



شبیه‌سازی اثرات تیغه میراکننده بر میزان تلاطم در مخزن سوخت هواپیمای مدل

مصطفی محمودی^{۱*}، جاماسب پیرکندی^۱، بهمن امجدیان^۲ و حسین نورشاد^۲^۱ دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران^۲ کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۱/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

چکیده

یکی از راه‌های متداول جهت جلوگیری از تلاطم در مخازن سوخت، استفاده از تیغه‌های میراکننده در داخل مخازن است. در این تحقیق ۵ نمونه مخزن، شامل مخزن بدون تیغه و مخزن با تیغه‌های میراکننده به شکل‌های مختلف به صورت سه بعدی مدل‌سازی شده‌است. در ادامه با اعمال شتاب گرانشی به مخزن، اثرات شکل تیغه‌های میراکننده بر میزان تلاطم و حرکت سیال درون مخزن سوخت با استفاده از روش عددی حجم سیال، تحلیل شده است و نتایج حاکی از میزان خطا کمتر از ۴ درصد بین روش عددی و تجربی می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، سیال متلاطم پس از ۰/۳۵ ثانیه به یک پایداری نسبی می‌رسد، در حالیکه در مخزن بدون تیغه میراکننده این پایداری نسبی بعد از زمان ۱/۱ ثانیه رخ می‌دهد. با توجه به نتایج، حرکت سوخت در حالت قرارگیری تیغه در قسمت تحتانی و میانی مخزن با توجه به ارتفاع کمتر تیغه نسبت به حالت قرارگیری با تیغه فوقانی در مخزن بیشتر است. بر اساس نتایج بدست آمده در حالت قرارگیری همزمان تیغه‌ها در قسمت تحتانی، میانی و فوقانی مخزن، سیال تلاطم کمتری ایجاد کرده و لوله سوخت در وضعیت بهتری نسبت به شکل تیغه‌ها در مخازن دیگر قرار گرفته‌است.

کلمات کلیدی: تلاطم؛ مخزن سوخت هواپیمای مدل؛ شبیه‌سازی عددی حجم سیال؛ تیغه میراکننده

Simulation of Baffle Effects on Sloshing in Model Aircraft Fuel Tank

M. Mahmoodi^{1,*}, J. Pirkandi¹, B. Amjadian², H. Noorshad²¹ Associate. Prof., Space Research Center., Malek Ashtar Univ., Tehran, Iran.² MS. Student., Space Research Center., Malek Ashtar Univ., Tehran, Iran.

Abstract

One of ways to prevent sloshing in fuel tanks is to use baffles inside the tanks. In this research, 5 tank samples, including a non-baffle and baffle tanks are modeled in 3D. In the following, by applying the gravitational acceleration to the tank, the effects of the baffle's shape on sloshing and fluid motion inside the fuel tank have been analysed by using the numerical method of volume of fluid (VOF), the results indicate an error value of less than 4% between numerical and experimental methods. Based on the results, the fluid sloshing reaches a relative stability after 0.35 seconds, while in non-baffle tank, this relative stability occurs after 1.1 seconds. According to the results, the motion of the fuel is in the position of the baffle in bottom and middle is higher with respect to the lower height baffle than the position with the upper baffle in the tank. Based on the results obtained in the simultaneous positioning of the baffles in the bottom, middle and upper, the fluid created less sloshing and the fuel pipe is in a better position than the baffles in other fuel tanks.

Keywords: VOF; Fuel Tank Sloshing; Baffle; Aircraft Fuel System.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: +۹۸۹۱۲۵۲۵۳۲۱۸

آدرس پست الکترونیک: mostafamahmoodi@mut.ac.ir

۱- مقدمه

به هرگونه حرکت سطح آزاد سیال در مخازن، تلاطم سیال گفته می‌شود. علت شکل‌گیری تلاطم اغتشاش سیال بر اثر شتاب حرکت سطح آزاد آن است [۱]. برحسب نوع اغتشاش و شکل مخزن، سطح آزاد سیال اشکال مختلف حرکت را تجربه می‌کند. تلاطم سیال در مخازن ثابت و متحرک بخش مهمی از فعالیت مهندسان صنایع هوافضا، صنایع هسته‌ای و طراحان مخازن زمینی و دریایی را به خود اختصاص داده‌است. در حوزه هوافضا از سال ۱۹۶۰ میلادی، بررسی اثرات میرایی به یکی از فعالیت‌های مهم دانشمندان هوافضا تبدیل شده‌است. در آن زمان برنامه‌های فضایی روسیه و آمریکا به اکتشافات حول مدار زمین و ماه معطوف بود. الزامات موفقیت این طرح به سامانه‌های پرتاب، با موتورهای قدرتمندتر و مخازن بزرگتر سوخت بستگی داشت. بدین منظور موضوع تلاطم و میرایی اغتشاشات سیال در مخازن مدنظر قرار گرفت. در هواپیماها، ماهواره‌برها و فضاپیماها، حرکت القایی به مخزن سبب پیدایش تلاطم سیال می‌شود.

از مهمترین مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به بررسی‌های انجام شده توسط آبرامسون و نورمن [۲] اشاره کرد. از دیگر مطالعات انجام گرفته تحلیل دو بعدی اثر تشدید تلاطم مایع در یک مخزن با اعمال نیروی جانبی توسط چو و همکارانش [۳] می‌باشد. در این تحقیق پارامترهای مختلف از جمله مشخصات میرایی تلاطم، عرض تیغه‌های میراکننده و تعداد آنها بررسی شده‌است. کیم و همکارانش [۴] تحقیقاتی را بر روی اثر عرض و طول تیغه‌های میراکننده جهت کاهش تلاطم انجام داده‌اند. تحقیقات دیگر در این زمینه بررسی‌های آزمایشگاهی پانیگراهی و همکاران [۵] می‌باشد. در این بررسی‌ها وضعیت‌های مختلف قرارگیری تیغه به صورت افقی و قائم و اثر آنها بر مقدار تغییر مکان سطح مایع و میزان فشار، تحت تحریک سینوسی انجام گرفته‌است. در همان سال وو و چن [۶] تلاطم امواج و تشدید حرکت سیال در یک مخزن سه بعدی مستقل از زمان به کمک روش اجزاء محدود را بررسی نموده‌اند. کولی و کول کارنی [۷] نتایج خوبی با شبیه‌سازی تلاطم در مخزن سوخت به دست آورده‌اند. فرایس و بهروزی [۸] مشابه این تحلیل را بر روی حرکت سیال در مخزن سوخت فضاپیما انجام داده‌اند. فیروز

آبادی و برهان پناه [۹] سطح آزاد جریان مایع یک مخزن دارای جریان ورودی و خروجی را با استفاده از تحلیل عددی به روش اجزاء مرزی به صورت سه بعدی تحلیل نموده‌اند. هوانگ و همکاران [۱۰] اثرات تیغه‌های الاستیک بر پدیده تلاطم را تحلیل کرده‌اند. گودرزی و دانش [۱۱] اثر تیغه‌های عمودی در یک مخزن را با استفاده از یک روش عددی بر پایه روش حجم محدود مورد بررسی قرار داده‌اند. وانگ و همکاران [۱۲] اثر تیغه‌های میراکننده در مخازن بیضوی افقی را با روشی عددی بر پایه المان محدود مورد مطالعه قرار داده‌اند. در بیشتر این تحقیقات با استفاده از روش‌های عددی و تجربی اثرات قرارگیری تیغه‌های میراکننده در مخازن بررسی شده‌است.

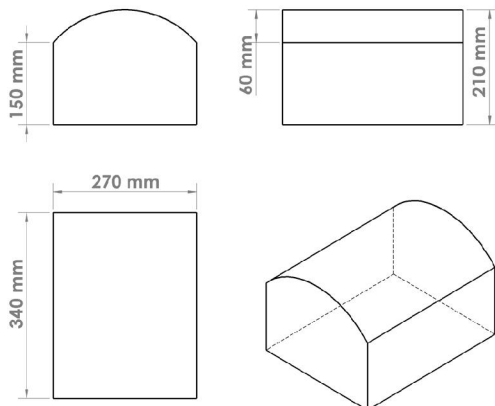
در تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار فلونت شبیه‌سازی ۵ نمونه مخزن صورت گرفته و در آنها وضعیت تلاطم سیال و اثر قرارگیری تیغه‌های میراکننده بررسی شده‌است. در این تحقیق ۵ حالت در نظر گرفته شده شامل شبیه سازی مخزن بدون تیغه میراکننده (حالت ۱) و استفاده از تیغه‌های میراکننده تحتانی (حالت ۲)، تیغه‌های تحتانی و میانی به صورت همزمان (حالت ۳)، سه تیغه به صورت همزمان (حالت ۴)، و قرارگیری تیغه‌های تحتانی و فوقانی به صورت همزمان (حالت ۵)، در مخزن می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده از میان انواع تیغه‌های شبیه‌سازی شده، مخزن و تیغه‌ها در حالت ۴ توانایی بیشتری در جلوگیری از تلاطم نشان می‌دهند.

۲- مدل‌سازی مخازن

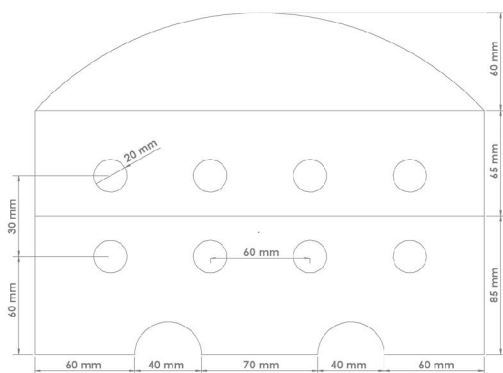
در این تحقیق پنج حالت از مخزن سوخت در نظر گرفته شده است:

- ۱- مخزن بدون تیغه،
- ۲- مخزن با تیغه‌های میراکننده تحتانی،
- ۳- مخزن با تیغه‌های تحتانی به همراه تیغه‌های میانی،
- ۴- مخزن با تیغه‌های تحتانی به همراه تیغه‌های میانی و تیغه‌های فوقانی،
- ۵- مخزن با تیغه‌های تحتانی به همراه تیغه‌های فوقانی،

در نهایت پنج حالت فوق با هم مقایسه شده‌اند. جریان دو سیال با یک فصل مشترک به صورت جریان سطح آزاد دو



شکل ۲- ابعاد هندسی مخزن



شکل ۳- ابعاد تیغی بکار رفته در مخزن

با توجه به مطالعات گذشته بر میزان تاثیر پرشدگی مخزن، مقدار عمق سیال انتخاب شده برای تحلیل ۵۰ میلیمتر پر شدگی از مخزن در نظر گرفته شده است. به جهت رسیدن به بیشترین میرایی، در تحلیل حاضر از تعداد ۲ عدد تیغه در مدل سازی استفاده شده است. هر پنج مخزن با اندازه یکسان به صورت سه بعدی مدل سازی گردیده و قطر سوراخ های تعبیه شده بر روی تیغه ها در مخازن به مقدار ۲۰ میلیمتر و قطر سوراخ های انتهایی تیغه ها برابر ۴۰ میلیمتر می باشد. در شکل ۴، موقعیت تیغه ها در مخزن قابل مشاهده می باشد.

۳- شبکه بندی مخازن

در این تحقیق مدل سازی مخازن به صورت سه بعدی انجام شده است. مخزن شبکه بندی شده در شکل ۵ قابل مشاهده

فازی حل شده است. جدول ۱ نشان دهنده ابعاد هندسی مخزن و تیغه می باشد. در شکل ۲ و شکل ۳ ابعاد هندسی مخزن و تیغه ها نشان داده شده است.

جدول ۱- ابعاد مخزن و تیغه ها

پارامتر	مقدار (mm)
طول مخزن (محور X+)	۳۴۰
عرض مخزن (محور Y+)	۲۷۰
ارتفاع مخزن همراه با قوس مربوطه (محور Z+)	۲۱۰
قطر صفحه خروجی	۳۰
ارتفاع مرکز صفحه خروجی	۸۰
شعاع قوس بالایی مخزن	۱۷۰
ارتفاع کمانک قوس بالایی مخزن	۶۰
ارتفاع بافل پایین	۸۵
ارتفاع بافل میانی	۶۵
قطر سوراخ های بافل	۲۰
قطر سوراخ های نیم دایره ای شکل	۴۰



شکل ۱- مخزن سوخت هواپیمای مدل

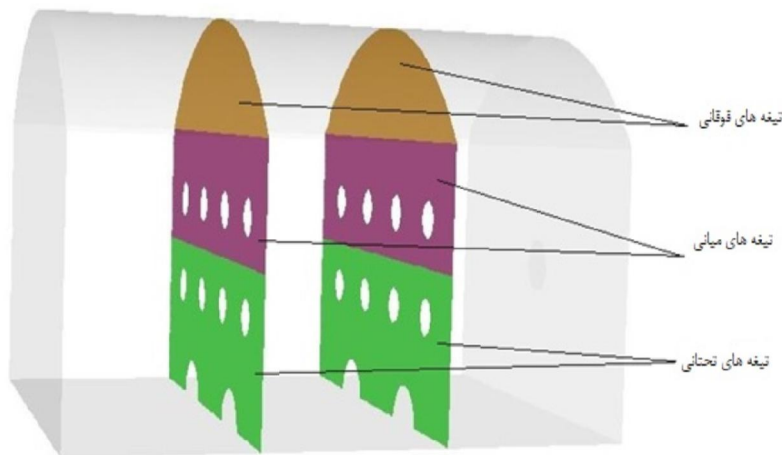
مابع در نظر گرفته شده‌است. جدول ۲ مشخصات و خواص سوخت را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات و خواص سوخت

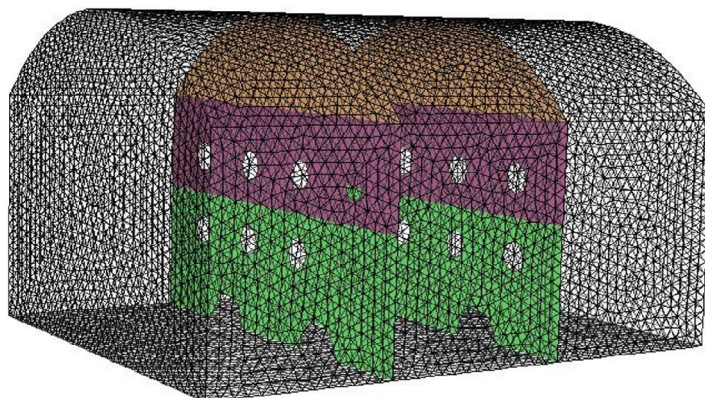
واحد	مقدار	خاصیت
(kg/m-s)	۰/۰۰۲۴	چسبندگی
(w/m-k)	۰/۱۴۹	رسانش گرمایی
(j/kg-k)	۲۰۹۰	گرمای ویژه
(kg/m ³)	۷۸۰	چگالی

می‌باشد. به منظور بررسی شرط استقلال از شبکه در مسئله، مخزن مدل‌سازی شده با اندازه‌های مختلف شبکه‌بندی می‌شود و با توجه به دقت مورد نیاز و هزینه‌های محاسباتی، در این تحقیق از شبکه ۸ میلیمتری (تعداد ۲۲۲۲۶۹ شبکه) استفاده شده است. شکل ۶ بررسی شرط استقلال از شبکه را نشان می‌دهد. محور عمودی در شکل ۶ فشار وارد بر دیواره خروجی مخزن و محور افقی بیانگر تغییرات زمان می‌باشد.

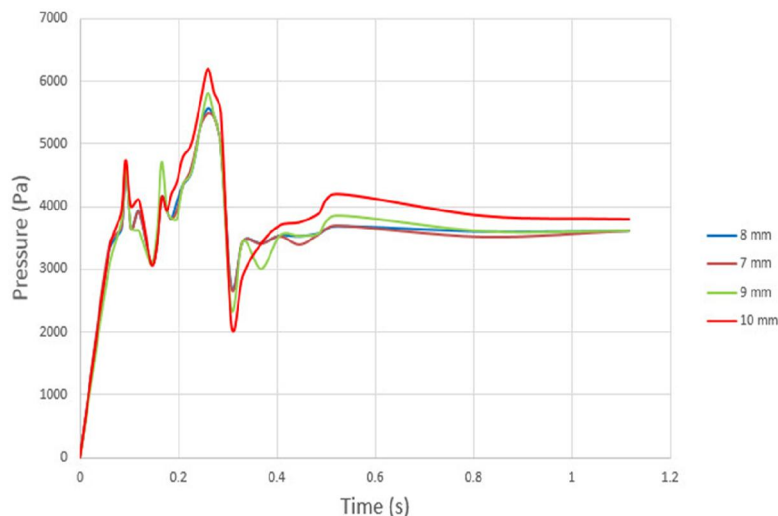
یکی از مهمترین مراحل مدل‌سازی، تعریف مواد و خواص فیزیکی آنها می‌باشد. مواد تعیین شده در این تحقیق آلومینیوم به عنوان بدنه مخزن و نفت سفید به عنوان سیال



شکل ۴- موقعیت تیغه ها در مخزن



شکل ۵- شبکه بندی مخزن ۴ با دو تیغه میراکننده



شکل ۶- نمودار استقلال از شبکه مخزن با اندازه های شبکه ۷، ۸، ۹ و ۱۰ میلیمتر

ترم‌های جابه‌جایی در معادله ناویر- استوکس نیاز به مقادیر روی صفحات می‌باشد. لذا باید این مقادیر از طریق درون‌یابی معلوم گردد. این عمل با استفاده از روش‌های بالادستی انجام خواهد گرفت. به عبارت دیگر متغیرهای میدان (که در مرکز سلول ذخیره می‌شوند) باید در وجوه حجم‌های کنترل درون یابی شوند. در این تحقیق از روش درون‌یابی مرتبه اول که دارای دقت از مرتبه اول می‌باشد، استفاده شده‌است. این روش نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی توانایی همگرایی بیشتری دارد.

۵- معادلات حاکم و ساختار حل عددی

دامنه‌ی سیال درون یک مخزن که بخشی از آن پر است را می‌توان جریان دوفازی (مایع-گاز) با گونه‌های سیال متفاوت در نظر گرفت. هرگونه اختلال مخزن سبب می‌شود که سطح مشترک دو سیال با سرعت جریان حرکت کند [۱۳]. حرکت مایع با سطح آزاد در مخزن متحرک، با توجه به ناپیوستگی در خواص سیالات در سطح مشترک، متحرک بودن این سطح، وجود تغییر در لایه‌های مجاور این سطح و بدون ضخامت بودن این سطح، شبیه‌سازی اینگونه جریان‌ها را به مسئله‌ای چالش برانگیز بدل ساخته‌است. روش عددی که در اینگونه جریان‌ها بکار گرفته می‌شود باید علاوه بر ارضا نمودن معادله‌ی بقای جرم و مقرون به صرفه بودن از لحاظ محاسباتی قادر به معرفی شکل و انحنای سطح نیز باشد.

۴- شرایط مرزی

در تحلیل حاضر چگالی برابر با $1/225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ در نظر گرفته شده‌است. در این مطالعه جاذبه^۱ نیز فعال می‌باشد. شتاب جاذبه‌ای^۲ در محور X برای ۵ ثانیه اول تحلیل به مقدار $51/59 \text{ (m/s}^2\text{)}$ و برای ۵ ثانیه دوم تحلیل برابر صفر در نظر گرفته شد. این مقدار شتاب مورد نیاز هواپیمای مدل می‌باشد تا بتواند برخاست نماید. اعداد توسط سنسورهای تعبیه شده بر روی پرده قابل اندازه‌گیری می‌باشند. مقدار شتاب در راستای محور Y در هر دو بازه‌ی زمانی برابر صفر در نظر گرفته شد. همچنین مقدار شتاب در راستای محور Z برای ۵ ثانیه اول $9/475 \text{ (m/s}^2\text{)}$ و برای ۵ ثانیه دوم برابر $9/81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ در نظر گرفته شد. مقادیر شتاب‌های اعمالی به دلیل شرایط پروازی و شبیه‌سازی‌های انجام شده برای هواپیمای مدل در نظر گرفته شده‌اند.

در فازهای انتخابی، دو فاز هوا و سوخت انتخاب شده‌اند. هوا به عنوان فاز اول و سوخت به عنوان فاز دوم در نظر گرفته شده‌است.

به صورت پیش فرض فلونتت مقادیر تفکیک شده اسکالر را در مرکز سلول ذخیره می‌نماید ولی جهت بدست آوردن

^۱ Gravity

^۲ Gravitational Acceleration

کاربر را برای هر فاز تعریف کرد. با توجه به تعداد فازها معادله‌ی کسر حجمی برای یک فاز کمتر حل می‌گردد و کسر حجمی فاز باقی‌مانده مطابق با محدودیت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (۳)$$

در دیدگاه صریح، نرم افزار از طرح‌های درون‌یابی تفاضل محدود استاندارد برای مقادیر کسرهای حجمی محاسبه شده در گام زمانی قبلی استفاده می‌نماید:

$$\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n \frac{\Delta t}{V} + \sum_f (\rho_q^{n+1} u_f^{n+1} \alpha_{qf}^{n+1}) = \left[+ \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{pq}) + S_{aq} \right] V \quad (۴)$$

این فرمول به حل تکرار معادله‌ی انتقال در هر گام زمانی نیاز ندارد. وقتی از طرح صریح برای انفصال‌سازی زمان استفاده می‌شود، شارهای وجه می‌توانند از فصل مشترک بازسازی شده^۲ درون‌یابی شوند یا از طرح انفصال‌سازی حجم معین استفاده شود. برای حل تلاطم در مخزن سوخت از طرح انفصال‌سازی مرتبه اول و بازسازی هندسی استفاده شده‌است. وقتی از طرح بازسازی هندسی استفاده می‌شود باید حل بصورت ناپایا انجام شود. معادله مومنتوم در سرتاسر دامنه، حل می‌شود و میدان سرعت حاصل به صورت مشترک در اختیار همه فازها قرار می‌گیرد. معادله‌ی مومنتوم نشان داده شده در زیر وابسته به کسرهای حجمی همه فازها و خواص سیال شامل چگالی و چسبندگی می‌باشد:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{aq} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (۵)$$

یکی از محدودیت‌های تقریب میدان مشترک در حالتی است که اختلاف سرعت زیادی در میان فازها وجود داشته باشد، در نتیجه دقت سرعت‌های محاسبه شده در نزدیک فصل مشترک می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد. باید توجه داشت

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 مطلب 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 می‌باشد [۱۴]. برای حل عددی، مدل چند فازی تعریف شده، و فرمولاسیون مورد استفاده در مدل حجم سیال، مدل ضمنی^۱ می‌باشد. در این روش دیدگاه اویلری نسبت به 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 α که به هر کدام از سیال‌ها نسبت داده می‌شود، سطح نیز جابجا می‌شود. کسر حجمی α ، 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 α برای یک ذره از سیال همواره ثابت و متاثر از رفتار جریان نمی‌باشد. نمایش ریاضی α به صورت زیر می‌باشد [۱۴]:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{مایع} \\ 0 & \text{گاز} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{فصل مشترک} \end{cases} \quad (۱)$$

فصل مشترک میان فازها با حل معادله‌ی پیوستگی برای کسر حجمی یکی (یا بیشتر) از فازها انجام می‌گیرد. برای فاز q، این معادله به صورت زیر است [۱۵]:

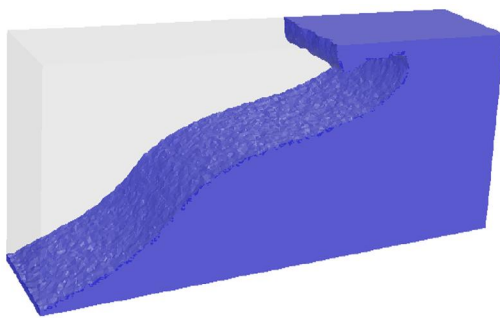
$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{aq} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (۲)$$

که \dot{m}_{qp} انتقال جرم از فاز q به فاز p و \dot{m}_{pq} انتقال جرم از فاز p به فاز q است. به صورت پیش فرض ترم چشمه S_{aq} در سمت راست معادله‌ی (۲) برابر صفر می‌باشد، اما می‌توان یک مقدار ثابت یا چشمه‌ی جرمی تعریف شده توسط

^۲ Interface Reconstruction

^۱ Implicit

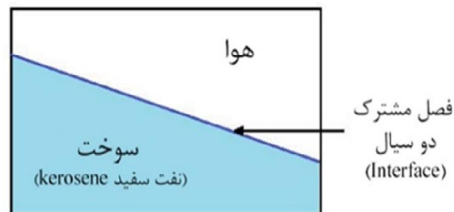
حل عددی صورت گرفت. مقایسه نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی نشان دهنده دقت مدل عددی در شبیه‌سازی تلاطم در داخل مخزن می‌باشد. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود میزان خطا بین روش عددی و تجربی کمتر از ۴ درصد می‌باشد که نشان دهنده تطابق مناسب بین دو روش است. حال با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان حل عددی را برای مخازن ۱ تا ۵ مورد استفاده قرار داد.



شکل ۸- مخزن مدل‌سازی شده جهت صحت‌گذاری تحلیل

نتایج مخزن ۱ بدون تیغه‌های میراکننده به ترتیب در حالت سکون مخزن قبل از اعمال شتاب گرانشی و در زمان ۰/۰۹ ثانیه در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ آمده‌است. شکل ۱۳ سطح مشترک مایع در زمان ۰/۱۹ ثانیه برای مخزن بدون تیغه میراکننده وجود تلاطم در مقیاس بزرگ را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود سوخت به‌سرعت در خلاف جهت شتاب اعمال شده حرکت کرده و به بخش انتهایی مخزن رفته و آن قسمت از مخزن که محل پمپ شدن سوخت به سمت موتور می‌باشد، خالی از سوخت می‌شود. از اینرو ورودی لوله که معمولا در قسمت تحتانی مخزن قرار دارد درون سوخت فرو نرفته و از غوطه‌وری مداوم لوله درون سوخت جلوگیری می‌کند که این مساله می‌تواند پرواز را به مخاطره انداخته و باعث نرسیدن سوخت به موتور در حالت‌های مختلف پروازی و مانورهای هواپیما گردد. همچنین نتایج پیشرفت زمانی برای مخزن ۲ به ترتیب در حالت سکون مخزن قبل از اعمال شتاب گرانشی و در زمان‌های ۰/۰۴، ۵/۵۳ ثانیه در شکل ۱۵، شکل ۱۶ و شکل ۱۷ نشان داده شده‌است. بخشی از تیغه‌های میراکننده در این مخزن به طور کامل درون سوخت غوطه‌ور می‌باشد که در شکل ابتدایی از این مجموعه آمده است.

که اگر نسبت چسبندگی بزرگتر از 1×10^{-3} باشد، ممکن است مشکلاتی در همگرایی نیز بوجود آید. گام اول در حل مسأله چند فازی، تعیین مدل مناسب برای رژیم جریان و چگونگی تعیین محل فصل مشترک برای جریان های حاوی حباب‌ها، قطرات و یا ذرات می‌باشد.



شکل ۷- فصل مشترک دو سیال درون مخزن سوخت

در دینامیک سیالات محاسباتی، روش حجم سیال^۱ یک روش عددی برای ردیابی محل سطح آزاد می‌باشد. مدل حجم سیال می‌تواند تعداد دو یا بیشتر سیال غیر قابل امتزاج را با حل یک مجموعه معادلات مومنتوم و ردیابی کسر حجمی هریک از سیالات در سرتاسر دامنه‌ی محاسباتی مدل کند و اینگونه میزان حجم هر سیال را در زمان‌های مختلف دنبال می‌کند، به همین دلیل نمونه‌هایی که با این مدل تحلیل می‌شوند در گروه جریان های دو فازی قرار می‌گیرند. از اینرو روش حجم سیال مناسب‌ترین مدل فازی در نرم افزار فلوئنت برای شبیه‌سازی تلاطم سیال در مخزن سوخت هواپیما می‌باشد.

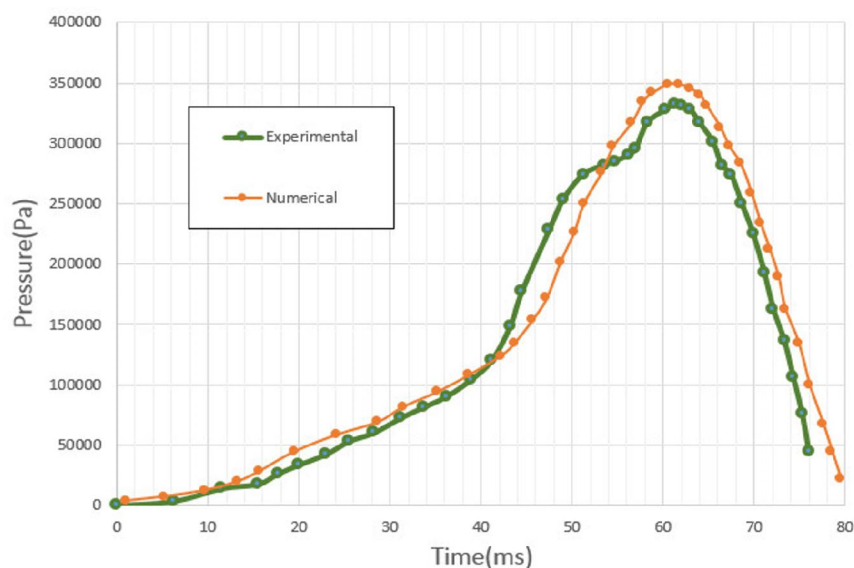
۶- نتایج

برای صحت‌گذاری روش عددی از نتایج آزمایشگاهی شریپارشا و همکارانش [۱۶] استفاده شده است. در تحقیق انجام شده توسط ایشان یک مخزن به ابعاد $1008 \times 196 \times 300$ در حالت پرشدگی به میزان ۱۸۰ میلی‌متر بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. مخزن در مدت زمان ۸۰ میلی ثانیه تحت شتاب $30 \text{ (m/s}^2\text{)}$ در جهت X قرار گرفته است. برای نشان دادن دقت نتایج روش عددی، مخزن استفاده شده در تحقیق ایشان دقیقاً مدل‌سازی شده‌است و با شرایط مشابه مرزی،

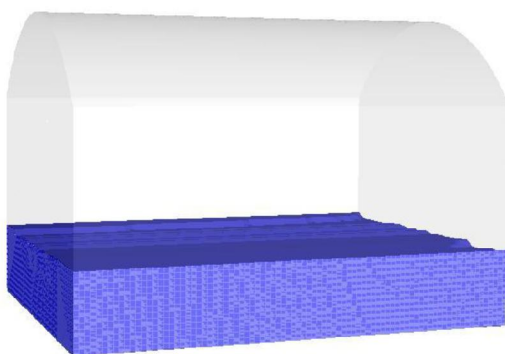
^۱ Volume Of Fluid (VOF)

قرارگیری تیغه‌ها تجمع سوخت در انتهای مخزن در زمان طولانی‌تر رخ می‌دهد و این نشان دهنده تلاطم کمتر می‌باشد. همچنین در ادامه نتایج پیشرفت زمانی برای مخزن ۵ با تیغه‌های تحتانی و فوقانی در حالت اعمال شتاب گرانشی در زمان‌های ۰/۰۷۶۶ و ۵/۳۰ ثانیه در شکل ۲۲ و شکل ۲۳ آمده‌است. در این حالت تیغه میانی حذف شده و همین امر باعث برگشت جریان از فضای میان تیغه پایینی و بالایی می‌شود که در نتیجه منجر به تلاطم و نآرامی بیشتر سیال درون مخزن شده‌است.

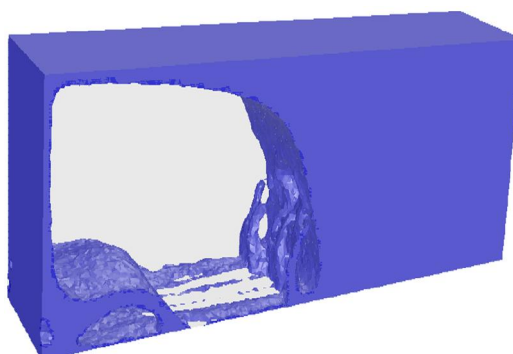
نتایج پیشرفت زمانی برای مخزن ۳ با تیغه‌های تحتانی و میانی به ترتیب در حالت اعمال شتاب گرانشی در زمان‌های ۰/۰۵ و ۵/۶۵ ثانیه در شکل ۱۸ و شکل ۱۹ آمده‌است. در این حالت تیغه‌ها (cm) ۶/۵ بلندتر شده و بخشی از سوخت در حال عبور از سوراخ تیغه‌ها می‌باشد. نتایج پیشرفت زمانی برای مخزن ۴ با تیغه‌های تحتانی و میانی و فوقانی که بطور همزمان قرار گرفته‌اند به ترتیب در حالت اعمال شتاب گرانشی در زمان‌های ۰/۰۸۵ و ۵/۲۵ ثانیه در شکل ۲۰ و شکل ۲۱ آمده است. با توجه به نتایج، در این حالت از



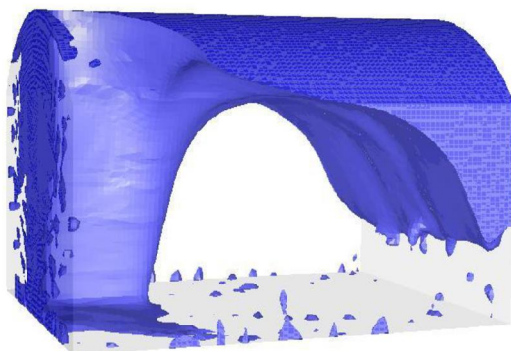
شکل ۹- انطباق پروفیل حرکت سیال درون مخزن مدل شده و مرجع [۱۶]



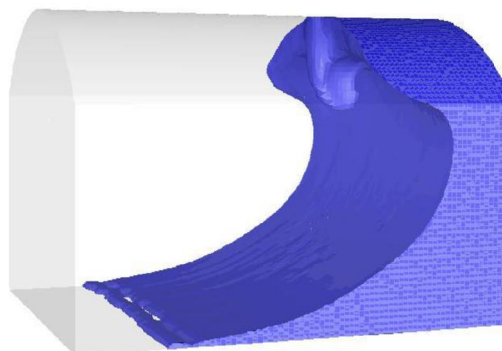
شکل ۱۱- مخزن حالت ۱ بدون تیغه میراکننده در زمان $t=0$ با عمق پرشدگی ۵۰ میلی‌متر



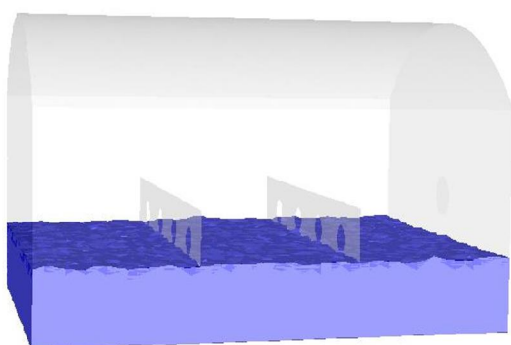
شکل ۱۰- مخزن مدل‌سازی شده جهت صحت‌گذاری تحلیل بعد از ۸۰ میلی ثانیه



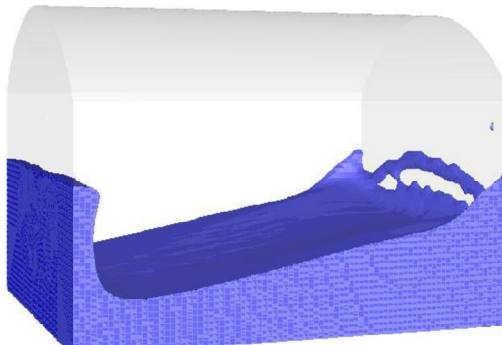
شکل ۱۳- مخزن حالت ۱ بدون تیغه میراکننده در زمان $t=0/19$ با عمق پرشدگی ۵۰ میلیمتری



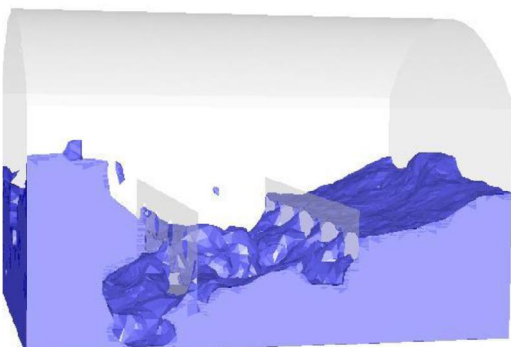
شکل ۱۲- مخزن حالت ۱ بدون تیغه میراکننده در زمان $t=0/09$ با عمق پرشدگی ۵۰ میلیمتری



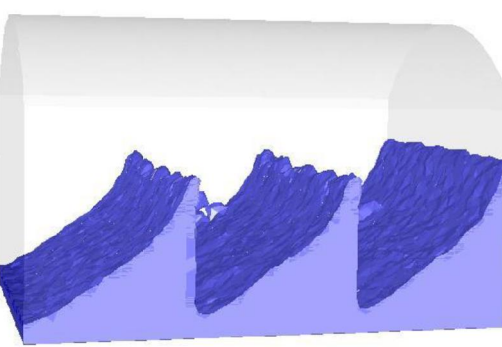
شکل ۱۵- مخزن حالت ۲ با تیغه میراکننده تختانی در زمان $t=0$



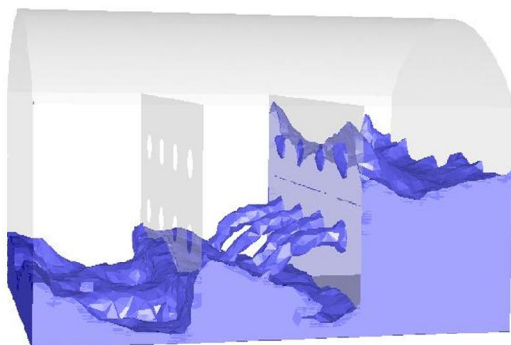
شکل ۱۴- مخزن حالت ۱ بدون تیغه میراکننده در زمان $t=5/24$ با عمق پرشدگی ۵۰ میلیمتری



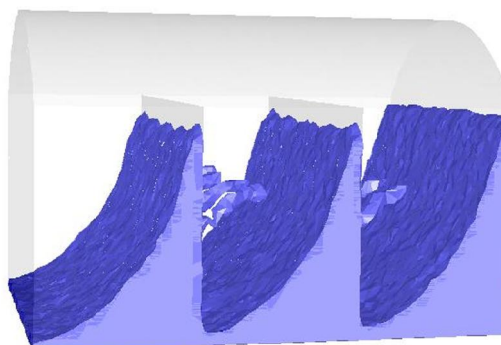
شکل ۱۷- مخزن حالت ۲ با تیغه میراکننده تختانی در زمان $t=5/52$



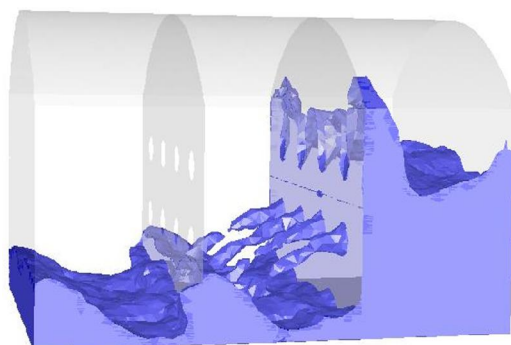
شکل ۱۶- مخزن حالت ۲ با تیغه میراکننده تختانی در زمان $t=0/04$



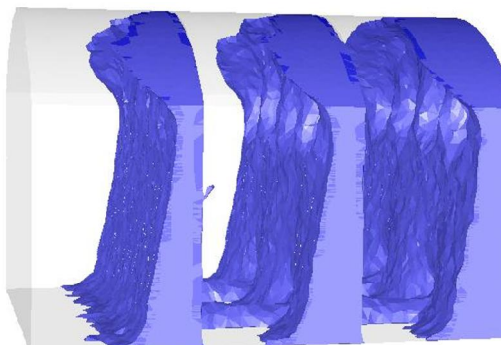
شکل ۱۹- مخزن حالت ۳ با تیغه میراکننده تحتانی و میانی در زمان $t=5/65$



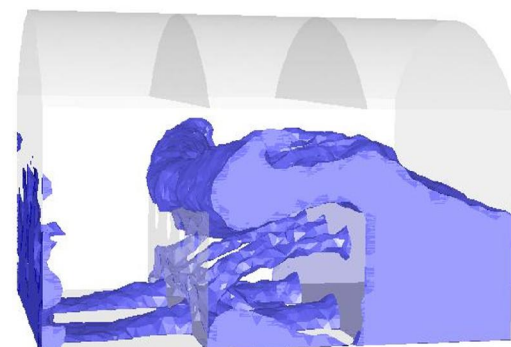
شکل ۱۸- مخزن حالت ۳ با تیغه میراکننده تحتانی و میانی در زمان $t=0/05$



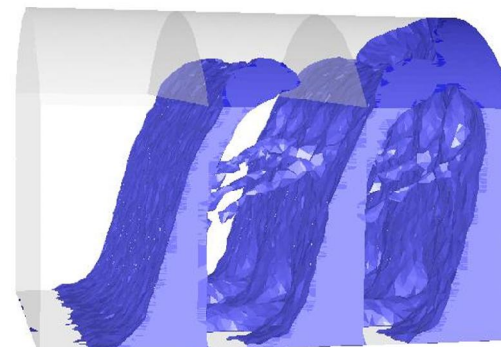
شکل ۲۱- مخزن حالت ۴ با تیغه میراکننده تحتانی و میانی و فوقانی در زمان $t=5/25$



شکل ۲۰- مخزن حالت ۴ با تیغه میراکننده تحتانی و میانی و فوقانی در زمان $t=0/085$



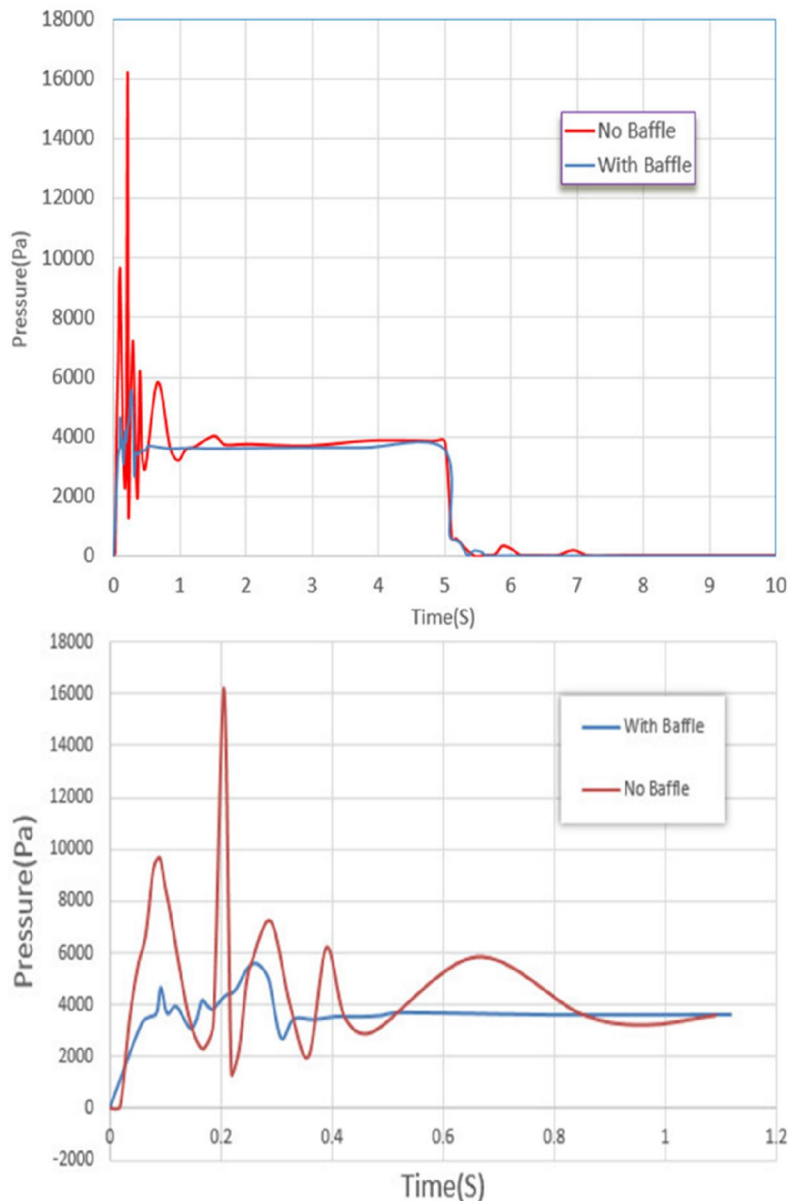
شکل ۲۳- مخزن حالت ۵ با تیغه میراکننده تحتانی و فوقانی در زمان $t=5/30$



شکل ۲۲- مخزن حالت ۵ با تیغه میراکننده تحتانی و فوقانی در زمان $t=0/0766$

موتور شده و خطر آفرین باشد. با توجه به نمودار شکل ۲۴ مشاهده می‌شود که سیال در مخزن بدون تیغه در حالت‌های ابتدایی اعمال شتاب، خیلی متلاطم بوده و دامنه‌ی تغییرات فشار زیادی به دیواره‌ی مخزن اعمال می‌گردد.

با مقایسه‌ی تحلیل مخزن در حالت با تیغه میراکننده و بدون تیغه میراکننده می‌توان به اهمیت وجود تیغه پی‌برد. در حالت بدون تیغه‌ی میراکننده در لحظاتی قسمت ورودی پمپ سوخت که در قسمت انتهای مخزن قرار دارد، خالی از سوخت می‌شود که این امر می‌تواند باعث اختلال در عملکرد



شکل ۲۴- نمودار تغییرات فشار بر دیواره‌ی مخزن در حالت ۱ و ۲

از آشکارترین نتایج اثر نیروهای داخلی در این مخازن نیمه پر تغییرات نوسان سطح مایع می‌باشد و این نوسان به صورت مستقیم و یا غیرمستقیم می‌تواند ناپایداری‌های غیرقابل انتظار و خرابی‌هایی را در سامانه‌ها باعث گردد.

۸- فهرست علائم

انرژی	E
شتاب، m/s^2	g
مقدار کسر حجمی فاز q در وجه	$\alpha_{q,f}$
ضریب انتقال حرارت، W/m^2-k	h
ضریب هدایت حرارتی موثر	k_{eff}
جرم از فاز q به فاز p	\dot{m}_{qp}
انتقال جرم از فاز p به فاز q	\dot{m}_{pq}
ترم چشمه	S_{aq}
چشمه های حرارتی حجمی	S_h
دمای، K	T
شار حجمی گذرنده از وجه بر مبنای سرعت نرمال	u_f
حجم سلول	V
مختصات در دستگاه کارترین	X, Y, Z
چگالی، kg/m^3	ρ
سیال	f
فاز اول	q
فاز دوم	p
گام زمانی جدید (فعلی)	$n+1$
گام زمانی قبلی	n
کسر حجمی سیال	α

بر اساس نتایج بدست آمده در شکل ۲۴ در مخزن دارای تیغه، سیال متلاطم پس از ۰/۳۵ ثانیه به یک پایداری نسبی می‌رسد و در حالیکه در مخزن بدون تیغه می‌راکننده این پایداری نسبی بعد از زمان ۱/۱ ثانیه رخ می‌دهد. همانطور که دامنه تحریک افزایش می‌یابد و یا فرکانس سیستم به فرکانس طبیعی تلاطم می‌رسد، تخریب توسط تلاطم شدیدتر می‌گردد. در مخزن سیال فاقد تیغه میراکننده، تلاطم سیال توسط تنش‌های ویسکوز میرا می‌شود و در مخزن با تیغه، بهترین ارتفاع تیغه میراکننده به منظور اعمال بهترین میرایی و میرا نمودن نوسانات سطح آزاد سیال و تلاطم سوخت، تیغه تختانی به همراه تیغه میانی و فوقانی را می‌توان در نظر گرفت که این مقدار با توجه به هندسه مخزن، عمق پرشدگی، تعداد و موقعیت قرارگیری تیغه‌ها می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق اثر شکل‌های مختلف تیغه‌ها بر پدیده‌ی تلاطم در یک مخزن سوخت هواپیمای مدل با اعمال شرایط پروازی مشابه با استفاده از روش عددی حجم سیال مورد بررسی قرار گرفته‌است. قرارگیری تیغه‌ها در چهار حالت بررسی شده‌است و عمق پرشدگی مخزن ۵۰ میلیمتر می‌باشد. صحت روش عددی با نمونه‌ی آزمایشگاهی مرجع [۱۶] اعتبارسنجی شده است و میزان خطای بدست آمده در حدود ۲-۴ درصد می‌باشد که نشان از دقت مناسب روش عددی در این مدل‌سازی تلاطم دارد. با توجه به نتایج، با زیاد بودن ارتفاع تیغه‌ها میزان تلاطم سیال درون مخزن کمتر خواهد بود. با توجه به نمودار شکل ۲۴ مشاهده می‌شود سیال درون مخزن بدون تیغه‌ی میراکننده در زمان‌های ابتدایی اعمال شتاب، بسیار متلاطم بوده و دامنه تغییرات فشار زیادی بر دیواره مخزن اعمال می‌نماید و در زمان تقریبی ۰/۲ ثانیه به بیشترین فشار ۱۶۳۰۰ پاسکال می‌رسد. بین زمان‌های ۰/۲۳-۰/۲۰ ثانیه از فشار ۱۶۳۰۰-۱۲۰۰ پاسکال متغییر است اما در مخزن دارای تیغه‌ی میراکننده دامنه تغییرات فشار بسیار کمتر و بین ۵۷۰۰-۲۷۰۰ پاسکال متغیر می‌باشد و در زمان‌های ۰/۳۰-۰/۲۲۵ رخ می‌دهد. در مخزن بدون تیغه میراکننده در زمان اولیه اعمال شتاب قسمت خروجی مخزن خالی از سیال می‌گردد و می‌تواند باعث بروز اختلال در کارکرد موتور و پرواز هواپیما شود.

- boundary elements method. J Press Vess-T ASME 135(2): 021301.
- [10] Hwang SC, et al. (2016) Numerical simulations of sloshing flows with elastic baffles by using a particle-based fluid-structure interaction analysis method. Ocean Eng 118: 227-241.
- [11] Goudarzi MA, PN Danesh (2016) Numerical investigation of a vertically baffled rectangular tank under seismic excitation. J Fluid Struct 61: 450-460.
- [12] Wang W, et al. (2016) A numerical study of the effects of the T-shaped baffles on liquid sloshing in horizontal elliptical tanks. Ocean Eng 111: 543-568.
- [۱۳] قاسمی، ب، مرعشی ح، خوشنود ع، فتحعلی م (۲۰۱۸) بررسی عملکرد دینامیکی وسیله نقلیه تانکر دار متأثر از تلاطم سیال درون مخزن با استفاده از روش شبیه سازی چند فیزیکی. مکانیک سازه ها و شماره ها ۲۰۲-۱۸۳: ۸(۱).
- [۱۴] سررشته داری ع، شاه مردان م، قرایی ر (۲۰۱۲) شبیه سازی عددی و ارزیابی تجربی تلاطم سطح آزاد مایع تحت تحریک عرضی در یک مخزن مستطیلی. مکانیک سازه ها و شماره ها ۸۹-۹۵: ۱(۱).
- [15] Nema PK (2014) Computational study of sloshing behavior in 3-D rectangular tank with and without baffle under seismic excitation. Doctoral Dissertation.
- [16] Shreeharsha HV, hivakumar SSG, Mallikarjun SG (2017) Simulation of sloshing in rigid rectangular tank and a typical aircraft drop tank. Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering 6: 186.
- ۹- مراجع
- [1] Ibrahim RA (2005) Liquid sloshing dynamics: Theory and applications. Cambridge University Press.
- [2] Abramson HN, Silverman S (1966) Lateral sloshing in moving containers. NASA Special Publication, 106, 13.
- [3] Cho J, Lee H, Ha S (2005) Finite element analysis of resonant sloshing response in 2-D baffled tank. J Sound Vib 288(4-5): 829-845.
- [4] Hyun-Soo K, Young-Shin L (2008) Optimization design technique for reduction of sloshing by evolutionary methods. J Mech Sci Technol 22(1): 25-33.
- [5] Panigrahy P, Saha U, Maity D (2009) Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks. Ocean Eng 36(3-4): 213-222.
- [6] Wu CH, Chen BF (2009) Sloshing waves and resonance modes of fluid in a 3D tank by a time-independent finite difference method. Ocean Eng 36(6-7): 500-510.
- [7] Koli GC, Kulkarni VV (2010) Simulation of fluid sloshing in a tank. In Proceedings of the World Congress on Engineering 2: 2078-0958.
- [8] Fries N, Behruzi P, Arndt T, Winter M, Netter G, Renner U, Astrium Space Transportation (2012) Modelling of fluid motion in spacecraft propellant tanks-Sloshing. In Space Propulsion 2012 Conference 7-10.
- [9] Firouz-Abadi R, Borhan-Panah M (2013) Sloshing analysis of flowing liquid in 3D tank using