

## شبیه‌سازی عددی و ارزیابی تجربی تلاطم سطح آزاد مایع تحت تحریک عرضی در یک مخزن مستطیلی

علی سررشته داری<sup>۱\*</sup>، محمد محسن شاه مردان<sup>۲</sup> و رسول قرایی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

### چکیده

در این مقاله، سطح آزاد مایع متلاطم تحت تاثیر تحریک عرضی در یک مخزن مستطیلی شکل، 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 (VOF) انجام شده که امکان استخراج سطح آزاد را در چنین مسأله‌ای فراهم می‌سازد. در مطالعه آزمایشگاهی از یک مخزن با دیواره‌های شفاف برای بررسی سطح آزاد مایع استفاده شده است که دامنه و فرکانس حرکت متناوب آن به وسیله یک سیستم مکانیکی رفت و برگشتی کنترل می‌گردد. این وسیله مکانیکی یک حرکت متناوب عرضی برای تحریک مخزن مایع ایجاد می‌کند. سطح آزاد مایع متلاطم در مخزن مستطیلی با تصویربرداری و استفاده از پردازش تصویر استخراج شده است. همچنین به منظور مطالعه تاثیرات وجود تیغه صلب در داخل مخزن بر شکل تلاطم و به خصوص روی بیشترین و کمترین جابه‌جایی سطح آزاد مایع با شرایط تحریک فوق، آزمایشی با یک صفحه عمودی در وسط مخزن انجام شده است. مقایسه نتایج عددی با آزمایش‌های مشابه برای تحریک‌هایی با دامنه و فرکانس کم در بیشترین و کمترین جابه‌جایی سطح آزاد مطابقت خوبی نشان می‌دهد، به نحوی که متوسط خطای نسبی برآورد شده کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. هر چند که با افزایش دامنه و فرکانس تحریک، مقدار اختلاف‌ها به علت ایجاد رفتار غیرخطی و پیچیده سطح آزاد افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** تلاطم سیال؛ روش کسر حجمی سیال؛ جابه‌جایی سطح آزاد؛ تیغه میرا کننده.

### ۱- مقدمه

به طور کلی دامنه تلاطم به ماهیت و نوع، دامنه و فرکانس حرکت مخزن، عمق مایع داخل مخزن، خواص مایع، هندسه مخزن و شتاب جاذبه بستگی دارد [۲]. مراجع مختلفی در حوزه بررسی تلاطم وجود دارد که به عنوان نمونه می‌توان به تحقیق ابراهیم [۳] اشاره نمود که به راه‌حل‌های تحلیلی برای یافتن معادلات دینامیک تلاطم مایع جهت استخراج شکل مودهای سطح آزاد اختصاص دارد. نمونه دیگری از این تحقیقات، فعالیت‌های تجربی-عددی فالتینسن<sup>۱</sup> و تیموخا<sup>۲</sup> [۴] است که به محاسبه نیروهای ناشی از تلاطم برای طراحی تجهیزات در صنایع دریایی پرداخته 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. تحقیقات آبرامسون<sup>۳</sup> [۵] نیز جزو

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 (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 توجهی بر ساختار مخزن وارد می‌سازد [۱]. به علاوه 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.

<sup>1</sup> Faltinsen

<sup>2</sup> Timokha

<sup>3</sup> Abramson

روش‌ها شده است. محدود کردن معادلات 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 هندسه های مختلف و شرایط مرزی و محیطی متنوع شده است.

بر این اساس در این مقاله سطح آزاد مایع متلاطم، توسط نرم-افزار OpenFOAM با روش کسر حجمی سیال (VOF) شبیه‌سازی شده است. اعمال شرایط مرزی و فیزیکی واقعی از جمله اعمال سیال لزج و استفاده از حداقل فرضیات، یعنی جریان تراکم ناپذیر و آرام، به علاوه امکان دستیابی به سرعت بالای محاسبات و در نتیجه صرفه‌جویی در زمان با استفاده از نرم افزار منبع باز مذکور، منجر به یافتن شکل مودهای سطح آزاد و نقاط کمینه و بیشینه‌ای در سطح مایع شده که بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق است و وجه تمایز روش عددی مذکور را در مقایسه با کارهای اخیر به خوبی نشان می‌دهد. همچنین این روش امکان حل مسائل با پیچیدگی‌های هندسی بیشتر برای بررسی رفتار سطح آزاد مایع در مبحث تلاطم را مورد بررسی و تایید قرار می‌دهد. به علاوه با توجه به قابلیت توسعه کد مذکور، امکان مدل‌سازی تقابل سازه-سیال در ادامه این تحقیق فراهم خواهد شد.

## ۲- معادلات حاکم و ساختار حل عددی

حرکت مایع با سطح آزاد در داخل مخزن متحرک، با توجه به ناپیوستگی در خواص سیالات 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 بدل ساخته است. روش عددی که در این‌گونه جریان‌ها به کار گرفته می‌شود باید علاوه بر ارضا کردن معادله بقای جرم و مقرون به صرفه 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. معادلات حاکم بر جریان‌های با سطح مشترک مایع و گاز، شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت می‌باشند. معادله پیوستگی:

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

معادله اندازه حرکت:

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

$\rho$  چگالی سیال،  $U$  سرعت سیال،  $\mu$  ضریب لزجت،  $g$  شتاب جاذبه،  $p$  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 معادلات، بسته به این که ناحیه حل در

کارهای پیشرو در دیدگاه‌های تحلیلی مایع متلاطم است که پس از گذشت سال‌ها، هم‌چنان مرجع مطالعات بسیاری در این زمینه می‌باشد و از معادلات ریاضی، ارزیابی‌های آزمایشگاهی و مدل‌های محاسباتی آن برای برآورد تقریبی مقادیر فرکانس‌های تلاطم و همچنین تعیین ارتفاع بیشینه سطح آزاد 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. در خصوص بررسی‌های عددی نیز تلاش‌های فراوانی انجام شده است که می‌توان به کارهای عددی و ارزیابی تجربی مایع متلاطم توسط پال<sup>۱</sup> و باتاچاریا<sup>۲</sup> [۶] اشاره کرد که در آن به بررسی رفتار تلاطم در مخازن نیمه پر با استفاده از حل معادله لاپلاس بدون نیاز به شبکه-بندی و با شرایط مرزی خاص، برای تعیین شکل سطح آزاد پرداخته شده که اختلاف قابل توجهی بین نتایج عددی و تجربی گزارش شده است. در مطالعه‌ای دیگر فیروزآبادی و همکاران [۷]، با روش المان مرزی به بررسی تلاطم مایع در مخازن سه بعدی پرداخته و از جریان پتانسیل تراکم‌ناپذیر و ترم‌های پتانسیل سرعت روی سطح آزاد مایع استفاده شده است، که نتایج بدست 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 زمینه مطالعه تقابل سازه و سیال در شرایط سیال متلاطم نیز می‌توان به کارهای اخیر بیسوال<sup>۳</sup> و باتاچاریا<sup>۴</sup> [۸] اشاره کرد که با استفاده از روش المان محدود به بررسی برهم‌کنش مایع و یک تیغه (بافل) کامپوزیتی مخزن پرداخته‌اند. که در آن تحقیق مایع تراکم‌ناپذیر و غیرلزج و جریان غیرچرخشی فرض شده است و نتایج بدست آمده نشان از تاثیر تیغه در کاهش تلاطم مایع داخل مخزن دارد. نمونه دیگر، تحقیق هاشمی نژاد و محمدی [۹] است که براساس نظریه پتانسیل خطی به بررسی تاثیرات ارتفاع تیغه و نحوه قرار گرفتن آن و همچنین عمق مایع بر تلاطم سیال داخل مخزن استوانه‌ای افقی پرداخته که در آن نیز مایع تراکم‌ناپذیر و غیرلزج فرض شده است. در یک تحقیق مروری توسط ربویلات<sup>۵</sup> و لیکسونو<sup>۶</sup> [۱۰] که اخیراً به مساله مدل کردن برهم‌کنش سازه-سیال در مخازن نیمه پر اختصاص داشته است، ملاحظه می‌شود که روش‌های به‌کار رفته بسیار تابع فرضیات ساده‌کننده در جریان یا سیال متلاطم بوده، تغییر در شرایط هندسی و نوع سیال، اختلاف قابل توجهی در مقایسه با نتایج تجربی موجود نشان می‌دهد. بنابراین هر چند مطالعات بسیار زیادی در زمینه‌ی بررسی شبیه‌سازی مایع متلاطم 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

<sup>1</sup> Pal

<sup>2</sup> Bhattacharyya

<sup>3</sup> Biswal

<sup>4</sup> Bhattacharyya

<sup>5</sup> Rebouillat

<sup>6</sup> Liksonov

جدول ۱- ضرایب بکار رفته برای تامین حرکت کلی مخزن [۱۲]

بدر	نوع	تعریف	ضریب
متر	بردار	مختصات مرکز نوسان مرکز ثقل مخزن	CofG
-	اسکالر	نسبت مقیاس مدل	Lamda
رادیان	اسکالر	بیشترین دامنه چرخش	rollAmax
رادیان	اسکالر	کمترین دامنه چرخش	rollAmin
متر	اسکالر	حرکت بالا و پایین (حرکت انتقالی در امتداد محور Z)	heaveA
متر	اسکالر	حرکت چپ و راست (حرکت انتقالی در امتداد محور Y)	swayA
-	اسکالر	ضریب میرایی	Q
ثانیه	اسکالر	زمان تناوب برای مایع	Tp
ثانیه	اسکالر	تناوب طبیعی کشتی	Tpn
ثانیه	اسکالر	تناوب چرخش جریان	Tpi
ثانیه	اسکالر	گام زمانی مرجع	dTi
-	اسکالر	افزایش Tp بر واحد dTi	dTp

با توجه به تعاریف ضرایب معرفی شده در جدول ۱ و شکل ۲، معادلات حاکم به کار رفته برای به دست آوردن حرکت نوسانی مخزن در حالت کلی عبارتند از:

$$T_{pi} = T_p + dT_p \times \left( \frac{time}{dT_i} \right) \quad (6)$$

$$w_r = \frac{2 \times \pi}{T_{pi}} \quad (7)$$

$$r = \frac{dT_p}{dT_i} \quad (8)$$

$$u = T_p + r \times time \quad (9)$$

$$ph_r = \frac{2 \times \pi \times \left( \left( \frac{T_p}{u} - 1 \right) + \log|u| - \log(T_p) \right)}{r} \quad (10)$$

$$ph_s = ph_r + \pi \quad (11)$$

$$ph_n = ph_r + \frac{\pi}{2} \quad (12)$$

$$rollA = \max \left\{ rollA \max e^{-\frac{\sqrt{T_{pi} - T_{pn}}}{2Q}}, rollA \min \right\} \quad (13)$$

$$T = \begin{bmatrix} 0 \\ swayA \times (\sin(w_r \times time + ph_s) - \sin(ph_s)) \\ heaveA \times (\sin(w_r \times time + ph_n) - \sin(ph_n)) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$R = \text{quaternion} \begin{bmatrix} rollA \times \sin(w_r \times time + ph_r) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

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

که در معادلات بالا  $T_{pi}$  دوره تناوب چرخش جریان بر حسب ثانیه،  $w_r$  فرکانس جریان بر حسب هر تری،  $ph_r$  فاز جریان برای چرخش بر حسب رادیان،  $ph_s$  فاز جریان برای حرکت به سمت چپ و راست (در امتداد محور Y) بر حسب رادیان،  $ph_n$  فاز جریان برای حرکت به سمت بالا و پایین (در امتداد محور Z) بر

کدام سیال واقع شده، خواص همان سیال در رابطه پیوستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش دیدگاه اوپلری نسبت به میدان جریان برقرار بوده، به این معنی که شبکه محاسباتی در تمام زمان حل 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 و متاثر از رفتار جریان نمی‌باشد در نتیجه مشتق مادی آن صفر می‌باشد:

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

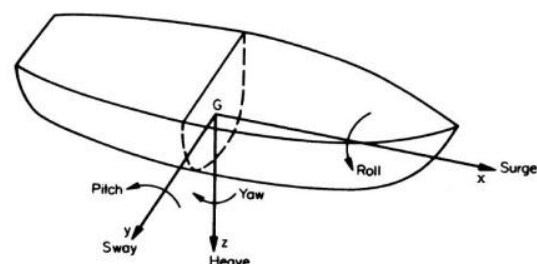
و نمایش ریاضی  $\alpha$  به شکل زیر می‌باشد:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{liquid} \\ 0 & \text{gas} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{interface} \end{cases} \quad (4)$$

با 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:

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

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 معادلات 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 بوده که شامل چرخش سینوسی (حول محورهای x، y و z)، حرکت بالا و پایین (در امتداد محور z) و حرکت چپ و راست (در امتداد محور y) و حرکت عقب و جلو (در امتداد محور x) با تغییر دامنه و فاز می‌باشد (شکل ۱). در نرم افزار OpenFOAM برای پیاده‌سازی این حرکت‌ها ضرایب‌هایی پیش‌بینی شده که با فرضیات 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 معادلات حاکم برای به دست آوردن حرکت نوسانی مخزن مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در جدول ۱ ارائه شده است.

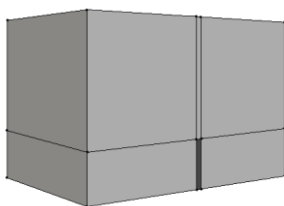


شکل ۱- نمایش کلی حرکات یک جسم شناور [۱۱]

پس از ایجاد حرکت نوسانی مذکور با استفاده از حل گر *interDyMFoam* - که یکی از حل گرهای *OpenFOAM-1.7.0* برای شبیه سازی عددی جریان سیالات با سطوح مشترک می باشد و در آن امکان استفاده از شبکه بندی پویا برقرار شده است- به حل مساله می پردازیم. در حالت کلی این حل گر برای تحلیل عددی دو سیال غیرقابل تراکم، هم دما و مخلوط نشدنی که سطح مشترک بین دو سیال با روش کسر حجمی سیال (VOF) با حرکت شبکه دلخواه، قابل اجرا می باشد [۱۴]. برای انجام شبیه سازی حاضر هندسه مساله با ابعاد واقعی به صورت سه بعدی تهیه و شبکه بندی شده است. با توجه به شکل ۴، هندسه شبیه سازی شده برای مخزن مستطیلی شکل در حالت بدون تیغه (صفحه میرا کننده یا بافل) دارای مرزهای دیوار جانبی و در حالت با تیغه با یک دیوار میانی است. شرط به کار رفته روی مرزهای مذکور از جنس دیوار بوده، مرز اولیه مایع و گاز نیز تنها در گام اول با تعیین مقدار ضریب  $\alpha$  برای میدان حل اولیه مساله تعریف می شود و در گام های بعدی توسط مساله محاسبه می گردد. شرایط اولیه سرعت و فشار در دیوارها و همچنین ناحیه داخلی مخزن برابر با صفر است. تحریک و جابجایی دیوارها با استفاده از روابطی که در بخش قبل اشاره شد، در هر گام محاسبه و با استفاده از امکان شبکه بندی دینامیکی موجود در نرم افزار، رفتار جابجایی مخزن در هر گام شبیه سازی می شود. مخزن پس از شبکه بندی در حالت بدون تیغه شامل ۱۶۰۰۰ سلول محاسباتی و در حالت با تیغه شامل ۱۶۳۵۰ سلول محاسباتی می باشد. شبکه بندی به صورت یکنواخت و یکپارچه بوده، هیچ گونه کشیدگی یا فشردگی در قسمت های مختلف هندسه وجود ندارد. سلول های محاسباتی مربعی شکل می باشند. همچنین به منظور بررسی استقلال حل از شبکه بندی، شبیه سازی عددی مورد نظر پس از انجام با شبکه بندی اولیه، که در بالا شرح داده شد، بار دیگر با تعداد شبکه دو برابر شده انجام گردید که تغییری در نتایج حاصل نشد. عدد کورانت، ارضای پیوستگی و مقادیر باقیمانده حل عددی به عنوان معیارهای همگرایی به کار رفته است.



شکل ۳- رئوس و بلوک های مخزن در حالت با تیغه

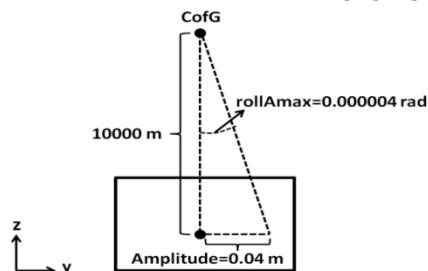


شکل ۴- نمایش صفحه جلو و یکی از دیوارهای مخزن در حالت با تیغه

حساب رادیان، *rolla* دامنه چرخش بر حسب رادیان،  $T$  بردار انتقال بر حسب متر،  $R$  کوآترنین (Quaternion) چرخش بر حسب رادیان و  $TR$  سپترنینون (Septernion) جابه جایی بر حسب متر می باشد. در این حرکت کلی، کوآترنین برای چرخش به صورت سه بعدی و سپترنینون برای حرکت انتقالی و چرخش به صورت سه بعدی استفاده شده است که شامل بردار انتقال و چرخش و در نتیجه دارای هفت مولفه می باشد [۱۳]. در جریان مایع داخل مخزن اعداد بی بعد فرود و رینولدز اهمیت داشته و در صورت نبود یا کاهش قابل توجه گرانش، عدد وبر نیز مطرح می باشد. لیکن تمرکز این تحقیق برای جریان های متلاطم آرام بوده و تنها کم بودن عدد رینولدز بر مبنای طول مجرا به عنوان عدد بی بعد مطرح در نظر گرفته شده است. حل عددی بر اساس روش حجم محدود (FV) می باشد. در این حل هر یک از عملگرهای دیفرانسیلی به روشی گسسته سازی شده است. برای مشتق زمانی از روش اویلر و برای عملگر گرادیان از روش خطی گوس برای گسسته سازی استفاده شده است. برای گسسته سازی عملگر دیورژانس در معادلات سرعت و کسر حجمی از روش وانلیر (vanLeer) استفاده شده است و گسسته سازی جملات لاپلاسی با استفاده از روش خطی گوس بوده است.

### ۳- شبیه سازی عددی

با توجه به ضرایب معرفی شده، برای ایجاد یک حرکت جابجایی عرضی، لازم است تا مقدار این ضرایب به گونه ای 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 می شود، مختصات مرکز دوران به صورت  $(0, 0, 10000)$  در نظر گرفته شده است. با این کار وقتی مخزن حول این نقطه نوسان کند، به علت شعاع زیاد در نوسانات کم، می توان 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  $0.04$  متر باید این زاویه برابر با  $0.000004$  رادیان انتخاب شود (شکل 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 ۲- حرکت نوسانی مخزن تلاطم

خواص فیزیکی سیالات در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است که آزمایش مورد نظر در فشار یک اتمسفر و دمای بیست و پنج درجه سانتیگراد انجام شده است.

جدول ۲- خواص سیالات

خواص فاز ۱ (آب)			
$1.0 \times 10^{-6}$	$V_1$	$\frac{m^2}{s}$	ویسکوزیته سینماتیکی
$10^3$	$\rho_1$	$\frac{kg}{m^3}$	چگالی
خواص فاز ۲ (هوا)			
$1.48 \times 10^{-5}$	$V_2$	$\frac{m^2}{s}$	ویسکوزیته سینماتیکی
1.0	$\rho_2$	$\frac{kg}{m^3}$	چگالی

#### ۵- بحث پیرامون نتایج

مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی در خصوص ارتفاع سطح آزاد مایع متلاطم، که در حالت‌های مختلف تحریک عرضی مخزن انجام شده، به صورت کیفی در جدول ۳ و به شکل کمی در جدول ۴ ارائه شده است. در جدول ۳ در هر یک از حالت‌های انجام شده آزمایش، 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 کمینه و بیشینه در سطح آزاد، نشان می‌دهد. همانطور که از این جدول معلوم است، 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 قسمت شرایط فیزیکی از این جدول در واقع زمان‌های آزمایشگاهی ثبت شده‌ای می‌باشند که نقاط بیشینه و کمینه سطح آزاد، حاصل می‌شود.

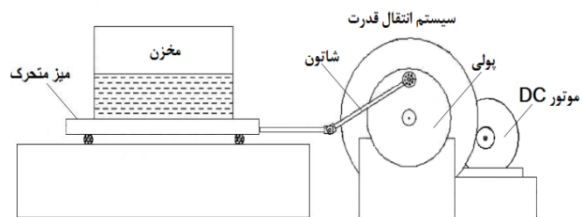
مقدارهای عددی استخراج شده از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، برای بیشترین و کمترین ارتفاع سطح آزاد مایع، همچنین خطای نسبی بیشترین و کمترین ارتفاع سطح آزاد مایع متلاطم بین این نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در این جدول معلوم می‌شود که دامنه و فرکانس تحریک مخزن با بیشترین ارتفاع ایجاد شده توسط تلاطم در سطح آزاد، رابطه مستقیم و با کمترین ارتفاع سطح آزاد مایع (بین کلیه حالت‌های مورد بررسی) رابطه معکوس دارد. به بیان دیگر نتایج حاصل نشان می‌دهد که دامنه نوسانی تلاطم در حالات بررسی‌های انجام شده حاضر، مستقیماً به مقدار دامنه و فرکانس تحریک مخزن بستگی دارد. به طور کلی بیشترین خطای نسبی برای مخزن بدون تیغه در حالت کمترین دامنه ( $0.021$  متر) و بیشترین فرکانس ( $0.622$  هرتز) روی می‌دهد که با توجه به این که کمترین خطای

#### ۴- مطالعه آزمایشگاهی

برای بررسی جابه‌جایی سطح آزاد مایع متلاطم، مجموعه آزمایشگاهی مطابق شکل ۵ ساخته شده است. این مجموعه شامل یک مخزن مستطیلی به ابعاد  $0.1 \times 0.1 \times 0.15$  متر با دیواره‌های شفاف می‌باشد که ارتفاع آب داخل آن  $0.03$  متر است. مخزن بر روی یک میز متحرک قرار دارد و توسط یک سیستم انتقال قدرت که حرکت دورانی موتور DC را به حرکت رفت و برگشتی تبدیل می‌کند، نوسان می‌کند. بررسی جابه‌جایی سطح آزاد با تغییر دامنه و فرکانس میز متحرک انجام می‌گیرد. تغییر دامنه با تغییر محل نصب شاتون در راستای شعاع پولی 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 به دست آمده است. همچنین برای تعیین فرکانس حرکت مخزن نیز از شمارش تعداد دوران پولی با استفاده از فیلم‌های ثبت شده در حین آزمایش استفاده شده است.

آزمایش‌های انجام شده برای فرکانس‌های حرکتی در دو مقدار  $0.4$  و  $0.622$  هرتز با تغییر دامنه نوسان در دو حالت  $0.21$  و  $0.4$  متر انجام شده است. این شرایط آزمایشی یک بار برای مخزن مورد نظر انجام شده است و سپس یک آزمایش با نصب تیغه‌ای نسبتاً صلب، به ارتفاع  $0.03$  متر در وسط مخزن، برای بررسی تاثیر تیغه روی تلاطم انجام شده است. که انتخاب شرایط مذکور با توجه به محدودیت‌های بهره‌برداری تجهیزات آزمایشگاهی بوده است.

برای اندازه‌گیری تجربی سطح آزاد مایع متلاطم، تصویر برداری پیاپی با فاصله‌های زمانی ثابت از مخزن متحرک انجام شده است. عکس‌های ثبت شده از مخزن در لحظه‌های مختلف حرکت توسط نرم افزار 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.




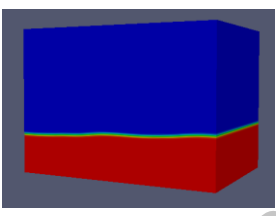
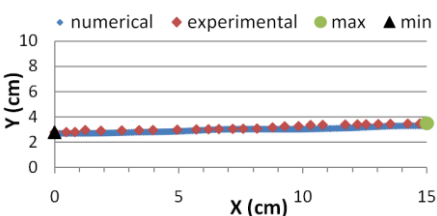

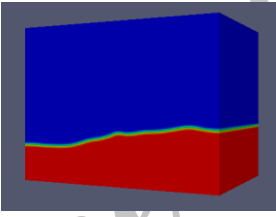
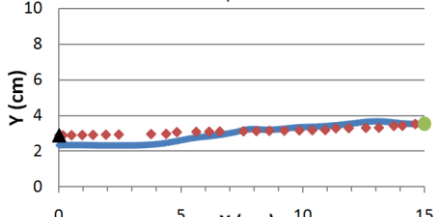

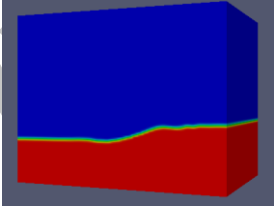
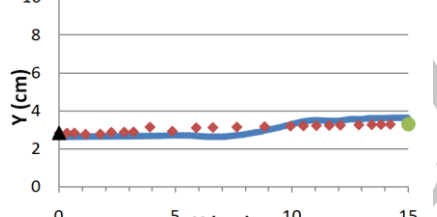

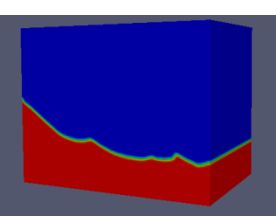
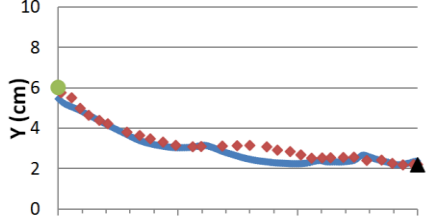

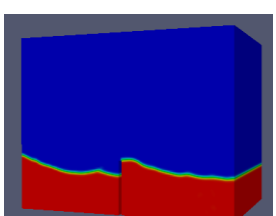
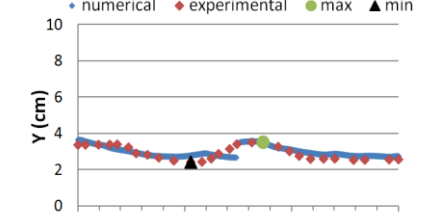
شکل ۵- طرح کلی سیستم مخزن متلاطم

در هر آزمایش برای مشاهده تاثیر دامنه و فرکانس بر جابه‌جایی 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 جابه‌جایی 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.

تلاطم به دلیل وجود تیغه مذکور می باشد. با توجه به نتایج مقایسه- ای کمی حاصل و مقادیر خطای به دست آمده، به طور کلی می توان چنین نتیجه گیری کرد که نتایج شبیه سازی عددی مطابقت بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. هر چند نتایج آزمایش های کیفی انجام شده با دامنه و فرکانس های 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 غیر خطی در تلاطم سطح آزاد مایع را بیان می سازد.

نسبی برای این مخزن در حالت بیشترین دامنه (۰/۰۴ متر) و بیشترین فرکانس (۰/۶۲۲ هرتز) رخ می دهد، می توان دلیل آن را در کمبود دقت در ثبت تصاویر و نیز پردازش آن ها دانست که در زمان نوسان های زیاد مخزن (فرکانس تحریک بالا) و در دامنه تحریک کم ایجاد می شود. در بررسی نتیجه آزمایش مخزن تیغه- دار و مقایسه آن با حالت تحریک مشابه بدون تیغه نیز مشاهده می- شود با وجود اینکه در دامنه ثابت فرکانس، تحریک افزایش یافته اما مقدار بیشترین و کمترین ارتفاع سطح آزاد مایع نسبت به حالت بدون تیغه تفاوتی نکرده است که این مساله نشان دهنده کاهش اثر

جدول ۳- مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و عددی

شرایط فیزیکی	تصویر آزمایش در شرایط مذکور	شبیه سازی عددی با شرایط مشابه	مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی
مخزن بدون تیغه در زمان ۰/۸۷۱ ثانیه (دامنه ۰/۰۲۱ متر و فرکانس ۰/۴ هرتز)			
مخزن بدون تیغه در زمان ۰/۸۰۶ ثانیه (دامنه ۰/۰۲۱ متر و فرکانس ۰/۶۲۲ هرتز)			
مخزن بدون تیغه در زمان ۰/۳۵۴ ثانیه (دامنه ۰/۰۴ متر و فرکانس ۰/۴ هرتز)			
مخزن بدون تیغه در زمان ۰/۹۳۵ ثانیه (دامنه ۰/۰۴ متر و فرکانس ۰/۶۲۲ هرتز)			
مخزن با تیغه در زمان ۰/۷۴۲ ثانیه (دامنه ۰/۰۴ متر و فرکانس ۰/۴ هرتز)			

جدول ۴- بیشترین و کمترین ارتفاع مایع داخل مخزن

خطای نسبی برای کمترین ارتفاع مایع (%)	خطای نسبی برای بیشترین ارتفاع مایع (%)	کمترین	بیشترین	کمترین	بیشترین	فرکانس (هرتز)	دامنه (متر)	ساختار مخزن
		ارتفاع مایع (متر)	ارتفاع مایع (متر)	ارتفاع مایع (متر)	ارتفاع مایع (متر)			
		عددی		آزمایشگاهی				
۲/۸۶	۴/۸۷	۰/۰۲۷۲	۰/۰۳۳۲	۰/۰۲۸	۰/۰۳۴۹	۰/۴	۰/۰۲۱	بدون تیغه
۱۴/۲۸	۴/۲۵	۰/۰۲۴	۰/۰۳۶۸	۰/۰۲۸	۰/۰۳۵۳	۰/۶۲۲	۰/۰۴	
۵/۰۵	۱۰	۰/۰۲۶۳	۰/۰۳۶۳	۰/۰۲۷۷	۰/۰۳۳	۰/۴	۰/۰۴	
۰/۴۶	۹/۱۶	۰/۰۲۱۸	۰/۰۵۴۵	۰/۰۲۱۷	۰/۰۶	۰/۶۲۲	۰/۰۴	با تیغه
۱۰/۷۴	۳/۷	۰/۰۲۶۸	۰/۰۳۶۴	۰/۰۲۴۲	۰/۰۳۵۱	۰/۵۸۲	۰/۰۴	

## ۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله، استخراج شکل سطح آزاد مایع متلاطم 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 شده اند.

تحقیق حاضر نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی با هم داشته، به طور متوسط خطای نسبی کمتر از ۱۰٪ به دست آمده است. در یک فرکانس ثابت تحریک، با افزایش دامنه، مقدار جابجایی‌ها و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن افزایش می‌یابد. همچنین در یک دامنه ثابت تحریک، با افزایش فرکانس، مقدار جابجایی‌ها و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن افزایش می‌یابد. بنابراین دو عامل دامنه و فرکانس تحریک مخزن با میزان جابه‌جایی و بیشترین ارتفاع مایع درون مخزن رابطه مستقیم دارند. همچنین بیشترین میزان جابه‌جایی در این آزمایش‌ها در محل دیواره‌ها صورت می‌گیرد. استفاده از تیغه میرا کننده یا بافل نیز در داخل مخزن به طور قابل ملاحظه‌ای بر این جابه‌جایی‌ها تاثیر می‌گذارد و مقدار ارتفاع بیشینه در سطح آزاد متلاطم را به شدت کاهش می‌دهد. به طوری که در یک دامنه و فرکانس تحریک تقریباً مشابه، بیشترین ارتفاع مایع متلاطم حدود ۴۲٪ کاهش را نسبت به حالت بدون تیغه نشان می‌دهد. در این حالت، محل ایجاد بیشترین و کمترین موقعیت سطح آزاد مایع در مخزن نیز جابه‌جا شده و به محلی در نزدیکی تیغه منتقل می‌شود.

## ۷- مراجع

- [2] Akyildiz H, Unal NE (2006) Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: numerical simulation and experimental validation. *Ocean Eng.* 33: 2135-49.
- [3] Ibrahim AR (2005) *Liquid sloshing dynamics*. Cambridge University Press. ISBN: 9780521838856.
- [4] Faltinsen MO, Timokha AN (2009) *Sloshing*. Cambridge University Press. ISBN: 9780521881111.
- [5] Abramson HN (1968) *Propellant Slosh Loads*. NASA SP8009.
- [6] Pal P, Bhattacharyya SK (2010) Sloshing in partially filled liquid containers-Numerical and experimental study for 2-D problems. *J Sound Vib.* 329:4466-4485.
- [7] Firouz-Abadi RD, Haddadpour H, Ghasemi M (2009) Reduced order modeling of liquid sloshing in 3D tanks using boundary element method. *Eng Anal Bound Elem.* 33:750-61.
- [8] Biswal KC, Bhattacharyya SK (2010) Dynamic response of structure coupled with liquid sloshing in laminated composite cylindrical tank with baffle. *Finite Elem Anal Des.* 46:966-81.
- [9] Hashemnejad SM, Mohammadi MM (2010) Effect of anti-slosh baffles on free liquid oscillations in partially filled horizontal circular tanks. *Ocean Eng.* 38: 49-62.
- [10] Rebouillat S, Liksonov D (2010) Fluid-structure interaction in partially filled liquid containers: A comparative review of numerical approaches. *Comput Fluids.* 39:739-46.
- [11] Rawson KJ, E.C. Tupper (2001) *Basic Ship Theory Volume 2*. 5th edn. ISBN: 0750653973.
- [12] Eslamdoost A (2010) Roll Motion of a Box and Interaction with Free Surface, Project work for the Phd course "CFD with Open Source Software". Chalmers University of Technology, Sweden.
- [13] 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, Sweden.
- [14] <http://www.cfd-online.com/Forums/openfoam>.
- [1] Souto-Iglesias A, Delorme L, Perez-Rojas L, Abril-Perez S (2006) Liquid moment amplitude assessment in sloshing type problems with smooth particle hydrodynamics. *Ocean Eng.* 33: 1462-84.