



Modeling and Simulation of Fuel Sloshing in Tank by Pendulum Model

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Naseh H.^{*1} PhD,
Alipour A.² MSc,
Daneshgar P.³ MA

How to cite this article

Naseh H, Alipour A, Daneshgar P.
Modeling and Simulation of Fuel
Sloshing in Tank by Pendulum Model.
Modares Mechanical Engineering.
2019;19(8):2001-2011.

ABSTRACT

The aim of this article is to present the methodology for modeling and simulation of start effects in spacecraft or satellite's propulsion system on the fuel sloshing in the tank by pendulum model in microgravity conditions. In other words, the main aim of this paper is pure sloshing study of fuel and ullage gas relative movement, neglecting the role of Propellant Management Device (PMD). To this end, fuel sloshing in tank is performed by utilizing the Fluent software based on pendulum model. Firstly, algorithm inputs are determined (existing input, fuel and ullage gas volume, loading, dimensional specifications, etc.); then, tank is modeled and designed and, finally, fuel sloshing simulation in micro-gravity conditions is developed. Fuel sloshing modeling and simulation outputs include determining the sloshing damping rate and its value in the simulation at 20 sec, velocity variation contour, velocity direction contour in the tank, and also ullage gas and fuel relative location in 0.2, 0.4, and 1 sec. The accuracy of the obtained results has been evaluated with the similar experimental results.

Keywords Fuel Sloshing; Simulation and Modeling; Pendulum Model; Gravity

CITATION LINKS

[1] Liquid motions in nonaxisymmetric, partially filled containers rotating at zero gravity [2] The new dynamic behavior of liquids in moving containers [Technical Report] [3] Advanced method to estimate fuel slosh simulation parameters [4] Numerical and experimental investigation of vortex breaker effectiveness on the improvement in launch vehicle ballistic parameters [5] Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries [6] Mechanical analog approach to parameter estimation of lateral spacecraft fuel slosh [7] Surface tension PMD tank for on orbit fluid transfer [8] Experimental study on the capillary flow in the vane-wall gap geometry [9] Development and implementation of a process for producing a highly wettable aluminum PMD for the GPM hydrazine tank [10] A computational investigation for determining the natural frequencies and damping effects of diaphragm implemented spacecraft propellant tanks [11] Hybrid propellant tanks for spacecraft and launch vehicles [12] Propellant tank with surface tension PMD for tight center-of-mass propellant control [13] Numerical investigation of performance of vane-type propellant management device by VOF methods [14] Numerical analysis and experiment research on fluid orbital performance of vane type propellant management device [15] VOF simulation of marangoni flow of gas bubbles in 2D-axisymmetric column [16] CFD fuel slosh modeling of fluid-structure interaction in spacecraft propellant tanks with diaphragms [17] A CFD approach to modeling spacecraft fuel slosh [18] Investigation of propellant sloshing and zero gravity equilibrium for the orion service module propellant tanks [19] Propellant Management Device (PMD) System Design Methodology in Zero Gravity Condition [20] Propellant Management Device (PMD) Design Optimization of Hydrazine Fuel Tank [21] Liquid sloshing dynamics: Theory and applications [22] Recent Advances in Fluid Dynamics with Environmental Applications [23] Fluid dynamics in physics, engineering and environmental applications

¹Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

²Mechanical & Aerospace Engineering Department, Engineering Faculty, Electronic Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³Chemical Engineering Department, Technical University, Ahvaz, Iran

*Correspondence

Address: Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

Phone: -

Fax: -

hnaseh@ari.ac.ir

Article History

Received: July 28, 2018

Accepted: January 26, 2019

ePublished: August 12, 2019

مدل سازی و شبیه سازی تلاطم سوخت در مخزن با استفاده از مدل پاندولی

حسن ناصح* PhD

پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

علی عالی پور MSc

گروه مهندسی مکانیک و هوا فضا، دانشکده فنی و مهندسی، واحد الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پریسا دانشگر MA

گروه مهندسی صنایع شیمیایی، دانشگاه فنی حرفه ای، اهواز، ایران

چکیده

هدف از ارائه مقاله، تبیین روش مدل سازی و شبیه سازی تأثیرات استارت سامانه پیشرانش ماهواره یا فضاپیما بر تلاطم (تکانه) سوخت درون مخزن با استفاده از مدل پاندولی در شرایط جاذبه ناچیز است. به عبارت دیگر، هدف اصلی در این مقاله مطالعه خاص تلاطم سوخت و گاز فشارگذاری (نسبت به یکدیگر)، صرف نظر از نقش سامانه مدیریت پیشرانش در مخزن سوخت است. برای این منظور حرکت تلاطم های سوخت درون مخزن در نرم افزار دینامیک سیالات فلوئنت براساس مدل پاندولی، ایجاد شده است. بر این اساس، روندنمای مطالعه بدین صورت است که ابتدا ورودی های روندنمای (تحریک ورودی به مخزن، حجم سوخت و گاز بالشتک، بارگذاری ها و مشخصات ابعادی و غیره) تعیین و سپس مخزن مدل سازی و طراحی می شود و در نهایت شبیه سازی تلاطم سوخت درون مخزن در شرایط جاذبه ناچیز صورت می پذیرد. خروجی مدل سازی و شبیه سازی تلاطم سوخت که شامل نرخ میرایی تلاطم و تعیین مقدار آن در لحظه ۲۰ ثانیه از شبیه سازی، کانتور تغییرات سرعت، کانتور جهت سرعت در مخزن و همچنین کانتور موقعیت سوخت و گاز نسبت به یکدیگر در لحظات ۰/۲، ۰/۴ و یک ثانیه است. دقت نتایج به دست آمده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی نمونه مشابه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلیدواژه ها: تلاطم سوخت، مدل سازی و شبیه سازی، مدل پاندولی، گرانش

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶

*نویسنده مسئول: hnaseh@ari.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مهم ترین بخش ها در ماهواره ها و فضاپیماها، مخزن سوخت آنها است. دلیل این اهمیت را می توان نیاز به سوخت رسانی بی وقفه از مخزن سوخت به محفظه احتراق وسایل فضایی در شرایط بدون جاذبه یا جاذبه های بسیار ناچیز دانست. چنانچه مشهود است، سوخت این وسایل پرنده در شرایط بی وزنی و بدون جاذبه یا با جاذبه های ناچیز از خود رفتاری متفاوت از سطح زمین (شرایط عادی جاذبه) نشان می دهند و به خوبی و با اطمینان همانند سطح زمین، سوخت را به موتور انتقال نمی دهند، حتی اگر حجم زیادی سوخت در مخزن وجود داشته باشد و سوخت مخزن تمام نشده باشد. در شرایط بی وزنی، موتور در زمان مناسب روشن نمی شود و اگر در حال کار باشد ممکن است به دلیل ورود بیش از حد گاز بالشتک گازی سر مخزن سوخت به موتور، موتور خاموش شود و بعضاً بنا به نوع طراحی موتور ممکن است با انفجار همراه شود. در شرایط دیگر نیز امکان دارد، در صورت قطع سوخت از ورود به محفظه احتراق، موتور دوباره قابل استارت نباشد و نهایتاً مأموریت وسیله فضایی با شکست روبه رو شود. برای رویارویی با این مشکل، در مأموریت های فضایی از سامانه مدیریت پیشران استفاده می شود. سامانه مدیریت پیشران، راه حلی برای جدایی سوخت از انتهای مخزن و نبودن سوخت در دهانه خروجی مخزن غیرقابل انجام هستند. بنابراین به طور خلاصه می توان گفت که موفقیت و تحقق یک مأموریت فضایی مجهز به سامانه پیشرانش،

کاملاً به عملکرد درست مخزن سوخت، وابسته است. برای این منظور، این مقاله با هدف توسعه دانش فنی طراحی سامانه های مدیریت پیشران، تعریف و صورت پذیرفته است.

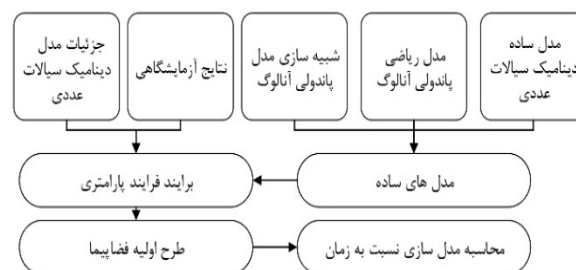
ویز و دج^[۱]، با ارائه مقاله ای نشان دادند که فضاپیماها با استفاده از حرکت چرخشی می توانند هم موقعیت خود را تثبیت کنند و هم باعث کاهش اثرات حرارتی خورشید بر فضاپیما شوند. علاوه بر فضاپیماها و ماهواره ها، حرکت چرخشی در مراحل بالای پرتابگر که باعث حرکت غیرخطی سوخت در مخزن سوخت فضاپیماها می شود را می توان برای مثال نام برد. این نوع حرکت ها باعث می شوند که سوخت در داخل مخزن سوخت، گردش کند و در نهایت سبب ازبین رفتن قدرت موتور و خاموش شدن آن و سپس ازبین رفتن توان حرکتی فضاپیما شود. دج^[۲] اضافه نمود که پایداری فضاپیماها به توان حرکت چرخشی آن وابسته است، بنابراین از دست دادن توان حرکتی برای فضاپیماهای یک بار مصرف می تواند فاجعه بار باشد. ماهیت حرکت چرخشی فضاپیماها باعث تثبیت حرکت و قرارگیری موقعیت فضاپیماها در یک زاویه خاص می شود که مقدار این چرخش با توجه به تحلیل های سیستم کنترلی به دست می آید. برای مانور و حرکت ایده آل فضاپیماها، زاویه حرکتی می تواند بسیار کوچک باشد. زمانی که فضاپیماها در حال چرخش با زاویه نسبتاً کوچک هستند، در یک لحظه جزئی، حرکت لرزشی یا تکانه های سوخت درون مخزن می تواند باعث تشدید این زاویه حرکتی شود و نرخ زاویه را به مقدار نامشخص تغییر دهد. ساچل و همکاران^[۳]، در مقاله خود اضافه می کنند اگر رشد زاویه کنترل نشود، منجر به حرکت ناقص و تخلیه غیرقابل کنترل سوخت از مخزن خواهد شد و نرخ سوخت مصرفی افزایش خواهد یافت و حتی در شرایط مشابه مأموریت ATS-۵ که در سال ۱۹۶۹، سبب از دست رفتن کنترل کامل فضاپیما می شود.

با توجه به دلایل فوق، درک کامل تلاطم های دینامیکی مخزن سوخت فضاپیماها می تواند از بروز مشکلات و چالش های بزرگ پیشگیری کند. بسیاری از فعالیت های علمی و تحقیقاتی این حوزه برای درک بهتر دینامیک پشت تلاطم های سوخت در فضاپیماها در بخش سرویس های پرتاب (ارائه خدمات پرتاب ماهواره) در مرکز فضایی کندی ناسا صورت می پذیرد. هدف اصلی این تحقیقات، یافتن مدلی برای بررسی هرچه بهتر رفتار تلاطم های سوخت درون مخزن است. همچنین یک مرکز تحقیقاتی پیشرفته^[۴]، با هدف بررسی تلاطم های سوخت در دانشگاه هوانوردی ریدل امپری طراحی و ساخته شده است. این مرکز، آزمون های جدیدی را طراحی و دستاوردهای قابل اعتمادی را ارائه نموده است. از مطالعات حاضر در مرکز تحقیقات فضایی امپری- رایدل می توان به مدل سازی سطح تلاطم ها در مخزن سوخت با استفاده از روش های مختلف اشاره نمود. نمونه ای از این روش ها در مخزن های کروی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی صورت پذیرفته است. در پژوهشی^[۴]، نحوه استفاده از بسته نرم افزاری با نام فلوئنت، برای ایجاد مدل و شبیه سازی حرکت تلاطم های مخزن سوخت معرفی شده است. این برنامه المان محدود با استفاده از تکنیکی که روش حجم سیال (VOF) نامیده می شود، برای مدل سازی و تعامل میان مایعات به کار گرفته می شود. هیرت و نیکولز^[۵]، در مقاله خود برای مواردی مانند سطح آزاد تلاطم ها، برای مایعاتی که سوخت و هوا هستند نشان می دهد، تلاطم های سوخت در داخل مخزن به طور طبیعی جهت جریان هوا را تغییر می دهند. با استفاده از قوانین جرم، مومنتوم، معادلات انرژی و همچنین معادلات VOF، می توان رفتار مایعات و مقادیر نیروهای حرکتی آنها را پیش بینی نمود.

بررسی محاسباتی تعیین فرکانس طبیعی و نوسانات دیافراگم و تاثیر آن بر مخزن سوخت و سامانه سوخت رسانی متمرکز نمودند. سامانه مدیریت پیشرا نه در این مرجع برای مخزن طراحی شده از نوع دیافراگمی بوده است و تلاطم های با درجات آزادی را در روی زمین مورد بررسی قرار داده است نه شرایط بدون گرانش. تام و همکاران^[11] در سال ۲۰۱۶ با ارائه مقاله ای با عنوان سیر تکامل طراحی و تولید مدیریت مصرف سوخت برای پروازهای فضایی در اروپا و ایالات متحده به بررسی مخزن های ساخته شده می پردازند. نگاهی به روند مخزن های تولید شده از سال ۱۹۷۰ تاکنون دارد و نتایج فقط شامل عکس از مخزن های مونتاژ شده و نهایی است. تام و همکاران^[12]، مخزن سوخت کاوشگر مریخ را که در سال ۱۹۸۸ استفاده و چندین بار در ماهواره های تجاری مورد استفاده قرار گرفته است را مورد بازبینی قرار داده و تغییرات مرکز جرم مخزن را در حین ماموریت خود به حداقل رسانده اند. مخزن موجود از نظر حاشیه ایمنی سازه، مورد بررسی قرار گرفته و آزمون های تجربی فشاری بیشتری انجام شده است. سامانه مدیریت پیشرا نه استفاده شده مورد بازبینی قرار گرفته و بزرگ تر شده است. (تکانه های مخزن سوخت در مقاله در محیط بدون گرانش محاسبه نشده و باید مورد بررسی قرار گیرد و ابعاد این مخزن و ضرایب اطمینان آن در طراحی مخزن این مقاله استفاده شده است). لیو و همکاران^[13]، طراحی و تحلیل سامانه مدیریت پیشرا نه را با استفاده از روش حجم مایع VOF انجام داده اند. در این مرجع با استفاده از الگوریتم حرکت سیمپل سی، تحلیل و شبیه سازی ها به صورت دوبعدی نشان داده شده و محاسبات متغیر با زمان انجام شده است. همچنین حل جریان به صورت دوفازی و با فرض گاز هلیوم و سوخت هیدرازین صورت پذیرفته که طی مراحل و با استفاده از نمودار نرخ جریان، بهینه سازی انجام شده است. شبیه سازی که در مقدمه سه بعدی ذکر شده، انجام شده، ولی تمامی تصاویر ارائه شده دوبعدی است و تحلیل ها فقط بر سامانه مدیریت پیشرا نه (نه به صورت جامع و به همراه مخزن) انجام شده است. هو و همکاران^[14]، مقایسه ای بین شبیه ساز نرم افزاری و نتایج آزمایشگاهی شبیه سازی بدون گرانش انجام داده اند (نتایج نرم افزاری نهایی و با ارائه عکس دوبعدی انجام شده است و نتایج آزمایشگاه با ارائه عکس انجام شده و خطاها و تفاوت های بین این دو بررسی شده است).

لهندل و همکاران^[15]، شبیه سازی دوبعدی حباب به روش حجم مایع را انجام داده اند *سانسز* و همکاران^[16]، شبیه سازی نیروهای وارد شده به سوخت درون مخزن همراه با دیافراگم، فضاپیما و تاثیر این تکانه ها روی حرکت سوخت را با نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی و تحت تاثیر گرانش انجام دادند. *مارسل* و همکاران^[17]، روی شبیه ساز تکانه های سوخت در مخزن همراه با دیافراگم، با نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی تحت تاثیر گرانش کار کرده اند. همزمان نتایج تجربی را با نتایج نرم افزاری مقایسه کرده اند (با توجه به دستگاهی که انتخاب کرده اند و نزدیک بودن نتایج نهایی این آزمایش با توجه به گرانش زمین انجام شده و هیچ گونه سامانه مدیریت پیشرا نه برای مخزن طراحی نشده است و فقط تکانه در مخزن را مورد بررسی قرار داده اند). در پژوهشی^[18]، روی شبیه سازی تکانه های سوخت درون مخزن با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی نرم افزاری، این کار را انجام داده اند و مخزن مورد نظر متناسب با مخزن به کاررفته در فضاپیما Orion است. *ناصر* و *علی پور*^[19, 20]، شبیه سازی و تحلیل سامانه مدیریت

ضرایب فشار و سرعت به صورت تابعی از زمان مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج به دست آمده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی با چندین سناریو مورد مطالعه و آزمون تجربی در آزمایشگاه قرار گرفته است. مدل های دینامیک سیالات محاسباتی با نتایج مورد تایید تجربی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته اند. همچنین تغییراتی مانند تغییر در میزان گرانش، مخزن های کروی با اندازه های بزرگ تر، شکل های متفاوتی از مخزن و سیال با ویسکوزیته متفاوت بررسی شده است. در نهایت، مدل تغییراتی شامل مخزن با سامانه مدیریت پیشرا نه دیافراگمی یا پره ای می شود. شکل ۱، نمونه ای از روندنمای شبیه سازی تلاطم های سوخت درون مخزن را که می توان به عنوان مرجع از آن استفاده نمود، نشان می دهد. چتمن و همکاران^[6]، در مقاله ای، یکپارچه سازی مدل دینامیک سیالات محاسباتی را با تحقیقات آزمون آزمایشگاهی انجام شده برای شبیه سازی تلاطم های سوخت در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فضایی امبری-رایدل بیان می کنند. در حال حاضر از داده های تجربی و دیگر مدل های آنالوگ، پارامترهای مورد نیاز استخراج می شود. از این داده ها، پارامتری به عنوان محدودیت برای طراحی فضاپیماها استفاده می شود. مدل های جدید دینامیک سیالات محاسباتی نیز به عنوان داده هایی هستند که برای تایید آن از نتایج تجربی استفاده می کنند. در نهایت از مدل های دینامیک سیالات محاسباتی تایید شده می توان برای استخراج داده های تجربی استفاده نمود. استفاده از داده های دینامیک سیالات محاسباتی به جای داده های تجربی، زمانی که امکان تست آزمایشگاهی به راحتی امکان پذیر نباشد یا هزینه های تست بسیار بالا باشد، در اولویت است.



شکل ۱) روندنمای پژوهش روش شبیه سازی تکانه های سوخت مخزن^[6]

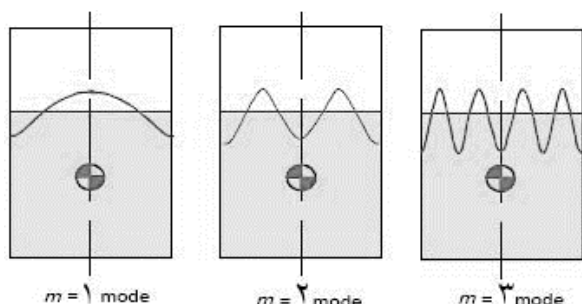
تام و همکاران^[7]، از وجود کشش سطحی در توسعه سامانه مدیریت پیشرا نه بهره گرفته اند. نتایج این تحقیق، برای بهینه سازی مخزن سوخت هیدرازینی مورد استفاده قرار گرفته است. با همکاری مراکز دانشگاهی و تحقیقاتی در ژاپن^[8]، بررسی تجربی رفتار پارامترهای جریان در شکاف دیواره تیغه صورت پذیرفته است. در این تحقیق، به صورت محدود نتایج تجربی و آزمایشگاهی تنش سطحی در کنار تیغه ها منتشر شده است. *استس* در ناسا^[9]، روشی برای توسعه و پیاده سازی یک فرایند برای تولید سامانه مدیریت پیشرا نه از جنس آلومینیوم با قابلیت خیس شوندگی بسیار بالا برای استفاده در مخزن هیدرازین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی، مراحل توسعه و پیاده سازی برای تولید یک سامانه مدیریت پیشرا نه از جنس آلومینیوم را ارائه نموده است که سازگار با مخزن سوخت هیدرازین باشد. صحه گذاری این مقاله با توجه به نتایج آزمایشگاهی انجام شده و آزمایش صورت گرفته با توجه به خواص توری انجام شده است. برایان و همکاران^[10]، در تحقیقات خود به

حرکت مرکز جرم سیال برای مد اساسی $n=1$ به طور ذاتی بزرگتر از دیگر مدها برای همان دامنه موج ماکزیمم است. از آنجایی که نوسان مرکز جرم، منبعی برای تولید نیروها و گشتاورهای تولید شده توسط تلاطم است، موج $n=1$ ، نیرو یا گشتاور خیلی بزرگتری نسبت به مدهای دیگر، تولید می کنند.

مدهای متلاطم متقارن به طور مشابه با شروع از ϕ_1 نسبت به ϕ_2 به دست می آید. مدهای طبیعی متقارن که همگی نسبت به مدهای نامتقارن معادل، بزرگتر هستند، از رابطه ۲ به دست می آیند:

$$\omega_n^2 = 2m\pi(g/a)\tanh[2\pi m(h/a)] \quad (2)$$

شکل های مربوط به موج متقارن در شکل ۳ نشان داده شده است. از آنجایی که هیچ حرکت عرضی مربوط به مرکز جرم سیال، برای هیچ کدام از مدها وجود ندارد، در نتیجه هیچ نیرو یا گشتاور عرضی تولید نمی شود.



شکل ۳) شکل های مربوط به موج متلاطم برای سه موج متقارن اول در جهت x در یک تانک مستطیلی [2]

مدل سازی تلاطم در مخازن کروی و همچنین تحلیل هایی که برای این مخازن استفاده می شود، بسیار پیچیده است. بنابراین برای نمایش پارامترهای مدل مکانیکی از نمودارها (به جای جدول) بهره گرفته می شود. نمودار ۱، اطلاعات لازم را برای مدل سازی تلاطم براساس مدل پاندولی در مخزن کروی نشان می دهد. در این مدل، پارامتر ممان اینرسی مرکزی برای جرم ثابت، مورد نیاز نیست، چرا که در سیال ایده آل چرخش مخزن حول محور گذرنده از مرکز، هیچ گونه حرکت سیال و در نتیجه هیچ گونه نیرو یا ممان تلاطم را ایجاد نمی کند. در مخازن کروی، سازگاری بین نتایج آزمایش و نتایج تحلیل به خوبی مخازن استوانه ای و مستطیلی نیست. این امر به خاطر وجود خواص غیرخطی بیشتر در مخازن کروی نسبت به مخازنی با دو دیواره موازی است. بنابراین از نتایج تئوری خطی مانند مدل مکانیکی نشان داده شده در نمودار ۱، برای مخازن کروی نمی توان انتظار دقیقی همانند مخازن دیگر داشت [22].

نتیجه مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی مدل پاندول مخازن کروی آن است که با وجود سازگاری مناسبی که در تخمین فرکانس اصلی به جز وقتی که مخزن تقریباً پُر یا تقریباً خالی است (جایی که اثرات غیرخطی غالب است)، وجود دارد. در مورد نسبت جرم نوسان کننده پاندول، این سازگاری دیده نمی شود. دو پارامتر دیگر یعنی طول پاندول و موقعیت آویز پاندول نیز سازگاری نسبتاً خوبی دارند [22].

در مدل سازی تلاطم دورانی به کمک مدل پاندولی، وقتی یک مخزن متقارن محوری در فرکانسی نزدیک فرکانس طبیعی تحریک شود، موج تلاطم نامتقارن روی سطح آزاد سیال پدیدار می شود. یعنی موج دارای حرکت دورانی حول محور عمودی نیز خواهد شد. در تلاطم معمولی، نقاط گرهی وجود دارند، به عبارت دیگر، نقاط روی

پیشرانه را به همراه مخزن ذخیره سوخت به منظور بررسی عملکرد و رفتار سامانه مدیریت پیشرانه انجام اده اند. در این خصوص، روندنمای طراحی و شبیه سازی ارائه شده است.

با توجه به پیشینه پژوهش این حوزه (بررسی شده در بالا)، هدف از ارائه این مقاله، ارائه روش جامع برای بررسی تلاطم های مخزن سوخت مراحل بالای حامل های یک بار مصرف، فضاپیماها و ماهواره ها است. برای صحت گذاری تحلیل های مذکور، نتایج به دست آمده با نتایج آزمون های تجربی و نرم افزاری مرجع [17] مقایسه می شوند. استفاده از روش جامع، سبب صرفه جویی در زمان و هزینه (بدون نیاز به انجام آزمایشات تجربی) خواهد شد. منظور از روش جامع طراحی و شبیه سازی مخزن، تحلیل رفتار سوخت تحت شرایط واقعی است. در این روش ارضای قیود طراحی برای دستیابی به بالاترین دقت شبیه سازی صورت می پذیرد.

بنابراین اهداف پژوهش حاضر را می توان به صورت زیر بیان نمود:

۱- شبیه سازی عددی سطح آزاد سیال درون مخزن تحت بارهای اغتشاشی (تکانه های خارجی) به منظور درک رفتار سوخت درون مخزن و تلاطم های آن است.

۲- روش پیشنهادی به طراحی سامانه مدیریت پیشرانه (سامانه مدیریت پیشرانه) برای سوخت رسانی در شرایط بی وزنی (جاذبه ناچیز) کمک خواهد نمود.

۳- روش پیشنهادی، برای تست مخازن مختلف با اشکال مختلف با سامانه مدیریت پیشرانه و بدون سامانه مدیریت پیشرانه، قابل استفاده است.

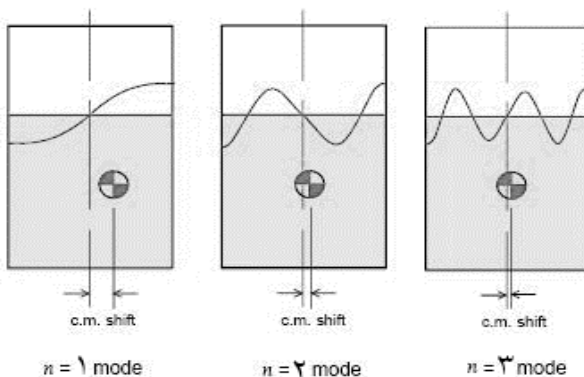
۲- انواع روش های مدل سازی تلاطم و شکل مدها

شکل موج تلاطم را می توان با استفاده از رابطه ۱ به دست آورد:

(۱)

$$\delta(t) = -\frac{2BF_i}{a\omega_n}(2n - 1)\sinh\left[\left(\pi(2n - 1)\left(\frac{h}{a}\right)\right)\sin\left[\pi(2n - 1)\left(\frac{x}{a}\right)\right]\right]$$

هنگامی که $n=1$ باشد، موج در نقطه $x=0$ دارای دامنه صفر و پیک مثبت روی دیواره و پیک منفی روی دیواره دیگر بوده و در نتیجه، این موج، یک موج نامتقارن است. برای حالتی که $n=2$ باشد، یک سری پیک های میانی وجود خواهد داشت که تعداد پیک ها با n ، افزایش می یابد. شکل ۲ نشان دهنده طرح سه مد اول و حرکت نسبی مرکز جرم سیال برای هر مد است [21].



شکل ۲) شکل های مربوط به موج متلاطم برای سه موج نامتقارن اول در جهت x در یک تانک مستطیلی [20]

باند فرکانسی کوچکی درست زیر فرکانسی باشد که حرکت چرخشی سیال اتفاق می افتد، حرکت ناپایدار سیال یا حرکت گردابه ای اتفاق می افتد، یعنی خط گره ای به طور یکنواخت نمی چرخد، بلکه ابتدا در یک جهت شروع به چرخش می کند. سپس متوقف می شود و حال شروع به چرخش در خلاف جهت قبلی می کند. شکل ۴، یک پاندول مخروطی را نشان می دهد که برای مدل کردن حرکت چرخشی به کار می رود. جرم و طول پاندول همان هایی هستند که در مدل مکانیکی پاندول برای تلاطم معمولی به کار می رود. این پاندول با یک حرکت انتقالی نوسانی در جهت y تحریک می شود و موقعیت پاندول با زوایای پاندول نسبت به محورهای x ، y و z مشخص می شود. ε نیز بزرگی دامنه تحریک را نسبت به طول پاندول نشان می دهد. با توجه به جهت تحریک، حرکت پایدار پاندول وقتی اتفاق می افتد که پاندول روی صفحه yz یعنی $\alpha = \gamma$ و $\beta = 0$ نوسان کند و از آن جدا نشود. معادله حرکت پاندول با تقریب مرتبه ۳ توابع مثلثاتی روابط زیر است:

$$\begin{aligned} \csc \alpha &\approx 1 - \alpha^2/2 \\ \sin \alpha &\approx \alpha - \alpha^3/6 \end{aligned} \quad (3)$$

همچنین تقریب مشابه برای دو زاویه دیگر به دست می آید:

$$\left[\frac{d^2}{dt^2} + \frac{g}{L_1} \right] \alpha - \frac{g}{6L_1} \alpha^3 + \frac{1}{2} \alpha \left[\frac{d^2}{dt^2} + \frac{g}{L_1} \right] \beta^2 = \varepsilon \omega^2 \csc \omega t \quad (4)$$

$$\left[\frac{d^2}{dt^2} + \frac{g}{L_1} \right] \beta - \frac{g}{6L_1} \beta^3 + \frac{1}{2} \beta \left[\frac{d^2}{dt^2} + \frac{g}{L_1} \right] \alpha^2 = 0$$

عبارات مربوط به زاویه γ با استفاده از رابطه زیر در معادلات حذف شده است:

$$\sin^2 \gamma = \sin^2 \alpha + \sin^2 \beta \quad (5)$$

یک حل معادلات فوق $\beta = 0$ است که همان حرکت صفحه ای غیرخطی (و پایدار) پاندول را نشان می دهد. می توان نشان داد که معادلات فوق، حل غیرخطی نیز دارند که براساس آن پاندول دارای حرکت چرخشی حول محور z نیز است. این حل ها نشان می دهند که به ازای محدوده خاصی از مقادیر پارامترها، حل پایدار برای پاندول نتیجه می شود. خواص پایداری نتایج با اعمال آشفتگی کوچک و مشخص کردن شرایطی که طی آن آشفتگی رشد می کند یا دفع می شود به دست می آید. طبق مطالعات انجام شده روی پاندول، نتایج را با تعریف فرکانس بی بعد با استفاده از رابطه زیر می توان تحلیل نمود:

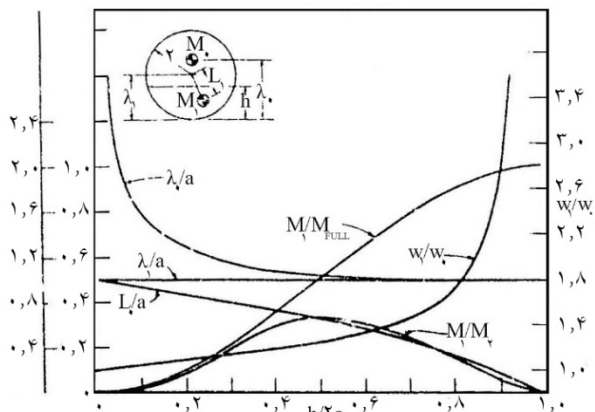
$$v = \varepsilon^{-2/3} [(\omega^2 - \omega_1^2)/\omega_1^2] \text{ and } \omega_1^2 = g/L_1 \quad (6)$$

با توجه به رابطه فوق می توان بازه فرکانسی را به صورت زیر تحلیل نمود:

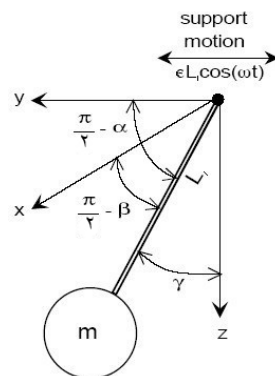
در محدوده فرکانسی $0.757 < v < 0.945$ ، پاندول، حرکت هارمونیک ساده صفحه ای پایدار دارد. این حرکت به تشکیل امواج نامتقارن معمول با خط گره ای ثابت اشاره دارد. در محدوده فرکانسی $0.154 < v < 0.757$ ، نیز پاندول، حرکت هارمونیک ساده غیرصفحه ای پایدار دارد. این حرکت به حالتی که سیال حرکت دورانی دارد و خط گره ای موج نامتقارن تلاطم حول محور عمودی مخزن می چرخد اشاره دارد.

در محدوده فرکانسی $0.154 < v < 0.945$ ، پاندول، حرکت هارمونیک ساده ناپایدار صفحه ای یا غیرصفحه ای دارد. در این

یک قطر گرهی طی تلاطم ساکن می ماند، اما با ناپایداری شدن تلاطم، این خط یا قطر نودال حول محور عمودی دوران می کند که این ناشی از خواص غیرخطی تلاطم است. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، این خاصیت در پاندول نیز وجود دارد. چنانچه نقطه آویز پاندول در فرکانسی نزدیک فرکانس طبیعی پاندول تحریک نوسانی انتقالی شود، حرکت پاندول از صفحه تحریک جدا می شود و خطی که پاندول روی آن عقب و جلو می رود، شروع به چرخش می کند [23].



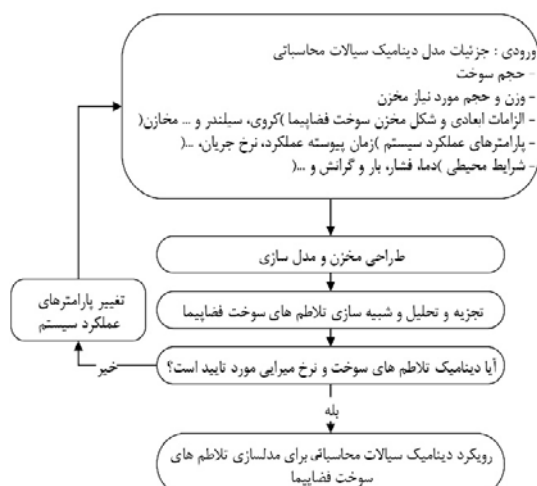
نمودار ۱) مدل سازی تلاطم به کمک مدل پاندولی ساده برای مخازن کروی [2]



شکل ۴) مدل پاندول مخروطی تلاطم دورانی [2]

از آنجا که حرکت سیال هنگام تحریک در فرکانس های دور از فرکانس طبیعی با مدل مکانیکی پاندول نسبتاً خوب مدل می شود، به نظر می رسد که حرکت چرخشی سیال را نیز بتوان با پاندول مدل نمود. حرکت چرخشی سیال و پاندول ناشی از آثار غیرخطی است که طی آن انرژی بین مدهای (یا درجات آزادی) مختلف منتقل می شود. در اطراف فرکانس رزونانس سیال، سه نوع رفتار از سیال مشاهده می شود که بسته به مجاورت فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی تلاطم دارد. چنانچه فرکانس تحریک دور از فرکانس تلاطم باشد، یعنی به اندازه محسوسی بیشتر یا کمتر از آن باشد، حرکت صفحه ای نامتقارن پایدار مشاهده می شود. حال اگر فرکانس تحریک در پهنای باندی که کمی بالاتر از فرکانس طبیعی تلاطم قرار دارد باشد، حرکت پایدار غیرصفحه ای اتفاق می افتد، یعنی خط گره ای موج ایستاده (قطر نودال) با فرکانسی تقریباً برابر فرکانس تحریک شروع به چرخش می کند. این حرکت چرخشی روی موج نامتقارن سوار می شود. در اینجا ممنومم زاویه ای که سیال دارد، نتیجه کوپلینگ غیرخطی بین حرکت سیال موازی جهت تحریک و حرکت عمود بر صفحه تحریک است. چنانچه فرکانس تحریک در

نهایتاً دسته سوم مربوط به پارامترهای مربوط به شرایط محیطی (دما، فشار، نیرو و جاذبه و غیره) هستند. تمامی این سه دسته پارامترها به عنوان ورودی نرم افزار دینامیک سیالات تعریف می شوند. گام دوم، طراحی مخزن و مدل سازی مخزن برای اجرای شبیه سازی است. با توجه به انتخاب مخزن کروی، اجرای شبیه سازی رفتار تلاطم سوخت مخزن مورد نظر دارای ۶۰٪ از حجم مخزن سوخت بوده و ساختار مخزن به گونه ای بوده که ورودی برای ورود سوخت به مخزن و اجرای شبیه سازی است. حجم سوخت درون مخزن برابر ۲/۶ لیتر و مقدار نیروی وارد شده به مخزن، برابر با ۲/۲ پوند در نظر گرفته می شود (در حدود یک نیوتون). گام سوم، شبیه سازی و تحلیل تلاطم های سوخت درون مخزن است که با توجه به داده های ورودی مخزن مورد بررسی قرار می گیرد. از میان داده های ورودی، تمامی داده ها ثابت و غیرقابل تغییر هستند. در این میان تنها داده های تنظیمات نرم افزار قابل تغییر هستند. برای ارزیابی دقت شبیه سازی پژوهش حاضر، نتایج با نتایج پژوهشی [۱۷] مقایسه شده اند. گام چهارم، ارزیابی و تایید نتایج حاصل از شبیه سازی و تحلیل است که مقایسه میزان تلاطم های سوخت درون مخزن در پایان شبیه سازی با نتایج پژوهش مرجع [۱۷] را شامل می شود. بررسی میزان تلاطم سوخت از روی مقایسه کانتورهای رفتاری سوخت درون مخزن (کانتور سرعت، جهت و سوخت و گاز نسبت به یکدیگر) در لحظات ۰/۲ و ۰/۴ و یک ثانیه است. در پایان گام چهارم، تایید نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در صورتی که نتایج شبیه سازی و تحلیل با مقادیر موجود در نتایج تجربی قابل صحت گذاری باشد، می توان از آن برای تولید مدل های دیگر تجربی استفاده نمود و در غیر این صورت، شبیه سازی و تحلیل نتایج نیاز به بازنگری دارد. برای این منظور، پارامترهای تنظیمات نرم افزاری تغییر و شبیه سازی و تحلیل مدل مجدداً اجرا می شود. این فرآیند تا صحت گذاری کامل نتایج ادامه می یابد. برای نمونه در جدول ۱ تنظیمات پیش فرض نرم افزار برای شبکه بندی ارائه شده است.

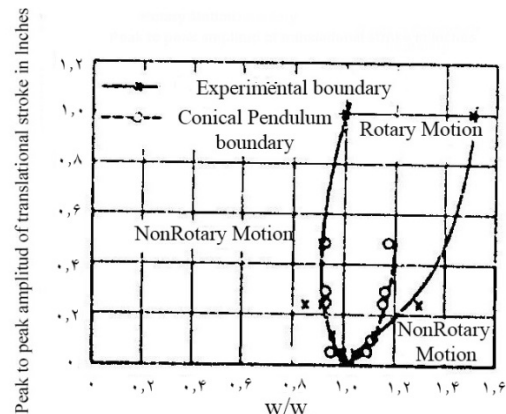


شکل ۵) روش مدل سازی سیستمی تلاطم های مخزن سوخت

جدول ۱) تنظیمات پیش فرض نرم افزار برای شبکه بندی

پیش فرض	تنظیمات
دینامیک محاسبات	اولویت فیزیک
فلوئنت	اولویت محاسبات
خیر	نمایش خروجی سطح شبکه
خطی	نوع محاسبات

حالت صفحه حرکتی پاندول نوسان می کند. این نوع حرکت پاندول به حرکت گردابی سیال که طی آن خط گره ای موج نامتقارن تلاطم حول محور عمودی مخزن نوسان می کند، اشاره دارد. به ازای $0.757 < \nu$ ، وجود هر دو حرکت پایدار صفحه ای و غیرصفحه ای به شرایط اولیه بستگی دارد. یعنی چنانچه حرکت غیرصفحه ای اولیه ای مثل حرکت دورانی وجود داشته باشد، حرکت چرخشی در محدوده فرکانسی فوق نتیجه خواهد شد و در غیر این صورت حرکت صفحه ای است. نمودار ۲، مقایسه مرزهای پایداری بین پیش بینی مدل با نتایج تجربی را نشان می دهد.



نمودار ۲) مقایسه نواحی تلاطم دورانی مدل پاندول مخروطی با داده های تجربی [۲]

مرز پایینی فرکانس که بالای آن خط گره ای شروع به نوسان می کند، نسبتاً خوب پیش بینی شده است. اما مرز فرکانسی بالایی که پایین تر از آن تلاطم دورانی حتی بدون وجود چرخش در شرایط اولیه ایجاد می شود، فقط به ازای حرکات با دامنه کوچک، پیش بینی خوبی نشان می دهد. مرز فرکانس بالایی به صورت قوی به دقت هندسه تانک و تحریک وابسته است، یعنی هرچه تحریک جانبی و مدور بودن مخزن دقیق تر باشد، مرز پایداری تلاطم و پاندول مخروطی بیش از پیش سازگارتر و به یکدیگر نزدیک تر می شوند. بنابراین به نظر می رسد که پاندول مخروطی مدل مکانیکی خوبی برای تلاطم دورانی باشد. تحقیقات دیگر نشان می دهند که چنانچه در معادلات پاندول به جای جای گذاری سینوس ها و کسینوس ها با چند عبارت اول از بسط سری ها استفاده شود، نتایج نه تنها در مورد مرزهای پایداری بلکه در مورد بزرگی و زاویه فاز ممان و نیرو نیز با نتایج تجربی سازگاری خوبی دارند. تحلیل های کامل تر حرکات نوع سوم (ناپایدار) نشان داده اند که این حرکات لزوماً آشوبناک هستند [۲۳].

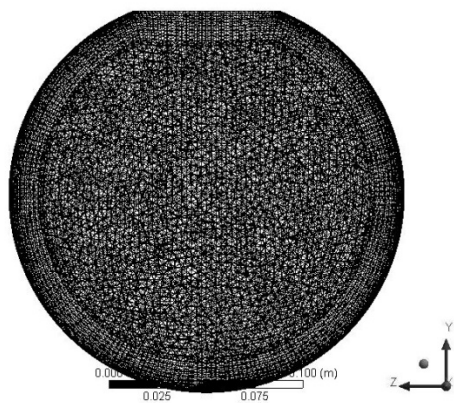
۳- روش مدل سازی سیستمی تکانه های مخزن سوخت

در این بخش، روندنمای مدل سازی سیستمی شبیه سازی تلاطم سوخت مخزن به صورت شکل ۵ معرفی می شود. این روندنما از شش گام اصلی تشکیل شده است. این شش گام به ترتیب بدین صورت بوده که گام اول، داده های ورودی مدل سازی دینامیک سیالات است که به طور کلی می توان به سه دسته پارامتر تقسیم نمود. دسته اول، پارامترهای مربوط به نوع مخزن سوخت و مشخصات ابعادی هستند (نوع مخزن: کروی، سیلندر و غیره، ابعاد مخزن و حجم سوخت مورد نیاز). دسته دوم، پارامترها و اطلاعات مربوط به تنظیمات نرم افزار دینامیک سیالات (نوع جریان، نوع حل کننده، تاثیر زمان و گام های زمانی و غیره) را شامل می شوند و

و همچنین تلاطم سوخت بستگی دارد. اثرات تکانها بر سوخت درون مخزن غیرقابل انکار است و ماهیت ویسکوزیته سوخت باعث ناپدید شدن انرژی و در نهایت حذف لرزش از سیال می شود که باعث کاهش نیروی واکنش در طول زمان می شود. تحلیل این اثرات که در مدل های دینامیک سیالات محاسباتی قابل بررسی است و برای صحت گذاری تلاطم های سوخت و فرکانس تحریک ها اتفاق می افتد، مورد بررسی قرار می گیرد. از این اطلاعات می توان برای جلوگیری از برخورد فرکانس و تحریک رزونانس در سیستم مخزن سوخت استفاده نمود. مثالی از داده های تلاطم های مورد آزمایش نشان می دهد، شکل کروی ۸ اینچی را با حدود ۶۰٪ ظرفیت خود که حدود ۲/۶ لیتر مایع بوده، در آن دامنه نوسانات در حدود ۰/۲ پوند و با دقت ۰/۰۰۱ پوند است.

همان گونه که در شکل ۸ نشان داده شده، بیشتر شبکه سازی در کنار دیواره صورت پذیرفته است. زیرا شبکه بندی برای بررسی اثرات برخورد سیال با دیواره مخزن ضروری است. شبکه بندی به کار رفته به صورت کامل غیرسازمان یافته است که در نرم افزار فلوئنت به شبکه پلی هیدرا تغییر داده شده است. به وسیله این تکنیک، تعداد کل سلول ها را می توان کاهش داد، بدون اینکه در نتیجه نهایی تاثیری ایجاد کند. بنابراین، این ابتکار سبب صرفه جویی بسیار زیادی در زمان محاسبه می شود. شرایط مرزی در کنار دیواره ها در نظر گرفته نشده و فشار مخزن، فشار ورودی مخزن و فشار اتمسفر است. هر چند بی اهمیت ولی شرایط در اینجا باید اجازه دهد که با گذشت زمان، فشار هوا به داخل و خارج از مخزن حرکت کند. فشار اتمسفر برای مخزن، برابر با ۱۰۱۳۲۵ پاسکال در نظر گرفته شده است.

جدول ۲، مشخصات مش بندی در مرز میان سوخت و دیواره مخزن را نشان می دهد. این مشخصات، تعداد شبکه ها، نقاط اتصال آن از قبیل نرخ رشد شبکه، تعداد لایه های شبکه در کنار دیواره ها و ضخامت اولین لایه و غیره را شامل می شود.



شکل ۸) شماتیک برش خورده شبکه بندی مخزن سوخت

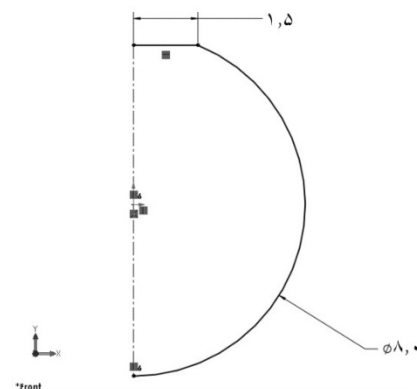
جدول ۲) تنظیمات ساختار شبکه های ایجاد شده برای شبیه سازی

تمام سطرها	نوع شبکه
تنظیمات پیش فرض	شروع از اولین لایه
تنظیمات لایه مرزی	ارتفاع اولین لایه
۸ اینچی	بیشینه تعداد لایه ها
۱/۲	نرخ رشد
Pre	الگوریتم
No	استفاده از تنظیمات پیشرفته
۱۸۷۵۴۷	اتصالات
۵۲۲۴۳۱	تعداد

۴- طراحی و مدل سازی مخزن

با توجه به اهمیت صحت گذاری نتایج شبیه سازی با نمونه تجربی، لازم است طراحی و مدل سازی مخزن براساس مقاله مرجع [17] صورت پذیرد. برای این منظور، در ادامه مشخصات مخزن آورده شده است.

مخزن به صورت کروی دارای قطر ۸ اینچ (۰/۲۰۳۲ متر) و قطر ورودی به مخزن برابر ۳ اینچ (۰/۰۷۶۲ متر) است. دریچه ای نیز در بالای مخزن برای ورود سوخت و همچنین ایجاد شرایط اتمسفر قرار دارد. نمونه اولیه مدل مورد بررسی، در نرم افزار سالیدورک طراحی شده و نمونه نهایی برای انجام شبیه سازی در مجموعه نرم افزار انسیس بخش نرم افزاری مدل دیزاینر ترسیم شده است. نمونه مدل ساخته شده در آزمایشگاه برای انجام آزمون های تجربی در پژوهش مرجع [17] نشان داده شده است (شکل های ۶ و ۷).



شکل ۶) شماتیک دوبعدی مدل مخزن سوخت



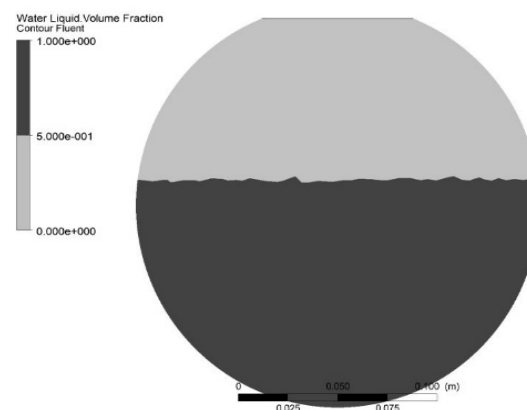
شکل ۷) شماتیک کامل مدل مخزن سوخت

نتایج تجربی مورد استفاده برای صحت گذاری نتایج شبیه سازی این مقاله در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فضایی امبری- رایدل ب دست آمده است. در این آزمایشگاه، تحقیقات تلاطم های سوخت با استفاده از تجهیزات تکان دهنده های خطی و سیستم دریافت داده های پیوسته صورت می گیرد. در این آزمایش، یک مخزن کروی ۸ اینچی به همراه کابل نگهدارنده به یک محرک خطی متصل می شود. همچنین بین عملگر و مخزن سوخت برای انتقال نیرو، مبدل قرار داده شده است که باعث ایجاد تکانه در مخزن سوخت می شود و داده های تولید شده توسط سیستم های کامپیوتری دریافت و مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.

راه حل مورد بررسی در آزمایشگاه تحقیقاتی فوق نشان می دهد برای یافتن راهی برای میرانمودن تاثیر تکانه های ناگهانی مخزن سوخت، بررسی میرایی انرژی در تکانه های سوخت در مخزن است. زیرا نرخ کاهش تلاطم ها و نوسانات به شکل مخزن و جنس سوخت

۵- روش تحلیل تکانه‌های سوخت مخزن

مدل‌سازی تلاطم‌های سوخت درون مخزن به وسیله بسته نرم‌افزاری فلوئنت در نرم‌افزار انسیس انجام شده است. مقدار سوخت در مخزن در تمامی مراحل، ثابت و بدون تغییر بوده و تنظیمات روش حل و شبیه‌سازی بر مبنای فشار، شبیه‌سازی متغیر با زمان و میزان گرانش ($9.81m/s^2$) در نظر گرفته شده است. روش اتخاذی در مدل‌سازی نیز با روش چند فازی حجم مایع بوده و در آن نوع حل دوفازی انتخاب شده است. در این مدل، فاز مایع سوخت که در اینجا با آب و گاز را با هوا می‌توان در نظر گرفت و همچنین حل جریان را می‌توان به صورت خطی در نظر گرفت. البته جریان‌های دیگری را هم می‌توان مورد آزمون قرار داد، ولی در نهایت مناسب‌ترین آن جریان خطی است. در شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی، ورودی مخزن، باز و جریان هوا به صورت آزاد به داخل و بیرون مخزن حرکت می‌کند. سوخت موجود در مخزن، تقریباً ۶۰٪ حجم مخزن را پُر نموده است (شکل ۹). زمان شبیه‌سازی ۲۰ ثانیه و گام زمانی اعمال شده برای حل ۰/۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است.



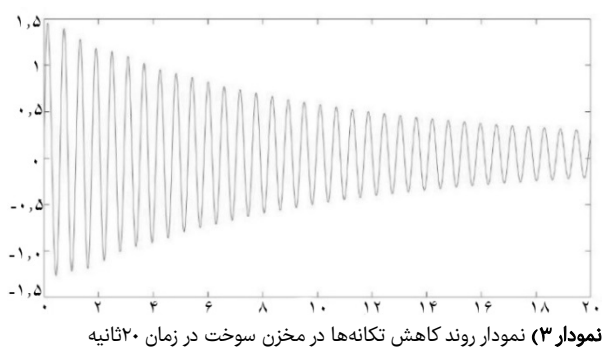
شکل ۹) موقعیت سوخت در مخزن قبل از شبیه‌سازی

۶- ارزیابی نتایج

در این بخش لازم است تا نتایج حاصل از اجرای گام‌های روندنمای طراحی مورد ارزیابی و صحت‌گذاری قرار گیرند. چنانچه بیان شد، تلاطم‌های مخزن سوخت شبیه‌سازی شده با مقاله مرجع [17] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین صورت که نرخ نوسانات مخزن در مدت زمان مشخص، کانتور شکل و کانتور سرعت در مخزن در زمان‌های ۰/۲ و ۰/۴ و یک ثانیه در ادامه مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نرخ نوسانات به اندازه‌ای است که در آن نوسانات به صورت پی‌درپی کاهش می‌یابد و نمونه محاسبات نرم‌افزاری برای آن در مقاله مرجع [17] نشان داده شده است. این نتایج جدول ۳ برای ارزیابی نتایج تحقیق حاضر استفاده شده و میزان خطای آن قابل صرف نظر است. در نمودار ۳، نتایج نرخ کاهش تلاطم‌های مخزن در مدت زمان ۲۰ ثانیه محاسبه و نشان داده شده است. نتایج محاسبات تحقیق حاضر بر مبنای نیوتون (N) است که برای مقایسه با نتایج تجربی، واحد آن را به پوند (lb) تبدیل و سپس نتایج مقایسه می‌شود.

جدول ۳) مقایسه نتایج تلاطم‌های مخزن سوخت

نرخ تلاطم	***
نتایج تجربی	۰/۰۶۵۶۴
مدل محاسبات مرجع	۰/۰۶۵۵۷
نتایج استخراج شده	۰/۰۶۵۶۴=۰/۲۲*۰/۲۹۲



نمودار ۳) نمودار روند کاهش تکانه‌ها در مخزن سوخت در زمان ۲۰ ثانیه

نتایج جدول ۳ در زمان ۲۰ ثانیه محاسبه شده و نتایج محاسبات آزمایشگاهی و نرم‌افزاری ارائه شده است. با مقایسه این نتایج می‌توان به خوبی ارزش روش شبیه‌سازی تلاطم‌های سوخت در این مقاله را مورد ارزیابی و تصدیق قرار داد.

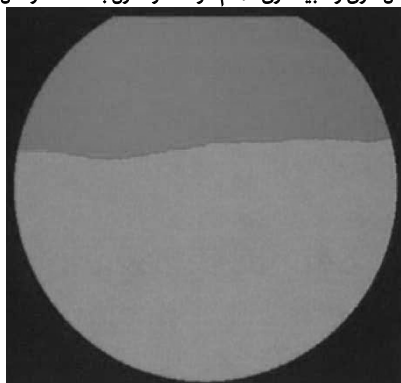
دینامیک تلاطم‌ها، علاوه بر پیش‌بینی نرخ نوسانات مدل دینامیک سیالات می‌تواند اطلاعاتی در مورد مشخصات تلاطم‌های سوخت درون مخزن در اختیار قرار دهد. ویژگی‌هایی نظیر شکل سطح آزاد و میزان سرعت را پیش‌بینی می‌کند و ساختار سوخت مایع می‌تواند تابعی از زمان باشد. این اطلاعات بسیار ارزشمند به تصویربرداری از حرکت سیال کمک می‌کند و درک زیادی از فیزیک پشت تکانه‌های سوخت فضاپیما می‌دهد. نتایج به دست آمده از این تحقیقات، شامل کانتور شکل و کانتور سرعت در مخزن سوخت در زمان‌های ۰/۲ و ۰/۴ و یک ثانیه مورد مقایسه قرار گرفته است. چنانچه در ادامه تشریح می‌شوند، به وضوح می‌توان دقت روش ارائه شده را مشاهده نمود.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، کانتور موقعیت و فصل مشترک سوخت و گاز به ترتیب مربوط به مقاله مرجع [17] و نتیجه شبیه‌سازی تحقیق حاضر در زمان ۰/۲ ثانیه است. دقت شبیه‌سازی از طریق مقایسه جداساز فصل مشترک میان سوخت و گاز قابل بررسی است. با ملاحظه این دو نمودار می‌توان به خوبی دقت شبیه‌سازی را در زمان ۰/۲ ثانیه دریافت. همین ملاحظات و بررسی را می‌توان برای شکل‌های ۱۲ و ۱۳ در زمان ۰/۴ ثانیه داشت. در زمان ۰/۴ ثانیه نیز به خوبی تطبیق مناسب بین نتایج تحقیق حاضر و مرجع مذکور وجود دارد. در گام بعدی، می‌توان همین جمع‌بندی را در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ برای بررسی دقت شبیه‌سازی حاضر و مرجع مشخص به منظور صحت‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی در زمان‌های مختلف بیان داشت. به عبارت دیگر، روش شبیه‌سازی اتخاذی برای تکانه‌های ورودی مختلف، نتایج قابل اطمینان را در اختیار محققان قرار خواهد داد.

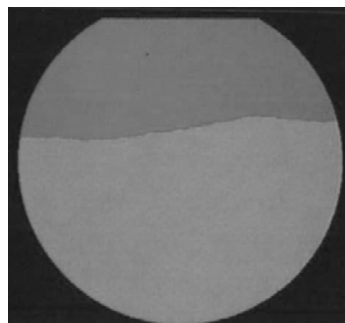
در ادامه، کانتور اندازه و جهت سرعت، برای بررسی بیشتر در زمان‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب کانتور اندازه و جهت سرعت از مقاله مرجع [17] و نتیجه شبیه‌سازی تحقیق حاضر در زمان ۰/۲ ثانیه ارائه شده است. دقت شبیه‌سازی از طریق مقایسه جهت‌های سرعت در بخش‌های مختلف مخزن قابل بررسی است. نتیجه شبیه‌سازی، صحت و دقت مناسب روش اتخاذی را بیان می‌کند. همین بررسی در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ و همین طور در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب در زمان‌های ۰/۴ و یک ثانیه صورت پذیرفته است. مقایسه جهت‌های سرعت در قسمت‌های مختلف مخزن قابل بررسی است و مشاهده انجام شده به خوبی دقت شبیه‌سازی را در زمان ۰/۴ ثانیه نشان می‌دهد.

با بررسی که به ترتیب کانتور اندازه و جهت سرعت از مقاله مرجع [17] و نتیجه شبیه‌سازی تحقیق حاضر در زمان یک ثانیه بوده،

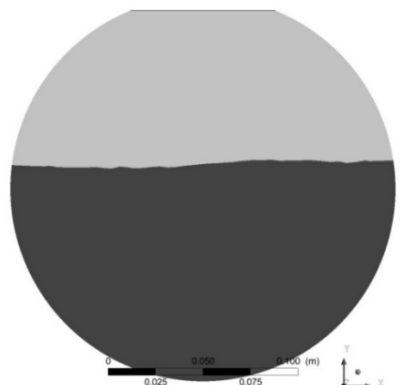
دقت شبیه‌سازی از طریق مقایسه جهت‌های سرعت در قسمت‌های مختلف مخزن قابل بررسی است و مشاهده انجام‌شده به‌خوبی دقت شبیه‌سازی را در زمان یک‌ثانیه نشان می‌دهد. با بررسی نتایج تحقیق حاضر و نتایج موجود می‌توان دریافت، که روش حاضر دارای دقت مناسب است و با این مقایسه صحه‌گذاری بر نتایج قابل اثبات است.



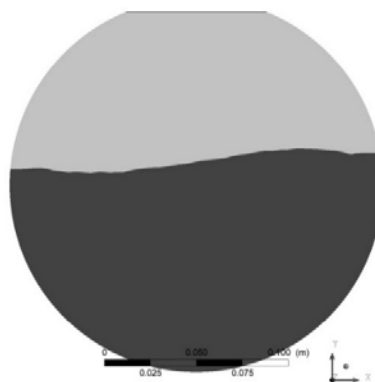
شکل ۱۴) کانتور تغییر سوخت و گاز در مقاله مرجع، زمان یک‌ثانیه^[۱۷]



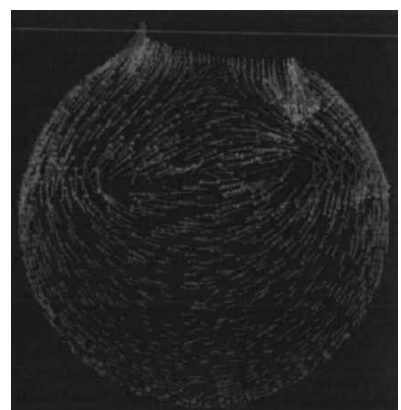
شکل ۱۰) کانتور تغییر سوخت و گاز در مقاله مرجع، زمان ۰/۲ ثانیه^[۱۷]



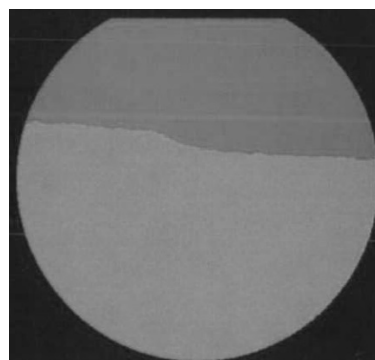
شکل ۱۵) نتایج کانتور تغییر سوخت و گاز (در تحقیق حاضر)، زمان یک‌ثانیه



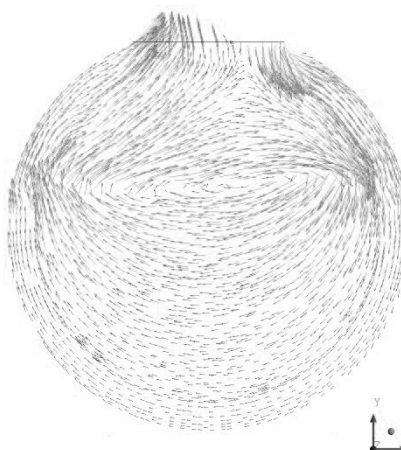
شکل ۱۱) نتایج کانتور تغییر سوخت و گاز (در تحقیق حاضر)، زمان ۰/۲ ثانیه



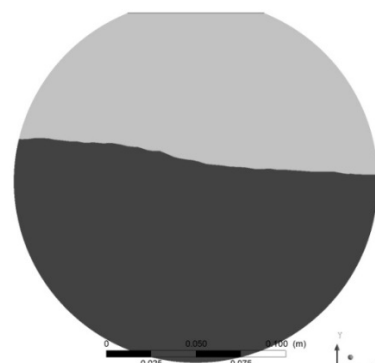
شکل ۱۶) کانتور تغییر سرعت و جهت جریان در مقاله مرجع، زمان ۰/۲ ثانیه^[۱۷]



شکل ۱۲) کانتور تغییر سوخت و گاز در مقاله مرجع، زمان ۰/۴ ثانیه^[۱۷]



شکل ۱۷) نتایج کانتور تغییر سرعت و جهت جریان (در تحقیق حاضر)، زمان ۰/۲ ثانیه



شکل ۱۳) نتایج کانتور تغییر سوخت و گاز (در تحقیق حاضر)، زمان ۰/۴ ثانیه

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش مدل‌سازی و شبیه‌سازی تلاطم سوخت در مخزن با استفاده از مدل پاندولی ارائه شد. برای این مدل‌سازی رویکرد دینامیک سیالات محاسباتی بهره گرفته شد. در تحقیقات آتی می‌توان مدل‌های پیچیده‌تری از مخزن به همراه هر نوعی از سامانه مدیریت مصرف سوخت (دیافراگمی یا تنش سطحی) را مورد استفاده قرار داد. این مدل‌سازی روی مخزن در اندازه واقعی نیز امکان‌پذیر است. به وسیله مدل‌سازی دینامیک سیالات عددی می‌توان مدل‌سازی دقیقی از تلاطم‌های سوخت درون مخزن انجام داد و شرایط متفاوتی را بررسی نمود و از یک اشتباه مهندسی و شکست مأموریت جلوگیری شود. نتایج استخراج‌شده، دید عمیق‌تری را نسبت به تحرکات سوخت درون مخزن در اختیار سازندگان قرار می‌دهد، به گونه‌ای که به وسیله نتایج تجربی، امکان افزایش دقت محاسبات و کاهش هزینه ساخت (حذف آزمون و خطا در ساخت مخازن) خواهد بود. بنابراین نتایج و دستاوردهای این مقاله را به صورت زیر می‌توان لیست نمود:

۱- تاثیر نیروهای اغتشاشی وارد بر مخزن و میرایی نوسانی این نیروها در نمودار ۳ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳، نتایج مربوط به میزان تلاطم‌ها در زمان ۲۰ ثانیه با پژوهش مرجع [17] مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- از دیگر نتایج این مقاله، کانتور موقعیت سوخت و گاز نسبت به یکدیگر است. نتایج مقاله مرجع [17] برای مقایسه به ترتیب در شکل‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۴ در زمان‌های ۰/۲، ۰/۴ و یک ثانیه نشان داده شده است. همین نتایج برای تحقیق حاضر به منظور صحت‌گذاری و تایید نتایج با استفاده از نتایج تجربی مرجع [17]، به ترتیب در شکل‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵ آورده شده است.

۳- از دیگر نتایج از این تحقیق، سرعت و جهت سرعت در مخزن سوخت در زمان‌های ۰/۲، ۰/۴ و یک ثانیه است که نتایج مربوط به مرجع [17] به ترتیب برای زمان‌های مذکور در شکل‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۶ نشان داده شده است. همین نتایج برای تحقیق حاضر در شکل‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵ به منظور ارزیابی و مقایسه آورده شده است.

بنابراین با توجه به معرفی نتایج و اشکال بیان‌شده در ردیف‌های ۱ تا ۳، با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی تلاطم سوخت در مخزن براساس روش پاندولی، دامنه سطح آزاد سیال سوخت، فصل مشترک سوخت و گاز و همچنین سرعت و جهت سرعت نشان داده شدند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی تلاطم‌های سطح آزاد مخزن سوخت و مقایسه با نتایج تجربی [17]، می‌توان صحت نتایج را اثبات نمود. همچنین با توجه به اثبات روش و صحت نتایج شبیه‌سازی تلاطم سوخت، می‌توان تحقیقات بیشتری را برای مدل‌سازی مخزن‌های مجهز به سامانه مدیریت پيشرانه (نظیر پره‌ای، دیافراگمی یا انبوه‌ساز) متمرکز نمود. اهمیت این بررسی‌ها برای ایجاد امکانات بهتر برای شبیه‌سازی رفتار سیال (سوخت و گاز بالشتک) داخل مخزن در شرایط جاذبه، ناچیز است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

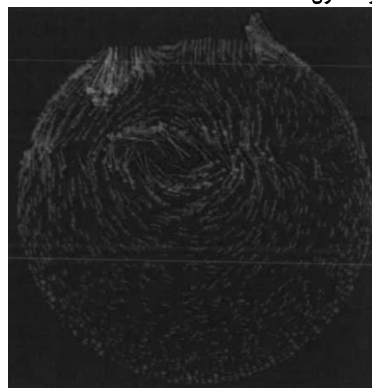
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

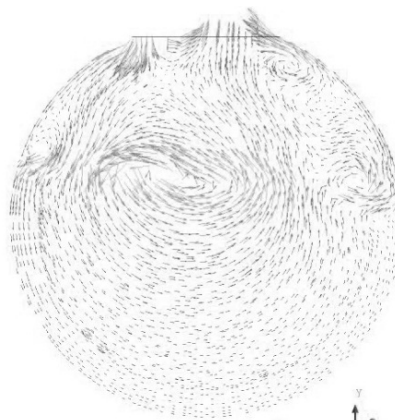
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

منابع

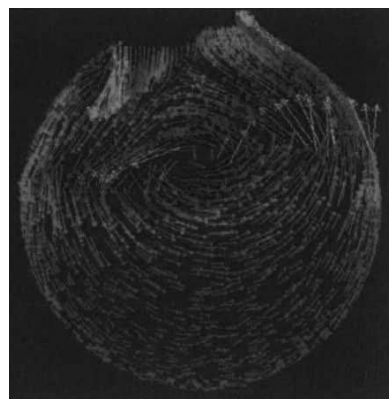
1- Weihs D, Dodge FT. Liquid motions in



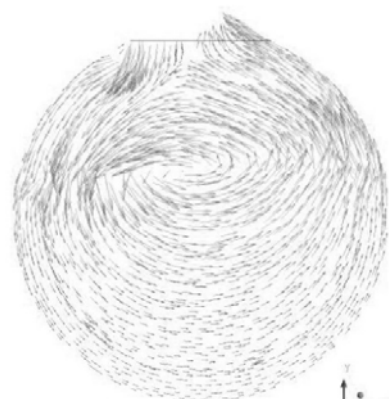
شکل ۱۸) کانتور تغییر سرعت و جهت جریان در مقاله مرجع، زمان ۰/۴ ثانیه [17]



شکل ۱۹) نتایج کانتور تغییر سرعت و جهت جریان (در تحقیق حاضر)، زمان ۰/۴ ثانیه



شکل ۲۰) کانتور تغییر سرعت و جهت جریان در مقاله مرجع، زمان یک ثانیه [17]



شکل ۲۱) نتایج کانتور تغییر سرعت و جهت جریان (در تحقیق حاضر)، زمان یک ثانیه

control. 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Conference & Exhibit. Hartford, Connecticut: ATK Space Systems Inc; 2008.

13- Liu JT, Zhou C, Wu YL, Zhuang BT, Li Y. Numerical investigation of performance of vane-type propellant management device by VOF methods. International Symposium of Cavitation and Multiphase Flow. Beijing, China: IOP Publishing; 2014.

14- Hu Q, Li Y, Pan HL, T Liu J, Zhuang BT. Numerical analysis and experiment research on fluid orbital performance of vane type propellant management device. International Symposium of Cavitation and Multiphase Flow. Beijing, China: IOP Conference Series. Materials Science and Engineering (Online); 2014.

15- Alhendal Y, Turan A, Aly W. VOF simulation of marangoni flow of gas bubbles in 2D-axisymmetric column. *Procedia Computer Science*. 2010;1(1):673-680.

16- Sances D, Riddle E, Gangadharan S, Sudermann J, Marsell B. CFD fuel slosh modeling of fluid-structure interaction in spacecraft propellant tanks with diaphragms. 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Orlando, Florida: The American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2010.

17- Marsell B, Gangadharan S, Chatman Y, Sudermann J, Schlee K, Ristow J. A CFD approach to modeling spacecraft fuel slosh. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida: The American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2009.

18- Kreppel S. Investigation of propellant sloshing and zero gravity equilibrium for the orion service module propellant tanks. 38th COSPAR Scientific Assembly. Bremen, Germany: COSPAR Scientific Assembly; 2010.

19- Naseh H, Alipour A. Propellant Management Device (PMD) System Design Methodology in Zero Gravity Condition. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;18(2):84-94. [Persian]

20- Naseh H, Alipour A. Propellant Management Device (PMD) Design Optimization of Hydrazine Fuel Tank. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;17(7):152-160. [Persian]

21- Ibrahim AR. Liquid sloshing dynamics: Theory and applications. Cambridge: Cambridge University Press; 2009.

22- Kobo R, Sigalotti L, Medina A, López A, Ruiz-Chavarría G. Recent Advances in Fluid Dynamics with Environmental Applications. 1st edition. Switzerland: Springer International Publishing; 2016.

23- Klapp J, Medina A, Cros A, Vargas CA. Fluid dynamics in physics, engineering and environmental applications. Verlag Berlin Heidelberg: Springer; 2012.

nonaxisymmetric, partially filled containers rotating at zero gravity. *AIAA Journal of Spacecraft and Rockets*. 1991;28(4):425-432.

2- Dodge FT. The new dynamic behavior of liquids in moving containers [Technical Report]. San Antonio, Texas: Southwest Research Institute; 2000.

3- Schlee K, Gangadharan SN, Ristow J. Advanced method to estimate fuel slosh simulation parameters. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Tucson, AZ: American Society of Mechanical Engineers; 2005.

4- Mahyari MN, Karimi H, Naseh H, Mirshams M. Numerical and experimental investigation of vortex breaker effectiveness on the improvement in launch vehicle ballistic parameters. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010;24(10):1997-2006.

5- Hirt CW, Nichols BD. Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*. 1981;39(1):201-225.

6- Chatman Y, Gangadharan SN, Marsell B. Mechanical analog approach to parameter estimation of lateral spacecraft fuel slosh. 49 AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston: The American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2008.

7- Tam WH, Ballinger I, Jaekle D. Surface tension PMD tank for on orbit fluid transfer. 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Hartford, Connecticut: ATK Space Systems Inc.; 2008.

8- Chen Y, Collicott SH. Experimental study on the capillary flow in the vane-wall gap geometry. *AIAA Journal*. 2005;43(11):2395-2403.

9- Estes RH. Development and implementation of a process for producing a highly wettable aluminum PMD for the GPM hydrazine tank. 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Atlanta, Georgia: The American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2012.

10- Lenahan B, Bernier A, Gangadharan S, Sudermann J, Marsell B. A computational investigation for determining the natural frequencies and damping effects of diaphragm implemented spacecraft propellant tanks. 53rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Atlanta, Georgia: The American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2012.

11- Tam W, Hersch M, Ballinger I. Hybrid propellant tanks for spacecraft and launch vehicles. 39th AIAA Propulsion Conference & Exhibit. Alabama: Pressure Systems Inc., 2003.

12- Tam W, Ballinger I, Jaekle D. Propellant tank with surface tension PMD for tight center-of-mass propellant