱۵	۷	۸
			۱/۱	۰/۵	۱۵	۸	۸
			۰/۹۲	۰/۵	۱۵	۹	۸
			۰/۹۲	۰/۵	۲۰/۶	۷	۸

ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۱/۱	۰/۵	۲۰/۶	۸	۸
			۱/۱۲	۰/۵	۲۰/۶	۹	۸
			۰/۳۳	۰/۵	۸	۹	۱۰
			۰/۸۶	۰/۶۷	۸	۹	۱۰
			۰/۳۳	۰/۵	۸	۱۰	۱۰

ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۱/۱۲	۰/۶۷	۸	۱۰	۱۰
			۱/۱۲	۰/۵	۸	۱۱	۱۰
			۰/۵۹	۰/۶۷	۸	۱۱	۱۰
			۰/۳۶	۰/۵	۱۵	۹	۱۰
			۱/۱۹	۰/۵	۱۵	۱۰	۱۰

ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۱/۳۲	۰/۵	۱۵	۱۱	۱۰
			۱/۲۵	۰/۵	۲۰/۶	۹	۱۰
			۰/۱۸۹	۰/۵	۲۰/۶	۱۰	۱۰
			۰/۹۹	۰/۵	۲۰/۶	۱۱	۱۰
			۰/۳۳	۰/۵	۸	۱۱	۱۲



ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۰/۸۲	۰/۶۷	۸	۱۱	۱۲
			۰/۹۹	۰/۵	۸	۱۲	۱۲
			۰/۸۲	۰/۶۷	۸	۱۲	۱۲
			۱/۰۲	۰/۵	۸	۱۳	۱۲
			۰/۹۶	۰/۶۷	۸	۱۳	۱۲

ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۰/۳	۰/۵	۱۵	۱۱	۱۲
			۰/۷۹	۰/۵	۱۵	۱۲	۱۲
			۱/۱۲	۰/۵	۱۵	۱۳	۱۲
			۰/۸۶	۰/۵	۲۰/۶	۱۱	۱۲
			۰/۷۶	۰/۵	۲۰/۶	۱۲	۱۲

ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۱/۲۹	۰/۵	۲۰/۶	۱۳	۱۲
			۰/۳۳	۰/۵	۸	۷	۱۰
			۰/۹۲۴	۰/۵	۸	۷	۱۲
			۱/۱۵۵	۰/۵	۸	۹	۶
			۰/۸۲۵	۰/۵	۸	۹	۱۲

ادامه جدول (۲-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مخزن با تیغه میراکننده

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی	شبهه سازی عددی با شرایط مشابه	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	زمان (ثانیه)	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
			۱/۰۵۶	۰/۵	۸	۱۱	۶
			۰/۶۲۷	۰/۵	۸	۱۱	۸
			۰/۶۶	۰/۵	۸	۱۳	۶
			۰/۷۲۶	۰/۵	۸	۱۳	۸
			۱/۰۲۳	۰/۵	۸	۱۳	۱۰

جدول (۳-۵) بیشترین و کمترین ارتفاع مایع داخل مخزن بدون تیغه میراکننده

خطای نسبی برای کمترین ارتفاع مایع (%)	خطای نسبی بیشترین ارتفاع مایع (%)	کمترین	بیشترین	کمترین ارتفاع	بیشترین ارتفاع	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)
		ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	مایع (سانتیمتر)	مایع (سانتیمتر)			
		عددی		آزمایشگاهی				
۸/۷۴	۰/۰۳	۲/۰۹۹	۹/۱۶	۲/۳	۹/۱۶۳	۰/۵	۸	۳
۵/۰۱	۰/۵۲	۱/۲۸۸	۱۵/۰۸۴	۱/۳۵۶	۱۵/۰۰۶	۰/۶۷	۸	۳
۹/۵۳	۲/۹۲	۱/۶۰۱	۱۳/۶۸	۱/۷۷	۱۴/۰۹۲	۱	۸	۳
۹/۶۴	۶/۹۱	۱/۰۱۳	۱۲/۱۹۴	۱/۱۲۱	۱۳/۱	۱/۵	۸	۳
۲/۷۲	۰/۲۶	۳/۶	۹/۹۸۲	۳/۷۰۱	۱۰/۰۰۸	۰/۵	۸	۵
۹/۰۷	۰/۶۱	۳/۷۰۱	۱۸/۹۵۷	۴/۰۷	۱۸/۸۴۳	۰/۶۷	۸	۵
۵/۸۶	۲/۴۱	۱/۶	۲۹	۱/۷	۲۸/۳۱۸	۱	۸	۵
۵/۵۷	۴/۱۶	۴/۸۶۲	۱۰/۵۳	۴/۶۰۵	۱۰/۱۰۹	۰/۵	۸	۶
۸/۹۷	۰/۵۵	۳/۸۲	۱۸/۱۲۱	۴/۱۹۶	۱۸/۲۲۲	۰/۶۷	۸	۶
۸/۲	۰/۷۸	۵/۱۰۷	۱۲/۴۸۳	۵/۵۶۴	۱۲/۳۸۶	۰/۵	۸	۷
۹/۲۳	۰/۲	۵/۲	۲۴/۳۸۸	۴/۷۶۱	۲۴/۳۳۹	۰/۶۷	۸	۷
۹/۸۸	۱/۹۳	۶/۲	۱۲/۲۳۱	۶/۸۸	۱۲/۴۷۲	۰/۵	۸	۸
۸/۳۲	۰/۶۲	۶/۸۰۸	۲۳/۸۰۷	۷/۴۲۶	۲۳/۹۵۶	۰/۶۷	۸	۸
۶/۳۹	۳/۴۳	۷/۴۲۳	۱۴/۹۳۸	۶/۹۷۷	۱۴/۴۴۳	۰/۵	۸	۹
۳/۳۹	۱/۲۲	۷/۶۶۵	۲۳/۷۲۴	۷/۹۳۴	۲۳/۴۴۸	۰/۶۷	۸	۹
۷/۹۶	۱/۶۷	۶/۷۲۴	۱۵/۳۵۳	۷/۳۰۶	۱۵/۱۰۱	۰/۵	۸	۱۰
۱/۵۸	۰/۶۲	۷/۴۶	۲۲/۱۶۳	۷/۳۴۴	۲۲/۳	۰/۶۷	۸	۱۰
۲/۰۵	۲/۳۷	۷/۷۶۹	۱۶/۵۸۶	۷/۹۳۲	۱۶/۹۸۹	۰/۵	۸	۱۱
۲/۴۷	۳/۸۹	۸/۶۳۳	۲۳/۲۳۷	۸/۸۵۲	۲۳/۳۶۶	۰/۶۷	۸	۱۱
۲/۴۶	۶/۵۱	۸/۶۹۹	۱۵/۹۳۵	۸/۹۱۹	۱۷/۰۴۵	۰/۵	۸	۱۲
۸/۹۹	۲/۷۱	۹/۸۱	۲۶/۳۵۵	۱۰/۷۷۹	۲۵/۶۵۹	۰/۶۷	۸	۱۲
۹/۱۷	۴/۲۸	۱۰/۷۶۳	۱۷/۶۹۳	۱۱/۸۵	۱۸/۴۸۳	۰/۵	۸	۱۳
۸/۲۲	۲/۴۷	۱۰/۰۰۹	۲۶/۳۲۱	۹/۲۴۹	۲۵/۶۸۶	۰/۶۷	۸	۱۳
۹/۶۵	۰/۲۳	۱/۹	۹/۸۱۹	۲/۱۰۳	۹/۸۴۲	۰/۵	۱۵	۳
۳/۸۱	۱/۵۸	۰/۹۳۶	۱۶/۸۲۳	۰/۹۰۲	۱۶/۵۶۱	۰/۶۷	۱۵	۳
۹/۹۵	۵/۰۷	۰/۸۱	۲۰/۶۲۹	۰/۹	۱۹/۶۳۴	۱	۱۵	۳
۹/۲۹	۹/۲۹	۳/۳۶۷	۱۱/۷۳۹	۳/۷۱۲	۱۲/۹۴۱	۰/۵	۱۵	۵
۶/۷۴	۹/۶۶	۳/۴۰۵	۲۱/۹۲۲	۳/۱۹	۱۹/۹۹	۰/۶۷	۱۵	۵
۳/۷۴	۴/۵۸	۴/۰۸۵	۱۳/۹۶۱	۴/۲۴۴	۱۳/۳۵	۰/۵	۱۵	۶
۷/۶۲	۲/۲۴	۳/۲۹۶	۲۴/۰۷۴	۳/۵۶۸	۲۳/۵۴۷	۰/۶۷	۱۵	۶
۹/۷۳	۰/۱۷	۴/۴۶۵	۱۵/۶۴۱	۴/۹۴۶	۱۵/۶۶۸	۰/۵	۱۵	۷
۰/۴۳	۲/۳۶	۵/۲۲۷	۱۷/۰۷۳	۵/۲۰۵	۱۷/۴۸۷	۰/۵	۱۵	۸
۸/۳۳	۷/۸۹	۴/۴۹۵	۱۶/۴۹۴	۴/۱۴۹	۱۷/۹۰۸	۰/۵	۱۵	۹
۰/۸۳	۴/۵۱	۵/۳۶	۲۰/۰۴۹	۵/۴۰۵	۲۰/۹۹۷	۰/۵	۱۵	۱۰
۸/۴۳	۱/۵۹	۶/۱۹	۲۲/۸۲۴	۶/۷۶	۲۲/۴۶۷	۰/۵	۱۵	۱۱
۹/۷۷	۲/۶۲	۱۰/۱۹	۲۴/۵۸	۹/۲۸۳	۲۳/۹۵۲	۰/۵	۱۵	۱۲
۰/۰۸	۰/۲۸	۱۱/۵۴۹	۲۵/۰۶	۱۱/۵۳۹	۲۴/۹۸۹	۰/۵	۱۵	۱۳
۱/۷۲	۴/۹۹	۱/۶۲۶	۱۰/۲۳۴	۱/۶۵۴	۱۰/۷۷۲	۰/۵	۲۰/۶	۳

ادامه جدول (۳-۵) بیشترین و کمترین ارتفاع مایع داخل مخزن بدون تیغه میراکننده

خطای نسبی برای کمترین ارتفاع مایع (%)	خطای نسبی برای بیشترین ارتفاع مایع (%)	کمترین	بیشترین	کمترین ارتفاع	بیشترین ارتفاع	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)
		ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	مایع (سانتیمتر)	مایع (سانتیمتر)			
		عددی		آزمایشگاهی				
۰/۱	۰/۹۸	۰/۵۹۵	۲۱/۲۴۸	۰/۵۹۴	۲۱/۰۴۳	۰/۶۷	۲۰/۶	۳
۲/۲۶	۲/۷۹	۳/۲۸۸	۱۴/۳۵۱	۳/۲۱۵	۱۴/۷۶۳	۰/۵	۲۰/۶	۵
۶/۷۷	۴/۹۴	۰/۸۰۱	۲۴/۸۸۲	۰/۸۵۹	۲۳/۷۱	۰/۶۷	۲۰/۶	۵
۸/۵۹	۰/۲۹	۱/۶۵	۱۵/۷۵۵	۱/۸۰۵	۱۵/۸۰۱	۰/۵	۲۰/۶	۶
۰/۱۲	۱/۷۴	۲/۶۴۶	۲۵/۸۳۴	۲/۶۴۹	۲۵/۳۹۲	۰/۶۷	۲۰/۶	۶
۰/۴۷	۰/۸۱	۵/۱۴۸	۱۸/۵۳۵	۵/۱۷۳	۱۸/۶۸۶	۰/۵	۲۰/۶	۷
۰/۷۱	۳/۵۳	۵/۱۷۹	۲۱/۹۲۶	۵/۱۴۲	۲۱/۱۷۸	۰/۵	۲۰/۶	۸
۴/۲۸	۰/۸۴	۷/۳۹۳	۲۳/۷۱۹	۷/۰۹	۲۳/۹۲	۰/۵	۲۰/۶	۹
۰/۳۷	۰/۲۲	۸/۲۲۱	۲۴/۰۴۹	۸/۲۵۲	۲۴/۱۰۱	۰/۵	۲۰/۶	۱۰
۰/۹۶	۲/۸۱	۹/۳۸۱	۲۵/۹۱۷	۹/۴۷۲	۲۵/۲۱	۰/۵	۲۰/۶	۱۱
۲/۱۳	۲/۳۹	۱۰/۲۲۴	۲۶/۸۰۴	۱۰/۴۴۷	۲۶/۱۷۷	۰/۵	۲۰/۶	۱۲
۱/۵۴	۰/۱	۱۱/۱۹۴	۲۷/۰۴۳	۱۱/۰۲۴	۲۷/۰۱۵	۰/۵	۲۰/۶	۱۳

جدول (۴-۵) بیشترین و کمترین ارتفاع مایع داخل مخزن با تیغه میراکننده

خطای نسبی برای کمترین ارتفاع مایع (%)	خطای نسبی برای بیشترین ارتفاع مایع (%)	کمترین	بیشترین	کمترین ارتفاع	بیشترین ارتفاع	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
		ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	مایع (سانتیمتر)	مایع (سانتیمتر)				
		عددی		آزمایشگاهی					
۱/۶۷	۶/۵۲	۲/۰۲۲	۴/۴۸۴	۲/۰۵۶	۴/۷۹۷	۰/۵	۸	۳	۶
۸/۵۱	۰/۱۵	۱/۳	۵/۰۸	۱/۴۲۱	۵/۰۸۸	۰/۶۷	۸	۳	۶
۸/۵	۷/۳۲	۰/۸۹۳	۱۰/۲۹۱	۰/۹۷۶	۹/۵۸۹	۱	۸	۳	۶
۶/۳۹	۳/۲	۳/۵۴۹	۶/۷۱	۳/۷۹۱	۶/۹۳۲	۰/۵	۸	۵	۶
۹/۷۲	۶/۹۳	۳/۵	۷/۳۱۶	۳/۱۹	۷/۸۶۱	۰/۶۷	۸	۵	۶
۶/۶۴	۵/۳۷	۲/۲۹	۱۳/۸۷۹	۲/۴۵۳	۱۳/۱۷۱	۱	۸	۵	۶
۰/۲۲	۷/۵۱	۵/۳۴۲	۶/۷۶۸	۵/۳۳	۷/۳۱۷	۰/۵	۸	۶	۶
۰/۹۹	۱/۰۸	۳/۹۳۱	۷/۴۹۶	۳/۹۷	۷/۵۷۸	۰/۶۷	۸	۶	۶
۳/۰۸	۲/۷	۶/۲۰۸	۸/۲۶۸	۶/۰۲۲	۸/۴۹۸	۰/۵	۸	۷	۶
۷/۱۹	۲/۰۶	۴/۵۳۸	۱۰/۲۶۲	۴/۸۹	۱۰/۰۵۵	۰/۶۷	۸	۷	۶
۱/۹۲	۱/۳۵	۱/۳۵۸	۵/۴۴۴	۱/۳۸۵	۵/۵۱۹	۰/۵	۱۵	۳	۶
۵/۸۵	۰/۲۸	۰/۴۹۹	۵/۶۲۱	۰/۵۳	۵/۶۳۷	۰/۶۷	۱۵	۳	۶
۲/۵۶	۰/۲۵	۰/۰۳۸	۱۵/۷۶۱	۰/۰۲۹	۱۵/۸۰۱	۱	۱۵	۳	۶
۷/۹۳	۷/۹۷	۳/۷۸۴	۷/۰۳۷	۳/۵۰۶	۷/۶۴۷	۰/۵	۱۵	۵	۶
۹/۸۸	۱/۳۳	۲/۴۹۸	۷/۸۵	۲/۷۷۲	۷/۹۵۶	۰/۶۷	۱۵	۵	۶
۳/۶۶	۳/۸۱	۴/۸۶۳	۷/۶۸۳	۴/۶۹۱	۷/۹۸۸	۰/۵	۱۵	۶	۶

ادامه جدول (۴-۵) بیشترین و کمترین ارتفاع مایع داخل مخزن با تیغه میراکننده

خطای نسبی برای کمترین ارتفاع مایع (%)	خطای نسبی برای بیشترین ارتفاع مایع (%)	کمترین	بیشترین	کمترین ارتفاع	بیشترین	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
		ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	مایع (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)				
		عددی		آزمایشگاهی					
۱/۰۷	۱/۳۸	۳/۱۰۵	۸/۶۶۷	۳/۱۳۹	۸/۵۴۹	۰/۶۷	۱۵	۶	۶
۰/۴۶	۰/۰۷	۵/۴۳۹	۱۰/۴۸۷	۵/۴۶۴	۱۰/۴۹۵	۰/۵	۱۵	۷	۶
۴/۱۹	۴/۴۸	۰/۹۸۷	۵/۵۷	۰/۹۴۷	۵/۸۳۲	۰/۵	۲۰/۶	۳	۶
۵/۸۵	۳/۵۹	۰/۹	۶/۸۱۸	۰/۹۵۶	۶/۵۸۲	۰/۶۷	۲۰/۶	۳	۶
۵/۲۱	۰/۰۹	۳/۴۰۴	۸/۱۰۵	۳/۲۳۵	۸/۱۱۲	۰/۵	۲۰/۶	۵	۶
۰/۷۸	۲/۷	۱/۰۱۱	۹/۶۶۹	۱/۰۱۹	۹/۹۳۸	۰/۶۷	۲۰/۶	۵	۶
۷/۶۱	۱/۸۸	۴/۱	۱۰/۲۲۶	۳/۸۱	۱۰/۴۲۲	۰/۵	۲۰/۶	۶	۶
۴/۲۷	۵/۰۵	۱/۲۷۹	۱۵/۳۰۲	۱/۲۲۷	۱۴/۵۶۶	۰/۶۷	۲۰/۶	۶	۶
۷/۸۶	۳/۱۳	۴/۸	۱۳/۷۱۱	۴/۴۵	۱۳/۲۹۵	۰/۵	۲۰/۶	۷	۶
۰/۷۸	۴/۱۵	۵/۷۴۸	۸/۸۱۶	۵/۷۹۳	۹/۱۹۸	۰/۵	۸	۷	۸
۱/۰۶	۰/۰۹	۵/۸۵۹	۹/۹۰۵	۵/۷۹۸	۹/۹۱۴	۰/۶۷	۸	۷	۸
۰/۶۸	۱/۴۳	۷/۰۴۲	۹/۱۸۳	۷/۰۹	۹/۳۱۶	۰/۵	۸	۸	۸
۰/۸۵	۶/۱۸	۶/۵۶۳	۹/۳۵۳	۶/۵۰۷	۹/۹۶۹	۰/۶۷	۸	۸	۸
۰/۲۴	۵/۹	۸/۱۰۶	۱۰/۲۶۸	۸/۰۸۶	۱۰/۹۱۱	۰/۵	۸	۹	۸
۹/۵۳	۰/۳۳	۶/۷۹۱	۱۱/۶۰۸	۷/۵۰۶	۱۱/۶۴۷	۰/۶۷	۸	۹	۸
۸/۵	۵/۷۱	۵/۷۲۳	۹/۴۷۷	۵/۲۷۵	۱۰/۰۵۱	۰/۵	۱۵	۷	۸
۲/۴۶	۱/۷	۴/۶۲۴	۱۱/۳۳۹	۴/۷۴۱	۱۱/۵۳۵	۰/۵	۱۵	۸	۸
۱/۹۱	۲/۱۸	۷/۳۶۹	۱۱/۵۱۲	۷/۲۳۱	۱۱/۷۶۹	۰/۵	۱۵	۹	۸
۷/۹۹	۸/۷۲	۵/۴۷۴	۹/۵۶	۵/۰۶۹	۱۰/۴۷۳	۰/۵	۲۰/۶	۷	۸
۰/۶	۴/۳	۵/۳۴۶	۱۱/۱۹۱	۵/۳۱۴	۱۱/۶۸۲	۰/۵	۲۰/۶	۸	۸
۴/۹	۱/۹۸	۷/۰۵۴	۱۲/۶۲۹	۶/۷۲۵	۱۲/۸۸۴	۰/۵	۲۰/۶	۹	۸
۰/۸۹	۰/۵۶	۷/۵۳۷	۱۱/۲۴۵	۷/۴۷	۱۱/۳۰۸	۰/۵	۸	۹	۱۰
۰/۷۸	۲/۱۶	۷/۴۳۷	۱۱/۶۲۱	۷/۴۹۶	۱۱/۸۷۷	۰/۶۷	۸	۹	۱۰
۲/۹۶	۲/۰۶	۸/۹۵۴	۱۱/۳۵۴	۸/۶۹۷	۱۱/۵۹۴	۰/۵	۸	۱۰	۱۰
۱/۳۶	۰/۳۳	۸/۳۹۵	۱۲/۰۹۳	۸/۵۱۱	۱۲/۰۵۴	۰/۶۷	۸	۱۰	۱۰
۳/۸۶	۱/۵۶	۹/۷۷۱	۱۳/۰۰۹	۱۰/۱۶۳	۱۲/۸۰۹	۰/۵	۸	۱۱	۱۰
۲/۷۵	۳/۰۷	۸/۴۸۶	۱۳/۲۳۳	۸/۷۲۶	۱۳/۶۵۲	۰/۶۷	۸	۱۱	۱۰
۶/۷	۷/۴۹	۷/۸۳	۱۰/۸۷۱	۷/۳۳۹	۱۱/۷۵۲	۰/۵	۱۵	۹	۱۰
۰/۲۶	۲/۲۶	۸/۵۲۹	۱۲/۳۹۷	۸/۵۰۷	۱۲/۱۲۳	۰/۵	۱۵	۱۰	۱۰
۰/۷۲	۱/۷۴	۹/۳۴۵	۱۳/۳۲۵	۹/۲۷۸	۱۳/۵۶۲	۰/۵	۱۵	۱۱	۱۰
۷/۷۹	۳/۲۸	۶/۸۱۱	۱۱/۹۳۸	۶/۳۱۹	۱۲/۳۴۳	۰/۵	۲۰/۶	۹	۱۰
۵/۴۳	۵/۶۳	۸/۴۸۹	۱۲/۴۵۷	۸/۰۵۲	۱۳/۲	۰/۵	۲۰/۶	۱۰	۱۰
۴/۳۳	۱/۴۴	۹/۱۴۲	۱۴/۹۵	۸/۷۶۳	۱۵/۱۶۹	۰/۵	۲۰/۶	۱۱	۱۰
۱/۸۶	۰/۷۴۵	۹/۸۷۹	۱۲/۷۹۴	۱۰/۰۶۶	۱۲/۸۹	۰/۵	۸	۱۱	۱۲
۲/۹۷	۰/۱۱	۹/۳۱۵	۱۳/۴۶۷	۹/۶۰۱	۱۳/۴۵۲	۰/۶۷	۸	۱۱	۱۲
۰/۶۲	۱/۵۳	۱۰/۷۴۲	۱۳/۳۶۴	۱۰/۶۷۶	۱۳/۵۷۳	۰/۵	۸	۱۲	۱۲
۱/۱۴	۴/۶۳	۹/۸۶۷	۱۳/۴۳۵	۹/۹۸۱	۱۴/۰۸۷	۰/۶۷	۸	۱۲	۱۲
۰/۴۱	۳/۹۵	۱۲/۱۳۵	۱۴/۶	۱۲/۰۸۵	۱۵/۲	۰/۵	۸	۱۳	۱۲

ادامه جدول (۴-۵) بیشترین و کمترین ارتفاع مایع داخل مخزن با تیغه میراکننده

خطای نسبی برای کمترین ارتفاع مایع (%)	خطای نسبی برای بیشترین ارتفاع مایع (%)	کمترین	بیشترین	کمترین ارتفاع	بیشترین	فرکانس حرکت (هرتز)	دامنه حرکت (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع تیغه (سانتیمتر)
		ارتفاع مایع (سانتیمتر)	ارتفاع مایع (سانتیمتر)	مایع (سانتیمتر)	مایع (سانتیمتر)				
		عددی		آزمایشگاهی					
۳/۸۹	۳/۰۹	۱۱/۴۹۷	۱۴/۹۵۷	۱۱/۹۶۳	۱۵/۴۳۵	۰/۶۷	۸	۱۳	۱۲
۳/۰۷	۳/۲۶	۹/۵۰۵	۱۳/۴۱۱	۹/۲۲۲	۱۳/۸۶۴	۰/۵	۱۵	۱۱	۱۲
۴/۸۸	۴/۵۳	۸/۴۷۱	۱۴/۱۷۱	۸/۹۰۶	۱۴/۸۴۴	۰/۵	۱۵	۱۲	۱۲
۲/۶	۰/۸۴	۱۱/۲۵۷	۱۵/۷۴۶	۱۱/۵۵۸	۱۵/۸۸	۰/۵	۱۵	۱۳	۱۲
۴/۸۲	۲/۳۴	۸/۴۹۷	۱۴/۳۰۴	۸/۱۰۶	۱۴/۶۴۸	۰/۵	۲۰/۶	۱۱	۱۲
۴/۶۲	۱/۷۴	۹/۹۴۲	۱۶/۰۵۳	۹/۵۰۳	۱۶/۳۳۷	۰/۵	۲۰/۶	۱۲	۱۲
۶/۷۸	۲/۳	۱۱/۳۸۲	۱۶/۹۶۲	۱۰/۶۶	۱۷/۳۶۲	۰/۵	۲۰/۶	۱۳	۱۲
۳/۶۱	۰/۹۴	۵/۵۲۱	۹/۹	۵/۳۲۹	۹/۹۹۴	۰/۵	۸	۷	۱۰
۴/۷	۱/۲۴	۵/۳۶۸	۹/۷۹۳	۵/۱۲۷	۹/۹۱۶	۰/۵	۸	۷	۱۲
۳/۱۱	۳/۶۵	۸/۰۳۶	۱۱/۶۱۹	۷/۷۹۴	۱۲/۰۶	۰/۵	۸	۹	۶
۵/۱۹	۲/۹۵	۷/۴۲	۱۱/۲۷۶	۷/۸۲۶	۱۰/۹۵۳	۰/۵	۸	۹	۱۲
۴/۱۷	۴/۶۸	۱۰/۱۱۸	۱۵/۹۹۱	۹/۷۱۳	۱۵/۲۷۶	۰/۵	۸	۱۱	۶
۲/۳۱	۰/۳۶	۹/۷۰۳	۱۳/۸۵۳	۹/۹۳۳	۱۳/۹۰۳	۰/۵	۸	۱۱	۸
۱/۲۶	۲/۱۷	۱۱/۱۸۱	۱۶/۶۸۷	۱۱/۳۲۴	۱۶/۳۳۳	۰/۵	۸	۱۳	۶
۲/۵۱	۳/۵۳	۱۲/۰۷۱	۱۶/۷۳۱	۱۱/۷۷۵	۱۶/۱۶۱	۰/۵	۸	۱۳	۸
۱/۱۶	۰/۰۲	۱۱/۷۷۶	۱۵/۳۱۴	۱۱/۹۱۵	۱۵/۳۱	۰/۵	۸	۱۳	۱۰

## ۵-۲- تحلیل نتایج

در جداول (۱-۵) و (۲-۵) در هر یک از حالت‌های انجام شده آزمایش به ترتیب با مخزن بدون تیغه میراکننده و با آن، شبیه‌سازی متناظر با آن و همچنین نمودار مقایسه‌ای سطوح آزاد حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی ارائه شده است که به صورت کیفی همخوانی قابل توجه نتایج شبیه‌سازی عددی را با بررسی آزمایشگاهی، به‌ویژه در ارزیابی نقاط بیشینه و کمینه در سطح آزاد، نشان می‌دهد. همانطور که از این جداول معلوم است، معمولاً بیشترین ارتفاع سطح آزاد در حالت تنظیم آزمایشی روی می‌دهد که کمترین ارتفاع سطح آزاد، روی داده است. این مساله با شناخت فیزیکی این پدیده بر اساس ارضای پیوستگی تطابق کامل داشته و کاملاً قابل انتظار است. لازم به ذکر است که زمان‌های ثبت شده در این جداول در واقع زمان‌های آزمایشگاهی ثبت شده‌ای می‌باشند که دو نقطه



بیشینه متوالی سطح آزاد، حاصل می‌شود.

مقدارهای عددی استخراج شده برای بیشترین و کمترین ارتفاع سطح آزاد مایع از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، همچنین خطای نسبی بیشترین و کمترین ارتفاع سطح آزاد مایع متلاطم بین این نتایج در جدول (۳-۵) برای مخزن بدون تیغه میراکننده و در جدول (۴-۵) برای مخزن با تیغه میراکننده ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در این جداول معلوم می‌شود که دامنه نوسانی تلاطم در بررسی‌های انجام شده، به جز یک مورد که در بخش (۲-۲-۵) این فصل بدان می‌پردازیم، مستقیماً به مقدار دامنه و فرکانس تحریک مخزن بستگی دارد.

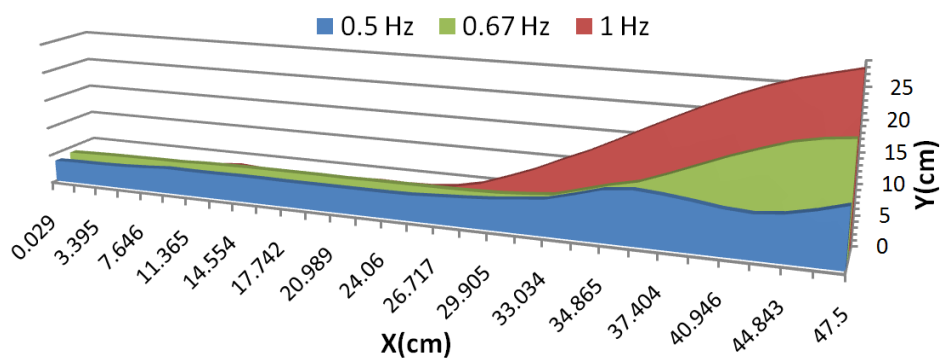
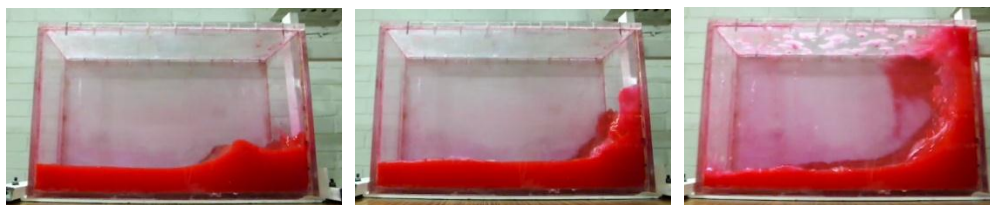
### ۵-۲-۱- خطای نسبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی (جداول (۳-۵) و (۴-۵)) مطابقت خوبی با هم داشته و در تمام حالت‌های مورد بررسی، خطای نسبی، کمتر از ده درصد به دست آمده است. بیشتر خطاهای نسبی نزدیک به ده درصد، مربوط به کمترین ارتفاع مایع می‌باشد که به دلیل کوچک بودن مخرج کسر (کمترین ارتفاع مایع) در محاسبه خطای نسبی روی می‌دهد، در حالی که نتایج حل عددی و آزمایشگاهی اختلاف کمی با یکدیگر دارند. با توجه به نتایج مقایسه‌ای کمی حاصل و مقادیر خطای به دست آمده به طور کلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که نتایج شبیه‌سازی عددی مطابقت بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. هر چند نتایج آزمایش‌های کیفی انجام شده با دامنه و فرکانس‌های بالاتر برای تحریک مخزن (که در اینجا منعکس نشده است)، نشان دهنده اختلاف بیشتر بین نتایج عددی و تجربی است که حضور و تاثیر رفتار غیرخطی در تلاطم سطح آزاد مایع را بیان می‌سازد.

### ۵-۲-۲- دامنه ثابت و فرکانس متغیر در حالت بدون تیغه

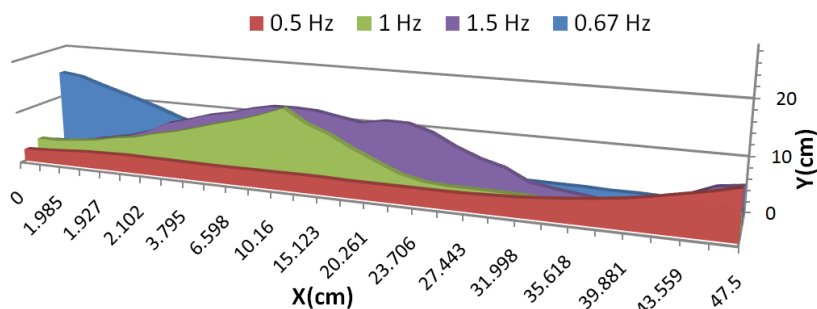
در آزمایش‌های انجام شده در یک دامنه ثابت با افزایش فرکانس، مقدار بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن در حالت بدون تیغه میراکننده به دلیل افزایش شتاب افقی مخزن افزایش می‌یابد. برای نمونه در شکل (۱-۵) هنگامی که ارتفاع مایع داخل مخزن، ۵ سانتیمتر است، مقدار بیشترین ارتفاع در دامنه ثابت ۸ سانتیمتر و در سه فرکانس ۰/۵، ۰/۶۷ و ۱ هرترز (به ترتیب از چپ به راست) نشان

داده شده است که رابطه مستقیم فرکانس تحریک با بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن را تصدیق می‌نماید. بیشترین میزان جابجایی در این آزمایش‌ها در محل دیواره‌ها صورت می‌گیرد.



شکل (۵-۱) تاثیر افزایش فرکانس بر بیشینه ارتفاع مایع در حالت بدون تیغه

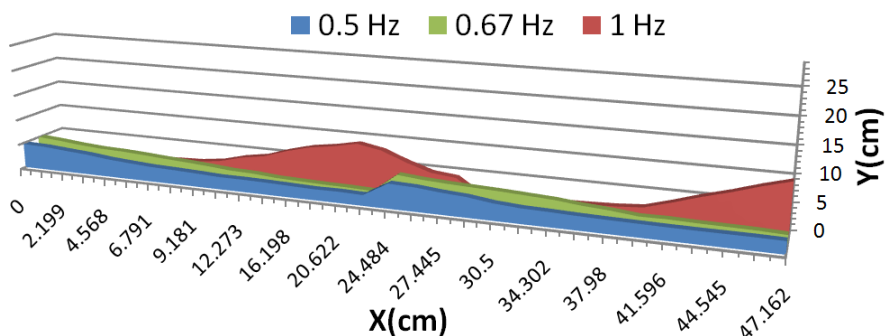
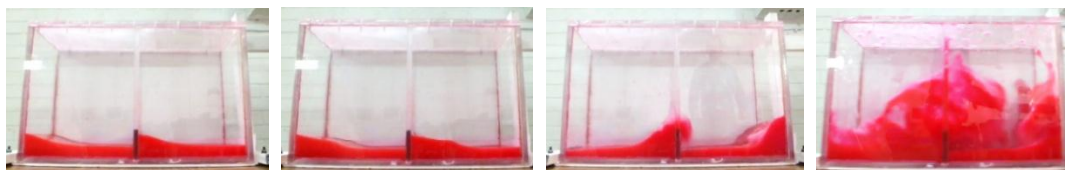
اما در این آزمایش‌ها، استثنایی مشاهده گردید که نشان می‌دهد افزایش فرکانس، همیشه باعث افزایش ارتفاع مایع نمی‌گردد. این استثنا در حالتی که ارتفاع مایع در داخل مخزن ۳ سانتیمتر (کمترین ارتفاع مایع در کل آزمایش‌ها) است، اتفاق افتاد. در این حالت همانطور که در شکل (۵-۲) نشان داده شده است در دامنه تحریک ثابت ۸ سانتیمتر با افزایش فرکانس تحریک از ۰/۵ تا ۰/۶۷ هرتز (به ترتیب از چپ به راست)، بیشترین ارتفاع مایع افزایش یافته اما با افزایش فرکانس تحریک تا ۱ و ۱/۵ هرتز، بیشترین ارتفاع مایع سیر نزولی پیدا کرده و کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش فرکانس، مایع داخل مخزن فرصت عکس‌العمل نشان دادن به حرکت مخزن را نداشته و پیش از آن که به ارتفاع بیشینه در یک نوسان برسد، نوسان بعدی شروع شده و در نتیجه بیشترین ارتفاع مایع متلاطم کاهش می‌یابد. در این حالت محل ایجاد بیشترین موقعیت سطح آزاد مایع در مخزن از دیواره‌ها به محلی در نزدیکی دیواره‌ها منتقل می‌شود.



شکل (۲-۵) کاهش ارتفاع بیشینه مایع با افزایش فرکانس

### ۵-۲-۳- دامنه ثابت و فرکانس متغیر در حالت با تیغه

در آزمایش‌های انجام شده در یک دامنه تحریک ثابت با افزایش فرکانس، مقدار جابجایی‌ها و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن در حالت با تیغه میراکننده به دلیل افزایش شتاب افقی مخزن افزایش می‌یابد. برای نمونه در شکل (۳-۵) هنگامی که ارتفاع مایع داخل مخزن، ۳ سانتیمتر و ارتفاع تیغه ۶ سانتیمتر است، مقدار بیشترین ارتفاع در دامنه ثابت ۸ سانتیمتر و در چهار فرکانس ۰/۵، ۰/۶۷، ۱ و ۱/۵ هرتز (به ترتیب از چپ به راست) نشان داده شده است که رابطه مستقیم فرکانس تحریک با بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن را تایید می‌نماید.



شکل (۳-۵) تاثیر افزایش فرکانس بر بیشینه ارتفاع مایع در حالت با تیغه

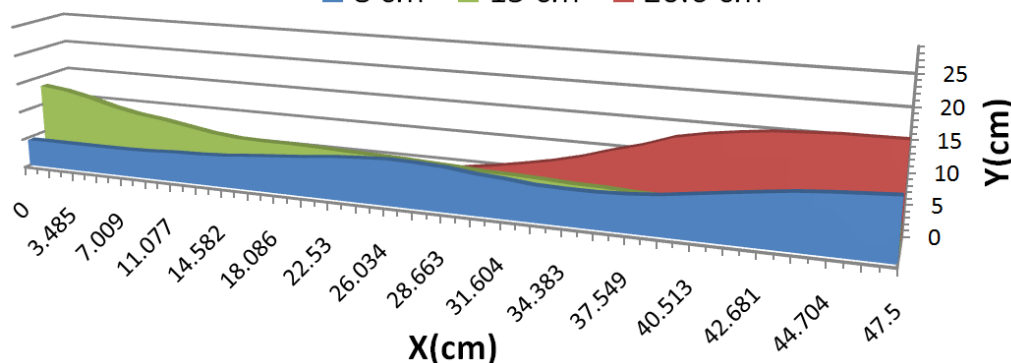
در این حالت با افزایش فرکانس تحریک، استثنایی مشاهده نشد اما این بدان معنا نیست که همواره با افزایش فرکانس، مقدار بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن در حالت با تیغه افزایش می‌یابد. چه بسا با افزایش مقدار فرکانس به بالاتر از  $1/5$  هرتز برای حالت گفته شده مقدار ارتفاع بیشینه بنا به دلیلی که پیش‌تر ذکر شد کاهش یابد. لازم به ذکر است انجام این آزمایش با فرکانسی بیشتر از  $1/5$  هرتز با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی امکان‌پذیر نبود. در این حالت بیشترین میزان جابجایی در محل دیواره‌ها و یا در نزدیکی محل تیغه میراکننده شکل می‌گیرد.

#### ۴-۲-۵- فرکانس ثابت و دامنه متغیر در حالت بدون تیغه

در آزمایش‌های انجام شده در یک فرکانس تحریک ثابت با افزایش دامنه، مقدار بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن بدون تیغه میراکننده به دلیل افزایش شتاب افقی مخزن افزایش می‌یابد. برای نمونه در شکل (۴-۵) هنگامی که ارتفاع مایع داخل مخزن، ۶ سانتیمتر است، مقدار بیشترین ارتفاع در فرکانس ثابت  $0/5$  هرتز و در سه دامنه ۸، ۱۵ و  $20/6$  سانتیمتر (به ترتیب از چپ به راست) نشان داده شده است که رابطه مستقیم دامنه تحریک با بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن را تصدیق می‌نماید.



■ 8 cm ■ 15 cm ■ 20.6 cm

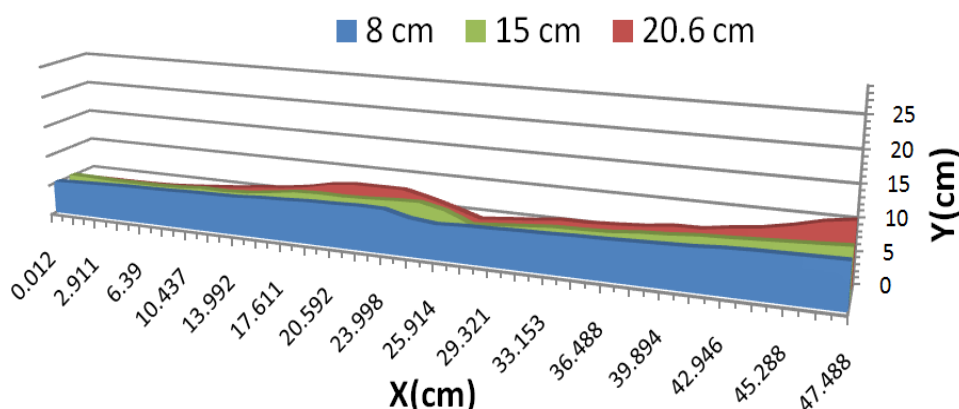
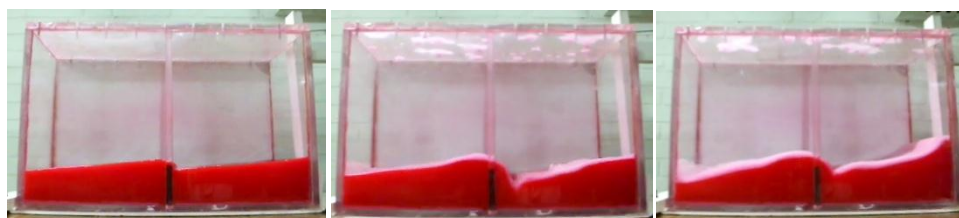


شکل (۴-۵) تاثیر افزایش دامنه بر بیشینه ارتفاع مایع در حالت بدون تیغه

در این حالت نیز با افزایش دامنه تحریک، استثنایی مشاهده نشد اما این بدان معنا نیست که همواره با افزایش دامنه، مقدار بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن در حالت بدون تیغه افزایش می‌یابد. چه بسا با افزایش مقدار دامنه حرکت به بالاتر از  $20/6$  سانتیمتر، برای حالت گفته شده مقدار ارتفاع بیشینه کاهش یابد. لازم به ذکر است انجام این آزمایش با دامنه‌ای بیشتر از  $20/6$  سانتیمتر با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی امکان‌پذیر نبود. لازم به ذکر است بیشترین میزان جابجایی در این آزمایش‌ها در محل دیواره‌ها صورت می‌گیرد.

### ۵-۲-۵- فرکانس ثابت و دامنه متغیر در حالت با تیغه

در آزمایش‌های انجام شده در یک فرکانس تحریک ثابت با افزایش دامنه، میزان بیشینه ارتفاع مایع درون مخزن با تیغه میراکننده به دلیل افزایش شتاب افقی مخزن افزایش می‌یابد. برای نمونه در شکل (۵-۵) هنگامی که ارتفاع مایع داخل مخزن و تیغه،  $6$  سانتیمتر است، مقدار بیشترین ارتفاع در فرکانس ثابت  $0/5$  هرتز و در سه دامنه  $8$ ،  $15$  و  $20/6$  سانتیمتر (به ترتیب از چپ به راست) نشان داده شده است که رابطه مستقیم دامنه تحریک با بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن را نشان می‌دهد.



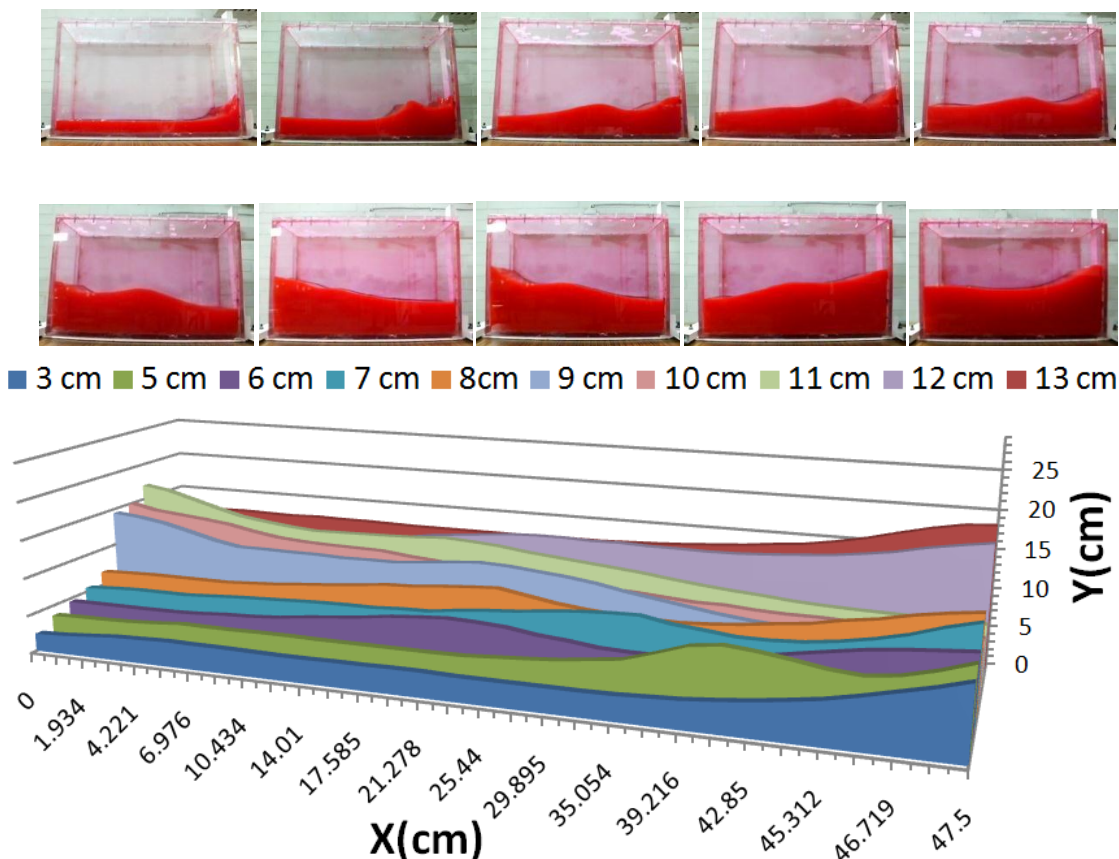
شکل (۵-۵) تاثیر افزایش دامنه بر بیشینه ارتفاع مایع در حالت با تیغه

در این حالت نیز با افزایش دامنه تحریک، استثنایی مشاهده نشد اما این بدان معنا نیست که

همواره با افزایش دامنه، مقدار بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن در حالت با تیغه افزایش می‌یابد. چه بسا با افزایش مقدار دامنه حرکت به بالاتر از  $20/6$  سانتیمتر برای حالت گفته شده مقدار ارتفاع بیشینه کاهش یابد. لازم به ذکر است انجام این آزمایش‌ها با دامنه‌ای بیشتر از  $20/6$  سانتیمتر با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی امکان‌پذیر نبود. همچنین بیشترین میزان جابجایی در محل دیواره‌ها و یا در نزدیکی محل تیغه میراکننده شکل می‌گیرد.

#### ۵-۲-۶- دامنه و فرکانس ثابت و ارتفاع مایع متغیر در حالت بدون تیغه

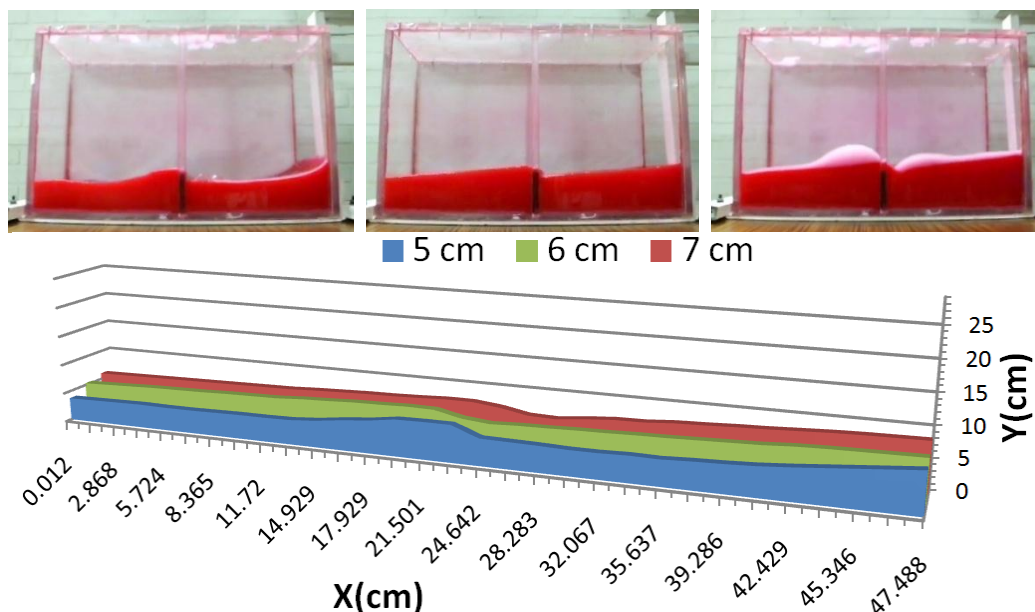
در آزمایش‌های انجام شده در یک دامنه و فرکانس تحریک ثابت، با افزایش ارتفاع مایع داخل مخزن بدون تیغه، مقدار بیشترین ارتفاع مایع افزایش می‌یابد. مقدار کمترین ارتفاع مایع نیز با افزایش ارتفاع مایع داخل مخزن ممکن است برای یک یا چند حالت به دلیل خطا در آزمایش و پردازش تصویر یا به دلیل پیچیدگی‌های جریان متلاطم و شکست موج کاهش یابد اما در کل سیر صعودی دارد. برای نمونه در شکل (۵-۶) هنگامی که دامنه حرکت ۸ سانتیمتر و فرکانس تحریک  $0/5$  هرتز است، مقدار بیشترین و کمترین ارتفاع مایع در ارتفاع‌های مختلف مایع درون مخزن که شامل ۳ و ۵ تا ۱۳ سانتیمتر است (به ترتیب از چپ به راست) نشان داده شده که رابطه مستقیم ارتفاع مایع با بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن را بیان می‌کند. بیشترین میزان جابجایی در این آزمایش‌ها در محل دیواره‌ها صورت می‌گیرد.



شکل (۵-۶) تاثیر افزایش ارتفاع مایع بر جابجایی ارتفاع مایع در حالت بدون تیغه

### ۵-۲-۷- دامنه، فرکانس و ارتفاع تیغه ثابت و ارتفاع مایع متغیر

در آزمایش‌های انجام شده در یک دامنه و فرکانس تحریک ثابت که ارتفاع تیغه نیز ثابت می‌باشد، با افزایش ارتفاع مایع داخل مخزن، مقدار بیشترین و کمترین ارتفاع مایع افزایش می‌یابد. برای نمونه در شکل (۵-۷) هنگامی که دامنه حرکت ۸ سانتیمتر، فرکانس تحریک ۰/۵ هرتز و ارتفاع تیغه ۶ سانتیمتر است، مقدار بیشترین و کمترین ارتفاع مایع در ارتفاع‌های مختلف مایع درون مخزن که ۵، ۶ و ۷ سانتیمتر (به ترتیب از چپ به راست) است، نشان داده شده که رابطه مستقیم ارتفاع مایع با بیشترین و کمترین ارتفاع مایع درون مخزن را بیان می‌کند. بیشترین میزان جابجایی در محل دیواره‌ها و یا در نزدیکی محل تیغه میراکننده شکل می‌گیرد.

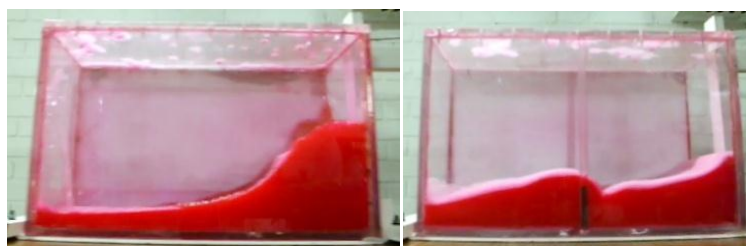


شکل (۵-۷) تاثیر افزایش ارتفاع مایع بر جابجایی ارتفاع مایع در حالت با تیغه

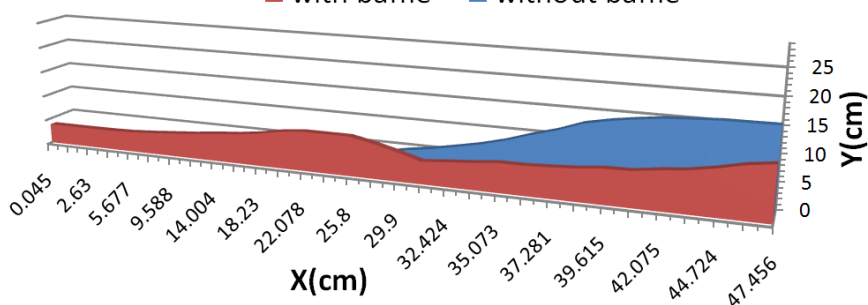
#### ۵-۲-۸- تاثیر تیغه میراکننده (بافل) بر تلاطم

در بررسی نتیجه آزمایش‌های مخزن تیغه‌دار و مقایسه آن با حالت تحریک مشابه بدون تیغه مشاهده می‌شود مقدار بیشترین ارتفاع سطح آزاد مایع نسبت به حالت بدون تیغه (بین تمام حالت‌های مورد بررسی) کاهش یافته است. این در حالی است که مقدار کمترین ارتفاع سطح آزاد مایع نسبت به حالت بدون تیغه نسبتاً تغییری نکرده است، که این مساله نشان دهنده کاهش اثر تلاطم به دلیل وجود تیغه مذکور می‌باشد. برای نمونه در شکل (۵-۹) هنگامی که ارتفاع مایع داخل مخزن، ۶ سانتیمتر است، مقدار بیشترین ارتفاع مایع در فرکانس ۰/۵ هرتز و دامنه ۲۰/۶ سانتیمتر در دو حالت بدون تیغه و با آن (به ترتیب از چپ به راست) نشان داده شده است که بیانگر کاهش اثر تلاطم به دلیل حضور تیغه می‌باشد.



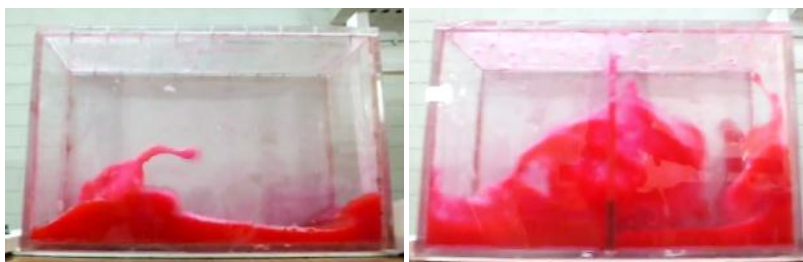


■ with baffle    ■ without baffle



شکل (۵-۸) تاثیر تیغه میراکننده در کاهش تلاطم

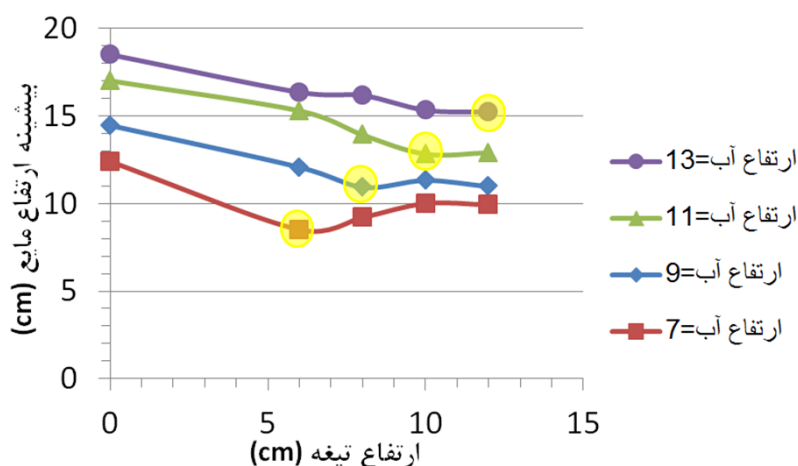
همانطور که پیشتر گفته شد دو عامل دامنه و فرکانس تحریک مخزن با میزان جابجایی و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن در دو حالت با تیغه و بدون آن رابطه مستقیم دارند. افزایش جابجایی و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن با افزایش دامنه و فرکانس در حالت بدون تیغه بیشتر از مخزن با تیغه میراکننده می‌باشد. به عبارت دیگر وجود تیغه میراکننده در داخل مخزن تاثیر افزایش دامنه و فرکانس تحریک را در افزایش جابجایی و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن کاهش می‌دهد. البته در مورد تاثیر تیغه در کاهش تلاطم یک استثنا نیز مشاهده گردید. این استثنا هنگامی ارتفاع مایع داخل مخزن تیغه‌دار، ۳ سانتیمتر (کمترین ارتفاع مایع در کل آزمایش‌ها) می‌باشد اتفاق افتاد به این صورت که در دامنه ثابت ۸ سانتیمتر با افزایش فرکانس تحریک از ۱ به ۱/۵ هرتز نسبت به حالت بدون تیغه، تیغه میراکننده بیشتر باعث آشفته‌گی مایع داخل مخزن گردید (شکل (۵-۱۰)).



شکل (۵-۹) آشفته‌گی مایع داخل مخزن به دلیل حضور تیغه

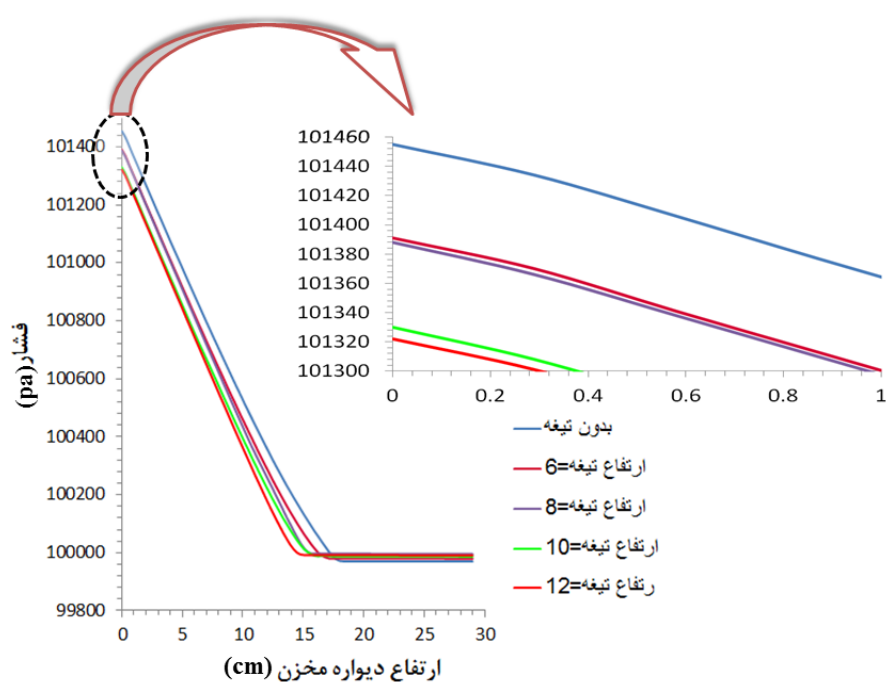
## ۵-۲-۹- ارتفاع بهینه تیغه میراکننده

در یک دامنه و فرکانس تحریک ثابت که ارتفاع مایع داخل مخزن نیز ثابت می‌باشد، آزمایش را با چهار تیغه ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتیمتری و بدون تیغه انجام داده و میزان بیشینه ارتفاع مایع را در هر حالت بدست آوردیم. کمترین مقدار بدست آمده برای بیشترین ارتفاع مایع، نشان دهنده ارتفاع بهینه تیغه برای آن حالت خاص می‌باشد. برای نمونه آزمایش را در دامنه حرکت ۸ سانتیمتر و فرکانس ۰/۵ هرتز، وقتی ارتفاع مایع داخل مخزن ۷ سانتیمتر است برای چهار تیغه مختلف و همچنین بدون تیغه انجام دادیم. این آزمایش‌ها را برای ارتفاع‌های مختلف مایع که شامل ۹، ۱۱ و ۱۳ سانتیمتر می‌باشد نیز تکرار کردیم. همانطور که از شکل (۵-۱۰) مشهود است ارتفاع تیغه بهینه برای ارتفاع ۷ سانتیمتری از مایع، ۶ سانتیمتر است که ۱ سانتیمتر کمتر از سطح مایع می‌باشد. ارتفاع تیغه بهینه برای ارتفاع ۹ سانتیمتری از مایع، ۸ سانتیمتر است که در این حالت نیز ۱ سانتیمتر کمتر از سطح مایع می‌باشد. ارتفاع تیغه بهینه برای مایع ۱۱ سانتیمتری، ۱۰ سانتیمتر است که باز هم ۱ سانتیمتر کمتر از سطح مایع می‌باشد. ارتفاع تیغه بهینه برای مایع ۱۳ سانتیمتری، ۱۲ سانتیمتر است که در این حالت نیز ۱ سانتیمتر کمتر از سطح مایع می‌باشد. از بین چهار تیغه مورد بررسی، تیغه‌ای که ۱ سانتیمتر کوتاهتر از سطح مایع می‌باشد بیشترین تاثیر را در کاهش بیشینه ارتفاع و جابجایی مایع دارد.



شکل (۵-۱۰) تاثیر ارتفاع تیغه بر بیشینه ارتفاع مایع

با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM فشار هیدرواستاتیکی وارد بر دیواره مخزن، در حالت بدون تیغه و با تیغه‌های مختلف را بدست آوردیم که، نتایج بدست آمده برای ارتفاع بهینه تیغه را تایید می‌کند. برای نمونه در دامنه حرکت ۸ سانتیمتر و فرکانس ۰/۵ هرتز، وقتی ارتفاع مایع داخل مخزن ۱۳ سانتیمتر است فشار هیدرواستاتیکی وارد بر دیواره مخزن را در حالت بودن تیغه و با تیغه با ارتفاع‌های مختلف، در شکل (۵-۱۱) آورده شده است که نشان دهنده تاثیر بیشتر تیغه ۱۲ سانتیمتری در کاهش فشار وارد بر دیواره مخزن دارد.



شکل (۵-۱۱) تاثیر ارتفاع تیغه بر کاهش فشار هیدرواستاتیکی وارد بر دیواره مخزن

فصل ششم

جمع بندی و پیشنهادها

## ۶-۱- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پایان‌نامه استخراج شکل سطح آزاد مایع متلاطم در دو حالت مخزن بدون تیغه میراکننده و با تیغه- با ارتفاع‌های مختلف- و با ارتفاع‌های مختلف مایع به منظور یافتن نقاط کمینه و بیشینه در شرایط مختلف تحریک مخزن، با استفاده از روش عددی کسر حجمی سیال انجام شده است. نتایج حاصل با یافته‌های حاصل از مطالعه آزمایشگاهی، در مجموعه‌ای که به همین منظور ساخته شده، مقایسه شده‌اند.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی با هم داشته و تمام حالت‌های مورد بررسی با خطای نسبی کمتر از ده درصد به دست آمده است. بیشتر خطاهای نسبی نزدیک به ده درصد، مربوط به کمترین ارتفاع مایع می‌باشد که به دلیل کوچک بودن مخرج کسر در محاسبه خطای نسبی روی می‌دهد، در حالی که نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی اختلاف اندکی با یکدیگر دارند. در یک فرکانس ثابت تحریک، با افزایش دامنه، مقدار جابجایی‌ها و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن در دو حالت با تیغه میراکننده و بدون آن افزایش می‌یابد. همچنین در یک دامنه ثابت تحریک با افزایش فرکانس نیز، مقدار جابجایی‌ها و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن در دو حالت با تیغه میراکننده و بدون آن افزایش می‌یابد. بنابراین دو عامل دامنه و فرکانس تحریک مخزن با میزان جابجایی و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن در دو حالت ذکر شده رابطه مستقیم دارند. البته لازم به ذکر است که این افزایش جابجایی و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن در حالت بدون تیغه بیشتر از مخزن با تیغه میراکننده می‌باشد. به عبارت دیگر وجود تیغه میراکننده در داخل مخزن تاثیر افزایش دامنه و فرکانس تحریک را در افزایش جابجایی و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن کاهش می‌دهد. البته در این آزمایش‌ها برای رابطه مستقیم فرکانس تحریک با میزان جابجایی و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن، یک مورد استثنا نیز مشاهده گردید. این مورد در حالتی روی داد که ارتفاع مایع در داخل مخزن بدون تیغه، کمترین ارتفاع مایع در کل آزمایش‌ها

بود. در این حالت در دامنه تحریک ثابت ۸ سانتیمتر با افزایش فرکانس تحریک از ۰/۵ تا ۰/۶۷ هرتز، بیشترین ارتفاع مایع افزایش می‌یابد اما با افزایش فرکانس تحریک تا ۱ و ۱/۵ هرتز، بیشترین ارتفاع مایع سیر نزولی پیدا کرده و کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش فرکانس، مایع داخل مخزن فرصت عکس‌العمل نشان دادن به حرکت مخزن را نداشته و پیش از آن که به ارتفاع بیشینه در یک نوسان برسد، نوسان بعدی شروع شده و در نتیجه بیشترین ارتفاع مایع متلاطم کاهش می‌یابد. در این حالت محل ایجاد بیشترین موقعیت سطح آزاد مایع در مخزن نیز از دیواره‌ها به محلی در نزدیکی دیواره‌ها منتقل می‌شود. استفاده از تیغه میراکننده یا بافل نیز در داخل مخزن به طور قابل ملاحظه- ای بر این جابجایی‌ها تاثیر می‌گذارد و مقدار ارتفاع بیشینه در سطح آزاد مایع متلاطم را به شدت کاهش می‌دهد. به طوری که در یک دامنه و فرکانس تحریک مشابه، بیشترین ارتفاع مایع متلاطم به طور متوسط حدود چهل درصد کاهش را نسبت به حالت بدون تیغه نشان می‌دهد. البته در این مورد در آزمایش‌های انجام شده، یک مورد استثنا نیز مشاهده گردید. این استثنا وقتی ارتفاع مایع داخل مخزن تیغه‌دار، کمترین ارتفاع مایع در کل آزمایش‌ها می‌باشد اتفاق می‌افتاد، به این صورت که در دامنه ثابت ۸ سانتیمتر با افزایش فرکانس تحریک از ۱ به ۱/۵ هرتز نسبت به حالت بدون تیغه، تیغه میراکننده بیشتر باعث آشفستگی مایع داخل مخزن می‌گردد.

بیشترین میزان جابجایی در این آزمایش‌ها در حالت بدون تیغه میراکننده در محل دیواره‌ها صورت می‌گیرد. همچنین بیشترین میزان جابجایی در حالت با تیغه میراکننده در محل دیواره‌ها و یا در نزدیکی محل تیغه میراکننده شکل می‌گیرد. مخزن تیغه‌دار تا حدودی مشابه آن است که مخزن به دو قسمت کوچکتر تقسیم شده و سیال از قسمتی به قسمت دیگر منتقل می‌گردد.

در آزمایش‌های انجام شده، ارتفاع تیغه بهینه برای مخزن و تیغه‌های طراحی شده، حالتی است که ارتفاع تیغه، ۱ سانتیمتر کمتر از سطح مایع داخل مخزن می‌باشد. در این حالت بیشینه ارتفاع مایع و فشار هیدرواستاتیکی وارد بر دیواره مخزن کمترین مقدار می‌باشد. در این حالت در هنگام عبور مایع از روی تیغه به دلیل ایجاد گردابه‌هایی در نزدیکی تیغه، تلاطم مایع و فشار وارد بر مخزن کاهش می‌-

یابد.

## ۶-۲- پیشنهادها

آزمایش‌های انجام شده را می‌توان با بهبود تجهیزات ساخته شده در دامنه‌ها و فرکانس‌های بیشتری انجام داد. این آزمایش‌ها را می‌توان با مخازن با اشکال هندسی پیچیده‌تر نیز انجام داد و تاثیر هر یک را بر تلاطم مایع داخل مخزن مورد بررسی قرار داد. همچنین مطالعه آزمایشگاهی را می‌توان برای جنس و شکل‌های مختلف تیغه میراکننده و تغییر محل نصب آن در مخزن انجام داد و حالت‌های بهینه برای جنس، شکل و محل نصب تیغه در مخزن کنونی را تحقیق نمود. حتی می‌توان با نصب حسگرهای فشار بر روی دیواره‌های مخزن و تیغه به مطالعه فشارهای وارده توسط مایع متلاطم بر مخزن و تیغه پرداخت.

با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار منبع باز OpenFOAM در توسعه کد مذکور، امکان مدل‌سازی تقابل سازه-سیال در ادامه این پایان‌نامه نیز میسر خواهد بود و می‌توان تاثیر مخزن و تیغه کشسان (کشسان کم) را در رفتار مایع متلاطم به صورت عددی بررسی نمود.

## پیوست ۱

### مشخصه‌های موتور DC SM 2641

شماره سریال: ۳۴۶۹۸

بیشترین دمای کاری: ۱۵۵ درجه سانتیگراد

#### حالت موتوری

توان: ۰/۴ کیلو وات

سرعت: ۱۵۰۰ دور در دقیقه

ولتاژ: ۱۶۰ ولت

جریان: ۳/۵ آمپر

#### حالت ژنراتوری

توان: ۰/۴ کیلو وات

سرعت: ۱۸۰۰ دور در دقیقه

ولتاژ: ۱۹۰ ولت

جریان: ۰/۱۵ آمپر



## پیوست ۲

### مشخصه‌های دوربین دیجیتال Fujifilm FinePix HS20

این دوربین عکاسی نیمه حرفه‌ای، مجهز به لنز Super EBC Fujinon با بزرگنمایی اپتیکال سی برابر می‌باشد. از ویژگی‌های این دوربین می‌توان به سنسور ۱۶ مگاپیکسلی EXR CMOS و سیستم فیلم-برداری Full HD و دارا بودن فرمت عکاسی RAW و صفحه نمایش چرخشی ۳ اینچ اشاره کرد.

#### مشخصات لنز:

فاصله کانونی لنز: ۲۴ تا ۷۲۰ میلی‌متر

زوم اپتیکال: ۳۰ برابر

لرزشگر: دارد

فوکس دستی و اتوماتیک: دارد

ماکرو: دارد- ۱ سانتی‌متر

نورسنجی: نقطه‌ای، میانگین، چندگانه، ۲۵۶ ناحیه TLT

زوم اپتیکال در حین فیلمبرداری: دارد

#### مشخصات حسگر:

نوع حسگر: CMOS EXR

پیکسل: ۱۶ مگاپیکسل

ابعاد حسگر: ۱ در ۲ اینچ

اندازه تصویر: ۱۹۲۰×۱۰۸۰ تا ۴۶۰۸×۳۴۵۶

فرمت RAW: دارد

#### فیلمبرداری:

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: اتوماتیک، ۸۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۳۲۰۰، ۱۶۰۰ و ۱۲۸۰۰

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

عکاسی پی‌درپی: دارد، با سرعت ۸ فریم در ثانیه

فلاش: داخلی با برد ۷ متر

تکنولوژی‌های بکار رفته: تشخیص چهره، کاهش قرمزی چشم

### مانیتور:

اندازه مانیتور: ۳ اینچ چرخشی

دقت صفحه نمایش: ۴۶۰۰۰۰ پیکسل

چشمی: دارد

### حافظه:

نوع کارت حافظه: SD / SDHC / SDXC

کارت حافظه داخلی: ۲۰ مگا بایت

- [1] 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.
- [2] Liu D, Lin P. (2009) "Three-dimensional liquid sloshing in a tank with baffles" **Ocean Eng**, 36:202-12.
- [3] 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 loads by numerical simulations" **Ocean Eng**, 34:3-9.
- [4] 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 roll comparison between experimental results and SPH" **Ocean Eng**, 36:168-78.
- [5] Aliabadi S, Johnson A and Abedi J. (2003) "Comparison of finite element and pendulum models for simulation of sloshing" **Comput Fluids**, 32:535-45.
- [6] 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.
- [7] Wei W, Junfeng L and Tianshu W. (2008) "Modal analysis of liquid sloshing with different contact line boundary conditions using FEM" **J Sound Vib**, 317:739-59.
- [8] 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. 20:762-9.
- [9] Mitra S and Sinhamahapatra K.P. (2008) "2D simulation of fluid-structure interaction using finite element method" **Finite Elem Anal Des**, 45:52-9.

- [10] Shekari M.R, Khaji N and Ahmadi M.T. (2009) “A coupled BE-FE study for evaluation of seismically isolated cylindrical liquid storage tanks considering fluid-structure interaction” **J Fluids Struct**, 25:567-85.
- [11] 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**, 27:855-63.
- [12] 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,80:181-5.
- [13] Popov G, Sankar S, Sankar T.S and Vastistas V.H. (1992) “Liquid sloshing in rectangular road containers” **Comput Fluids**, 21:551-69.
- [14] Akkose M, Adanur S, Bayraktar A and Dumannoglu A.A. (2008) “Elasto-plastic earthquake response of arch dams including fluid-structure interaction by the Lagrangian approach” **Appl Math Model**, 32:2396-412.
- [15] 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.
- [16] Liu D, Lin P. (2008) “A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks” **J Comput Phys**, 227:3921-39.
- [17] Akyildiz H and Unal N.E. (2006) “Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: numerical simulation and experimental validation” **Ocean Eng**, 33: 2135-49.
- [18] Mitra S and Sinhamahapatra K.P. (2007) “Slosh dynamics of liquid-filled containers with submerged components using pressure-based finite element method” **J Sound Vib**, 304:361-81.
- [19] Chen Y.G, Djidjeli K and Price W.G. (2009) “Numerical simulation of liquid sloshing phenomena in partially filled containers” **Comput Fluids**, 38:830-42.
- [20] Eswaran 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.

- [21] Schotte J-S and Ohayon R. (2009) “Various modeling levels to represent internal liquid behavior in the vibration analysis of complex structures” **Comput Methods Appl Mech Eng**, 198:1913-25.
- [22] Virella J.C, Godoy L.A and Suarez L.E. (2006) “Fundamental modes of tank-liquid systems under horizontal motions” **Eng Struct**, 28:1450-61.
- [23] 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**, 36:213-22.
- [24] Abramson H.N. (1966) “**The Dynamic Behavior of Liquid in Moving Containers**” NASA Sp-106. Southwest Research Institute for the National Aeronautics and Administration.
- [25] Abramson H.N. (1968) “**Propellant Slosh Loads**” NASA SP8009.
- [26] Ibrahim A.R. (2005) “**Liquid sloshing dynamics**” Cambridge University Press; [ISBN: 9780521838856].
- [27] 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.
- [28] Godderidge B, Turnock S, Tan M, Earl C. (2008) “An investigation of multiphase CFD modelling of a lateral sloshing tank” **Comput Fluids**, 38:183–93.
- [29] Chen Y.G, Djidjeli K and Price W.G. (2008) “Numerical simulation of liquid sloshing phenomena in partially filled containers” **Comput Fluids**, 38:830-842.
- [30] Wu C-H and Chen B-F. (2009) “Sloshing waves and resonance modes of fluid in a 3D tank by a time-independent finite difference method” **Ocean Eng**, 36:500-10.
- [31] Faltinsen M.O and Timokha A.N. (2009) “**Sloshing**” Cambridge University Press, [ISBN: 9780521881111].

- [32] Pal P and Bhattacharyya S.K. (2010) “Sloshing in partially filled liquid containers-Numerical and experimental study for 2-D problems” **J Sound Vib**, 329:4466-85.
- [33] Firouz-Abadi R.D, Haddadpour H and Ghasemi M. (2009) “Reduced order modeling of liquid sloshing in 3D tanks using boundary element method” **Eng Anal Bound Elem**, 33:750-61.
- [34] Pirker S, Aigner A and Wimmer G. (2011) “Experimental and numerical investigation of sloshing resonance phenomena in aspring-mounted rectangular tank” **Chem Eng Scien**.
- [35] 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**.
- [36] 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.
- [37] Thiagarajan 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.
- [38] Nasar T, Sannasiraj S.A and Sundar V. (2008) “Experimental study of liquid sloshing dynamics in a barge carrying tank” **Fluid Dynam Res**, 40:427-58.
- [39] 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**, 38:1823-30.
- [40] Maleki A, Ziyaeifar M. (2007) “Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles” **J Sound Vib**, 311:372-85.
- [41] Hasheminejad S.M and Aghabeigi M. (2009) “Liquid sloshing in half-full horizontal elliptical tanks” **J Sound Vib**, 324:332-49.
- [42] Hasheminejad S.M and Aghabeigi M. (2011) “Sloshing characteristics in half-full horizontal elliptical tanks with vertical baffles” **Appl Math Model**, 36:57-71.

- [43] Hasheminejad S.M and Aghabeigi M. (2011) “Transient sloshing in half-full horizontal elliptical tanks under lateral excitation” **J Sound Vib**, 330:3507-25.
- [44] Hasheminejad S.M and Mohammadi M.M. (2010) “Effect of anti-slosh baffles on free liquid oscillations in partially filled horizontal circular tanks” **Ocean Eng.**
- [45] Belakroum R, Kadja M, Mai T.H and Maalouf C. (2010) “An efficient passive technique for reducing sloshing in rectangular tanks partially filled with liquid” **Mech Res Com**, 37:341-46.
- [46] Zhao H.E, Ren-chuan Z.H.U and Guo-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.
- [47] 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.
- [48] Sygulski R. (2011) “Boundary element analysis of liquid sloshing in baffled tanks” **Eng Anal Bound Elem**, 35:978-83.
- [49] Biswal K.C and Bhattacharyya S.K. (2010) “Dynamic response of structure coupled with liquid sloshing in laminated composite cylindrical tank with baffle” **Finite Elem Anal Des**, 46:966-81.
- [50] Zahrai S.M, Abbasi S, Samali B and Vrcelj Z. (2011) “Experimental investigation of utilizing TLD with baffles in a scaled down 5-story benchmark building” **J Fluids Struct.**
- [51] Xue M-A, Lin P. (2011) “Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid sloshing” **Comput Fluids**, 52:116-29.
- [52] SriramV, Sannasiraj SA and Sundar V. (2006) “Numerical simulation of 2D sloshing waves due to horizontal and vertical random excitation” **Appl Ocean Res**, 28:19-32.
- [53] Lee C.J.K, Noguchi H and Koshizuka S. (2007) “Fluid–shell structure interaction analysis by coupled particle and finite element method” **Comput Struct**, 85:688-97.

- [54] Aus Der Wiesche S. (2008) "Sloshing dynamics of a viscous liquid in a spinning horizontal cylindrical tank" **Aerosp Sci Technol**, 12:448-56.
- [55] Wall A.W, Genkinger S and Ramm E. (2007) "A strong coupling partitioned approach for fluid-structure interaction with free surfaces" **Comput Fluids**, 36:169-83.
- [56] Yang C, Lohner R and Lu H. (2006) "An unstructured-grid based volume-of-fluid method for extreme wave and freely-floating structure interactions" **J Hydrodynam**, Ser B, 18:415-22.
- [57] Rawson K.J and Tupper E.C. (2001) "**Basic Ship Theory**" Volume 2, 5th edn, 457. ISBN:0750653973.
- [58] Ekedahl E. (2008) "6-DOF VOF-solver without Damping in OpenFOAM, Project work for the Phd course" **CFD with Open Source Software**. Chalmers University of Technology.
- [59] <http://www.cfd-online.com/Forums/openfoam>

[۶۰] سررشته‌داری ع، (۱۳۸۱)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "تحلیل اثر پدیده تلاطم در مخازن

استوانه‌ای"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.



**Abstract:**

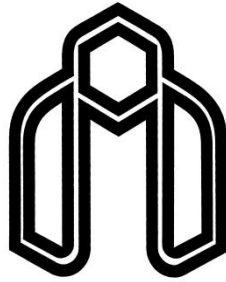
Free surface sloshing of liquid in a rectangular tank induced by lateral excitation with different heights of baffle in the middle of the tank and without it has been studied numerically and experimentally in this thesis.

The numerical simulation is carried out based on the volume of fluid (VOF) method that provides free surface extraction in such problem.

Two tank with transparent walls, with baffle and without baffle, is used to free surface tracking in experimental study while the movement amplitude and frequency of periodic motion is controlled by a reciprocating designed mechanical system. This mechanical device provides a pure lateral periodic motion for liquid tank exciting. Free surface of sloshing liquid in rectangular tank obtained by image processing.

Comparison of numerical results and similar experimental tests shows good agreement for different amplitude and different frequency of tank excitations in maximum and minimum of free surface displacement, so that relative errors estimated less than ten percent for all of tests. While they increase by increasing amplitude and frequency excitations due to nonlinear behavior of liquid free surface.

**Keywords:** Fluid sloshing, volume of fluid method, free surface displacement, baffle.



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Mechanical Engineering**

**The numerical simulation of liquid sloshing in  
partially filled tank with baffle and  
experimental validation**

**Rasoul Gharaei**

Supervisors:

**Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan**

**Dr. Ali Sarreshtehdari**

**Jan 2012**