Archive of SID

ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8):2001-2011

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*

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 (exiting 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

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.

[1]Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran
[2]Mechanical & Aerospace Engineering Department, Engineering Faculty, Electronic Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[3]Chemical Engineering Departmentm, 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

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

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

www.SID.ir

Archive of SID

مدل‌سازی و شبیه‌سازی تلاطم سوخت در مخزن با استفاده از مدل پاندولی

حسن ناصح* PhD
موسسه تحقیقات هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران
علی عالی‌پور MSc
گروه مهندسی مکانیک و هوا فضا، دانشکده فنی و مهندسی، واحد الکترونیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
پریسا دانشگر MA
گروه مهندسی صنایع شیمیایی، دانشگاه فنی حرفه‌ای، اهواز، ایران

چکیده
هدف از ارائه مقاله، تبیین روش مدل‌سازی و شبیه‌سازی تاثیرات 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 تلاطم‌های سوخت درون مخزن در نرم‌افزار دینامیک سیالات فلوئنت براساس مدل پاندولی، ایجاد شده است. بر این اساس، روندنمای مطالعه بدین صورت است که ابتدا ورودی‌های روندنمای (تحریک ورودی به مخزن، حجم سوخت و گاز بالشتک، بارگذاری‌ها و مشخصات ابعادی و غیره) تعیین و سپس مخزن مدل‌سازی و طراحی می‌شود و در نهایت شبیه‌سازی تلاطم سوخت درون مخزن در شرایط جاذبه ناچیز صورت می‌پذیرد. خروجی مدل‌سازی و شبیه‌سازی تلاطم سوخت که شامل نرخ میرایی تلاطم و تعیین مقدار آن در لحظه ۲۰ثانیه از شبیه‌سازی، 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 یک‌ثانیه است. دقت نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی نمونه مشابه مورد ارزیابی قرار گرفته است.
کلیدواژه‌ها: تلاطم سوخت، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، مدل پاندولی، گرانش

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶
*نویسنده مسئول: hnaseh@ari.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در ماهواره‌ها و فضاپیماها، مخزن سوخت آنها است. دلیل این اهمیت را می‌توان نیاز به سوخت‌رسانی بی‌وقفه از مخزن سوخت به محفظه احتراق وسایل فضایی در شرایط بدون جاذبه یا جاذبه‌های بسیار ناچیز دانست. چنانچه مشهود است، سوخت این وسایل پرنده در شرایط بی‌وزنی و بدون جاذبه یا با جاذبه‌های ناچیز از خود رفتاری متفاوت از سطح زمین (شرایط عادی جاذبه) نشان می‌دهند و به‌خوبی و با اطمینان همانند سطح زمین، سوخت را به موتور انتقال نمی‌دهند، حتی اگر حجم زیادی سوخت در مخزن وجود داشته باشد و سوخت مخزن تمام نشده باشد. در شرایط بی‌وزنی، موتور در زمان مناسب روشن نمی‌شود و اگر در حال کار باشد ممکن است به‌دلیل 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 ماموریت وسیله فضایی با شکست روبه‌رو شود. برای رویارویی با این مشکل، در مأموریت‌های فضایی از سامانه مدیریت پیشرانه استفاده می‌شود. سامانه مدیریت پیشرانه، راه‌حلی برای جدایی سوخت از انتهای مخزن و نبودن سوخت در دهانه خروجی مخزن غیرقابل انجام هستند. بنابراین به‌طور خلاصه می‌توان 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 سامانه‌های مدیریت پیشرانه، تعریف و صورت پذیرفته است.

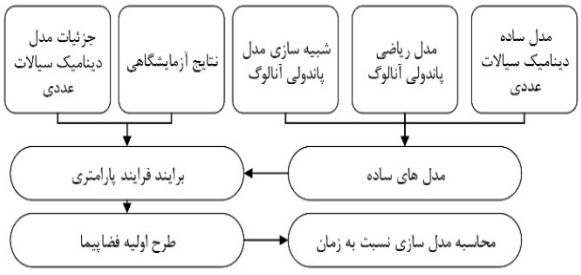
ویز و *داج*[1]، با ارائه مقاله‌ای نشان دادند که فضاپیماها با استفاده از حرکت چرخشی می‌توانند هم موقعیت خود را تثبیت کنند و هم باعث کاهش اثرات حرارتی خورشید بر فضاپیما شوند. علاوه بر فضاپیماها و ماهواره‌ها، حرکت چرخشی در مراحل بالای پرتابگر که باعث حرکت غیرخطی سوخت در مخزن سوخت فضاپیماها می‌شود را می‌توان برای مثال نام برد. این نوع حرکت‌ها باعث می‌شوند که سوخت در داخل مخزن سوخت، گردش کند و در نهایت سبب ازبین‌رفتن قدرت موتور و خاموش‌شدن آن و سپس ازبین‌رفتن توان حرکتی فضاپیما شود. *داج*[2] اضافه نمود که پایداری فضاپیماها به توان حرکت چرخشی آن وابسته است، بنابراین ازدست‌دادن توان حرکتی برای فضاپیماهای یک‌بارمصرف می‌تواند فاجعه‌بار باشد. ماهیت حرکت چرخشی فضاپیماها باعث تثبیت حرکت و قرارگیری موقعیت فضاپیماها در یک زاویه خاص می‌شود که مقدار این چرخش با توجه به تحلیل‌های سیستم کنترلی به دست می‌آید. برای مانور و حرکت ایده‌ال فضاپیماها، زاویه حرکتی می‌تواند بسیار کوچک باشد. زمانی که فضاپیماها در حال چرخش با زاویه نسبتاً کوچک هستند، در یک لحظه جزئی، حرکت لرزشی یا تکانه‌های سوخت درون مخزن می‌تواند باعث تشدید این زاویه حرکتی شود و نرخ زاویه را به مقدار نامشخص تغییر دهد. *ساچل* و همکاران[3]، در مقاله خود اضافه می‌کنند 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 ماموریت ATS-۵ که در سال ۱۹۶۹، سبب ازدست‌رفتن کنترل کامل فضاپیما می‌شود.

با توجه به دلایل فوق، درک کامل تلاطم‌های دینامیکی مخزن سوخت فضاپیماها می‌تواند از بروز مشکلات و چالش‌های بزرگ پیشگیری کند. بسیاری از فعالیت‌های علمی و تحقیقاتی این حوزه برای درک بهتر دینامیک پشت تلاطم‌های سوخت در فضاپیماها در بخش سرویس‌های پرتاب (ارائه خدمات پرتاب ماهواره) در مرکز فضایی کندی ناسا صورت می‌پذیرد. هدف اصلی این تحقیقات، یافتن مدلی برای بررسی هرچه بهتر رفتار تلاطم‌های سوخت درون مخزن است. همچنین یک مرکز تحقیقاتی پیشرفته[3]، با هدف بررسی تلاطم‌های سوخت در دانشگاه هوانوردی ریدل اِمبِری طراحی و ساخته شده است. این مرکز، آزمون‌های جدیدی را طراحی و دستاوردهای قابل اعتمادی را ارائه نموده است. از مطالعات حاضر در مرکز تحقیقات فضایی امبری- رایدل می‌توان به مدل‌سازی سطح تلاطم‌ها در مخزن سوخت با استفاده از روش‌های مختلف اشاره نمود. نمونه‌ای از این روش‌ها در مخزن‌های کروی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی صورت پذیرفته است. در پژوهشی[4]، نحوه استفاده از بسته نرم‌افزاری با نام فلوئنت، برای ایجاد مدل و شبیه‌سازی حرکت تلاطم‌های مخزن سوخت معرفی شده است. این برنامه المان محدود با استفاده از تکنیکی که روش حجم سیال (VOF) نامیده می‌شود، برای مدل‌سازی و تعامل میان مایعات به کار گرفته می‌شود. *هیرت* و *نیکولز*[5]، در مقاله خود برای مواردی مانند سطح آزاد تلاطم‌ها، برای مایعاتی که سوخت و هوا هستند نشان می‌دهد، تلاطم‌های سوخت در داخل مخزن به‌طور طبیعی جهت جریان هوا را تغییر می‌دهند. با استفاده از قوانین جرم، مومنتوم، معادلات انرژی و همچنین معادلات VOF، می‌توان رفتار مایعات و مقادیر نیروهای حرکتی آنها را پیش‌بینی نمود.

www.SID.ir

Archive of SID

ضرایب فشار و سرعت به‌صورت تابعی از زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست‌آمده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی با چندین سناریو مورد مطالعه و آزمون تجربی در آزمایشگاه قرار گرفته است. مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی با نتایج مورد تایید تجربی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین تغییراتی مانند تغییر در میزان گرانش، مخزن‌های کروی با اندازه‌های بزرگ‌تر، شکل‌های متفاوتی از مخزن و سیال با ویسکوزیته متفاوت بررسی شده است. در نهایت، مدل تغییراتی شامل مخزن با سامانه مدیریت پیشرانه دیافراگمی یا پره‌ای می‌شود. شکل ۱، نمونه‌ای از روندنمای شبیه‌سازی تلاطم‌های سوخت درون مخزن را که می‌توان به‌عنوان مرجع از آن استفاده نمود، نشان می‌دهد. *چتمن* و همکاران[6]، در مقاله‌ای، یکپارچه‌سازی مدل دینامیک سیالات محاسباتی را با تحقیقات آزمون آزمایشگاهی انجام‌شده برای شبیه‌سازی تلاطم‌های سوخت در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فضایی امبری- رایدل بیان می‌کنند. در حال حاضر از داده‌های تجربی و دیگر مدل‌های آنالوگ، پارامترهای مورد نیاز استخراج می‌شود. از این داده‌ها، پارامتری به‌عنوان محدودیت برای طراحی فضاپیماها استفاده می‌شود. مدل‌های جدید دینامیک سیالات محاسباتی نیز به‌عنوان داده‌هایی هستند که برای تایید آن از نتایج تجربی استفاده می‌کنند. در نهایت از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی تاییدشده می‌توان برای استخراج داده‌های تجربی استفاده نمود. استفاده از داده‌های دینامیک سیالات محاسباتی به‌جای داده‌های تجربی، زمانی که امکان تست آزمایشگاهی به‌راحتی امکان‌پذیر نباشد یا هزینه‌های تست بسیار بالا باشد، در اولویت است.



شکل ۱) روندنمای پژوهش روش شبیه‌سازی تکانه‌های سوخت مخزن[6]

تام و همکاران[7]، از وجود کشش سطحی در توسعه سامانه مدیریت پیشرانه بهره گرفته‌اند. نتایج این تحقیق، برای بهینه‌سازی 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، به‌صورت محدود نتایج تجربی و آزمایشگاهی تنش سطحی در کنار تیغه‌ها منتشر شده است. *استس* در ناسا[9]، روشی برای توسعه و پیاده‌سازی یک فرآیند برای تولید سامانه مدیریت پیشرانه از جنس آلومینیوم با قابلیت خیس‌شوندگی بسیار بالا برای استفاده در مخزن هیدرازین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی، مراحل توسعه و پیاده‌سازی برای تولید یک سامانه مدیریت پیشرانه از جنس آلومینیوم را ارائه نموده است که سازگار با مخزن سوخت هیدرازین باشد. صحه‌گذاری این مقاله با توجه به نتایج آزمایشگاهی انجام شده و آزمایش صورت‌گرفته با توجه به خواص توری انجام شده است. برایان و همکاران[10]، در تحقیقات خود به بررسی محاسباتی تعیین فرکانس طبیعی و نوسانات دیافراگم و تاثیر آن بر مخزن سوخت و سامانه سوخت‌رسانی متمرکز نمودند. سامانه مدیریت پیشرانه در این مرجع برای مخزن طراحی‌شده از نوع دیافراگمی بوده است و تلاطم‌های 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 مقاله‌ای با عنوان سیر تکامل طراحی و تولید مدیریت مصرف سوخت برای پروازهای فضایی در اروپا و ایالات متحده به بررسی مخزن‌های ساخته‌شده می‌پردازند. نگاهی به روند مخزن‌های تولیدشده از سال ۱۹۷۰ تاکنون دارد و نتایج فقط شامل عکس از مخزن‌های مونتاژشده و نهایی است. *تام* و همکاران[12]، مخزن سوخت کاوشگر مریخ را که در سال ۱۹۸۸ استفاده و چندین بار در ماهواره‌های تجاری مورد استفاده قرار گرفته است را مورد بازبینی قرار داده و تغییرات مرکز جرم مخزن را در حین ماموریت خود به حداقل رسانده‌اند. مخزن موجود از نظر حاشیه ایمنی سازه، مورد بررسی قرار گرفته و آزمون‌های تجربی فشاری بیشتری انجام شده است. سامانه مدیریت پیشرانه استفاده‌شده مورد بازبینی قرار گرفته و بزرگ‌تر شده است. (تکانه‌های 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 پیشرانه را با استفاده از روش حجم مایع VOF انجام داده‌اند. در این مرجع با استفاده از الگوریتم حرکت سیمپل‌سی، تحلیل و شبیه‌سازی‌ها به‌صورت دوبعدی نشان داده شده و محاسبات متغیر با زمان انجام شده است. همچنین حل جریان به‌صورت دوفازی و با فرض گاز هلیوم و سوخت هیدرازین صورت پذیرفته که طی مراحلی و با استفاده از نمودار نرخ جریان، بهینه‌سازی انجام شده است. شبیه‌سازی که در مقدمه سه‌بعدی ذکر شده، انجام شده، ولی تمامی تصاویر ارائه‌شده دوبعدی است و تحلیل‌ها فقط بر سامانه مدیریت پیشرانه (نه به‌صورت جامع و به‌همراه مخزن) انجام شده است. *هو* و همکاران[14]، مقایسه‌ای بین شبیه‌ساز نرم‌افزاری و نتایج آزمایشگاهی شبیه‌سازی بدون گرانش انجام داده‌اند (نتایج نرم‌افزاری نهایی و با ارائه عکس دوبعدی انجام شده است و نتایج آزمایشگاه با ارائه عکس انجام شده و خطاها و تفاوت‌های بین این دو بررسی شده است).

الهندال و همکاران[15]، شبیه‌سازی دوبعدی حباب به‌روش حجم مایع را انجام داده‌اند *سانسر* و همکاران[16]، شبیه‌سازی نیروهای واردشده به سوخت درون مخزن همراه با دیافراگم، فضاپیما و تاثیر این تکانه‌ها روی حرکت سوخت را با نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی و تحت تاثیر گرانش انجام دادند. *مارسل* و همکاران[17]، روی شبیه‌ساز تکانه‌های سوخت در مخزن همراه با دیافراگم، با نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی تحت تاثیر گرانش کار کرده‌اند. همزمان نتایج تجربی را با نتایج نرم‌افزاری مقایسه کرده‌اند (با توجه به دستگاهی که انتخاب کرده‌اند و نزدیک‌بودن نتایج نهایی این آزمایش با توجه به گرانش زمین انجام شده و هیچ‌گونه سامانه مدیریت پیشرانه برای مخزن طراحی نشده است و فقط تکانه در مخزن را مورد بررسی قرار داده‌اند). در پژوهشی[18]، روی شبیه‌سازی تکانه‌های سوخت درون مخزن با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری، این کار را انجام داده‌اند و مخزن مورد نظر متناسب با مخزن به‌کاررفته در فضاپیمای Orion است. *ناصح* و *علی‌پور*[19, 20]، شبیه‌سازی و تحلیل سامانه مدیریت

www.SID.ir

Archive of SID

پیشرانه را به‌همراه مخزن ذخیره سوخت به‌منظور بررسی عملکرد و رفتار سامانه مدیریت پیشرانه انجام داده‌اند. در این خصوص، روندنمای طراحی و شبیه‌سازی ارائه شده است.

با توجه به پیشینه پژوهش این حوزه (بررسی‌شده در بالا)، هدف از ارائه این مقاله، ارائه روش جامع برای بررسی تلاطم‌های مخزن سوخت مراحل بالای حامل‌های یک‌بارمصرف، فضاپیماها و ماهواره‌ها است. برای صحه‌گذاری تحلیل‌های مذکور، نتایج به‌دست‌آمده با نتایج آزمون‌های تجربی و نرم‌افزاری مرجع[17] مقایسه می‌شوند. استفاده از روش جامع، سبب صرفه‌جویی در زمان و هزینه (بدون نیاز به انجام آزمایشات تجربی) خواهد شد. منظور از روش جامع طراحی و شبیه‌سازی مخزن، تحلیل رفتار سوخت تحت شرایط واقعی است. در این روش ارضای قیود طراحی برای دستیابی به بالاترین دقت شبیه‌سازی صورت می‌پذیرد.

بنابراین اهداف پژوهش حاضر را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

۱- شبیه‌سازی عددی سطح آزاد سیال درون مخزن تحت بارهای اغتشاشی (تکانه‌های خارجی) به‌منظور درک رفتار سوخت درون مخزن و تلاطم‌های آن است.

۲- روش پیشنهادی به طراحی سامانه مدیریت پیشرانه (سامانه مدیریت پیشرانه) برای سوخت‌رسانی در شرایط بی‌وزنی (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.

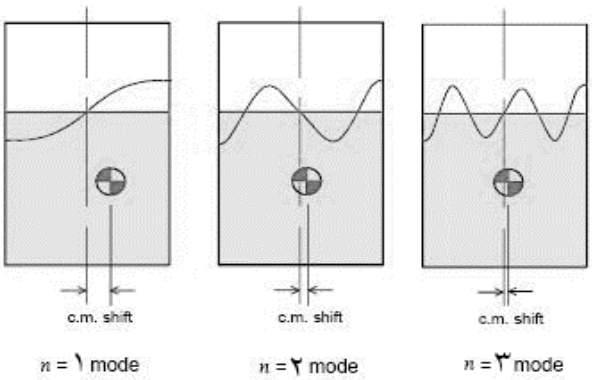
۲- انواع روش‌های مدل‌سازی تلاطم و شکل مودها

شکل موج تلاطم را می‌توان 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=۱ باشد، موج در نقطه x=۰ 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=۲ باشد، یک سری پیک‌های میانی وجود خواهد داشت که تعداد پیک‌ها با n، افزایش می‌یابد. شکل ۲ نشان‌دهنده طرح سه مد اول و حرکت نسبی مرکز جرم سیال برای هر مد است[21].



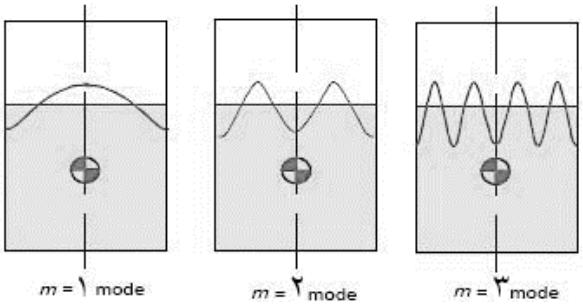
شکل ۲) شکل‌های مربوط به موج متلاطم برای سه موج نامتقارن اول در جهت x در یک تانک مستطیلی[20]

حرکت مرکز جرم سیال برای مد اساسی n=۱ به‌طور ذاتی بزرگ‌تر از دیگر مدها برای همان دامنه موج ماکزیمم است. از آنجایی که نوسان مرکز جرم، منبعی برای تولید نیروها و گشتاورهای تولیدشده توسط تلاطم است، موج n=۱، نیرو یا گشتاور خیلی بزرگ‌تری نسبت به مدهای دیگر، تولید می‌کنند.

مدهای متلاطم متقارن به‌طور مشابه با شروع از $\emptyset_1$ نسبت به $\emptyset_2$ به دست می‌آید. مدهای طبیعی متقارن که همگی نسبت به مدهای نامتقارن معادل، بزرگ‌تر هستند، از رابطه ۲ به دست می‌آیند:

$$\omega_n{}^2 = 2m\pi(g/a)tanh[2\pi m(h/a)] \quad (۲)$$

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



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

مدل‌سازی تلاطم در مخازن کروی و همچنین تحلیل‌هایی که برای این مخازن استفاده می‌شود، بسیار پیچیده است. بنابراین برای نمایش پارامترهای مدل مکانیکی از نمودارها (به‌جای جدول) بهره گرفته می‌شود. نمودار ۱، اطلاعات لازم را برای مدل‌سازی تلاطم براساس مدل پاندولی در مخزن کروی نشان می‌دهد. در این مدل، پارامتر ممان اینرسی مرکزی برای جرم ثابت، مورد نیاز نیست، چرا که در سیال ایده‌آل چرخش مخزن حول محور گذرنده از مرکز، هیچ‌گونه حرکت سیال و در نتیجه هیچ‌گونه نیرو یا ممان تلاطم را ایجاد نمی‌کند. در مخازن کروی، سازگاری بین نتایج آزمایش و نتایج تحلیل به‌خوبی مخازن استوانه‌ای و مستطیلی نیست. این امر به‌خاطر وجود خواص غیرخطی بیشتر در مخازن کروی نسبت به مخازنی با دو دیواره موازی است. بنابراین از نتایج تئوری خطی مانند مدل مکانیکی نشان‌داده‌شده در نمودار ۱، برای مخازن کروی نمی‌توان انتظار دقتی همانند مخازن دیگر داشت[22].

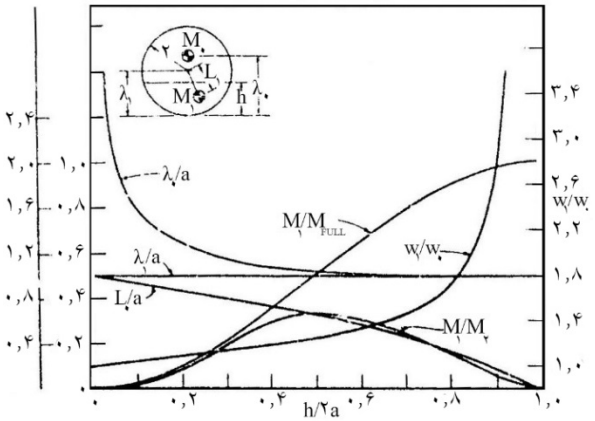
نتیجه مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی مدل پاندول مخازن کروی آن است که با وجود سازگاری مناسبی که در تخمین فرکانس اصلی به‌جز وقتی که مخزن تقریباً پُر یا تقریباً خالی است (جایی که اثرات غیرخطی غالب است)، وجود دارد. در مورد نسبت جرم نوسان‌کننده پاندول، این سازگاری دیده نمی‌شود. دو پارامتر دیگر یعنی طول پاندول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

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

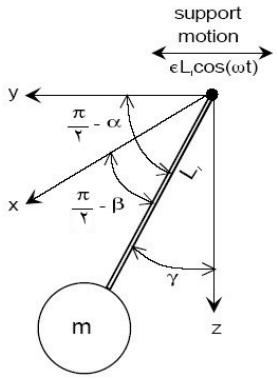
www.SID.ir

Archive of SID

یک قطر گرهی طی تلاطم ساکن می‌مانند، اما با ناپایدارشدن تلاطم، این خط یا قطر نودال حول محور عمودی دوران می‌کند که این ناشی از خواص غیرخطی تلاطم است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، این خاصیت در پاندول نیز وجود دارد. چنانچه نقطه‌آویز پاندول در فرکانس نزدیک فرکانس طبیعی پاندول تحریک نوسانی انتقالی شود، حرکت پاندول از صفحه تحریک جدا می‌شود و خطی که پاندول روی آن عقب و جلو می‌رود، شروع به چرخش می‌کند[23].



نمودار ۱) مدل‌سازی تلاطم به‌کمک مدل پاندولی ساده برای مخازن کروی[2]



شکل ۴) مدل پاندول مخروطی تلاطم دورانی[2]

از آنجا که حرکت سیال هنگام تحریک در فرکانس‌های دور از فرکانس طبیعی با مدل مکانیکی پاندول نسبتاً خوب مدل می‌شود، به نظر می‌رسد 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 مودهای (یا درجات آزادی) مختلف منتقل می‌شود. در اطراف فرکانس رزنانس سیال، سه نوع رفتار از سیال مشاهده می‌شود 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 صفحه‌ای نامتقارن پایدار مشاهده می‌شود. حال اگر فرکانس تحریک در پهنای باندی که کمی بالاتر از فرکانس طبیعی تلاطم قرار دارد باشد، حرکت پایدار غیرصفحه‌ای اتفاق می‌افتد، یعنی خط گره‌ای موج ایستاده (قطر نودال) با فرکانسی تقریباً برابر فرکانس تحریک شروع به چرخش می‌کند. این حرکت چرخشی روی موج نامتقارن سوار می‌شود. در اینجا ممنتوم زاویه‌ای که سیال دارد، نتیجه کوپلینگ غیرخطی بین حرکت سیال موازی جهت تحریک و حرکت عمود بر صفحه تحریک است. چنانچه فرکانس تحریک در باند فرکانسی کوچکی درست زیر فرکانسی باشد که حرکت چرخشی سیال اتفاق می‌افتد، حرکت ناپایدار سیال یا حرکت گردابه‌ای اتفاق می‌افتد، یعنی خط گره‌ای به‌طور یکنواخت نمی‌چرخد، بلکه ابتدا در یک جهت شروع به چرخش می‌کند. سپس متوقف می‌شود و حال شروع به چرخش در خلاف جهت قبلی می‌کند. شکل ۴، یک پاندول مخروطی را نشان می‌دهد که برای مدل‌کردن حرکت چرخشی به کار می‌رود. جرم و طول پاندول همان‌هایی هستند که در مدل مکانیکی پاندول برای تلاطم معمولی به کار می‌رود. این پاندول با یک حرکت انتقالی نوسانی در جهت y تحریک می‌شود و موقعیت پاندول با زوایای پاندول نسبت به محورهای x, y و z مشخص می‌شود. ε نیز بزرگی دامنه تحریک را نسبت به طول پاندول نشان می‌دهد. با توجه به جهت تحریک، حرکت پایدار پاندول وقتی اتفاق می‌افتد 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:

$$\csc\alpha \approx 1 - \alpha^2/2$$
$$\sin\alpha \approx \alpha - \alpha^3/6 \qquad (۳)$$

همچنین تقریب مشابه برای دو زاویه دیگر به دست می‌آید:

$$\left[\frac{d^2}{dt^2} + \frac{g}{L_1}\right]\alpha - \frac{g}{6L_1}\alpha^3 + \frac{1}{2}\alpha\left[\frac{d^2}{dt^2} + \frac{g}{L_1}\right]\beta^2 = \epsilon\omega^2 \csc\omega t \qquad (۴)$$

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

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

$$\sin^2\gamma = \sin^2\alpha + \sin^2\beta \qquad (۵)$$

یک حل معادلات فوق $\beta = 0$ است که همان حرکت صفحه‌ای غیرخطی (و پایدار) پاندول را نشان می‌دهد. می‌توان نشان داد که معادلات فوق، حل غیرخطی نیز دارند که براساس آن پاندول دارای حرکت چرخشی حول محور z نیز است. این حل‌ها نشان می‌دهند که به‌ازای محدوده خاصی از مقادیر پارامترها، حل پایدار برای پاندول نتیجه می‌شود. خواص پایداری نتایج با اعمال آشفتگی کوچک و مشخص‌کردن شرایطی که طی آن آشفتگی رشد می‌کند یا دفع می‌شود به دست می‌آید. طبق مطالعات انجام‌شده روی پاندول، نتایج را با تعریف فرکانس بی‌بعد با استفاده از رابطه زیر می‌توان تحلیل نمود:

$$v = \varepsilon^{-2/3}[(\omega^2 - {\omega_1}^2)/{\omega_1}^2] \text{ and } {\omega_1}^2 = g/L_1 \qquad (۶)$$

با توجه به رابطه فوق می‌توان بازه فرکانسی را به‌صورت زیر تحلیل نمود:

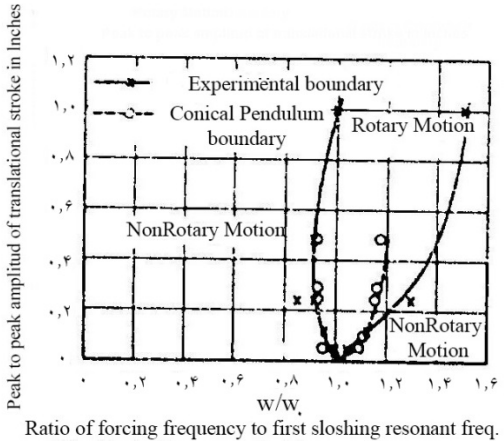
در محدوده فرکانسی $v >$ ۰/۷۵۷ و $v <$ -۰/۹۴۵، پاندول، حرکت هارمونیک ساده صفحه‌ای پایدار دارد. این حرکت به تشکیل امواج نامتقارن معمول با خط گره‌ای ثابت اشاره دارد. در محدوده فرکانسی ۰/۱۵۴< v <۰/۷۵۷ نیز پاندول، حرکت هارمونیک ساده غیرصفحه‌ای پایدار دارد. این حرکت به حالتی که سیال حرکت دورانی دارد و خط گره‌ای موج نامتقارن تلاطم حول محور عمودی مخزن می‌چرخد اشاره دارد.

در محدوده فرکانسی ۰/۱۵۴> v >-۰/۹۴۵ پاندول، حرکت هارمونیک ساده ناپایدار صفحه‌ای یا غیرصفحه‌ای دارد. در این

www.SID.ir

Archive of SID

حالت صفحه حرکتی پاندول نوسان می‌کند. این نوع حرکت پاندول به حرکت گردابی سیال که طی آن خط گره‌ای موج نامتقارن تلاطم حول محور عمودی مخزن نوسان می‌کند، اشاره دارد. به‌ازای v >۰/۷۵۷، وجود هر دو حرکت پایدار صفحه‌ای و غیرصفحه‌ای به شرایط اولیه بستگی دارد. یعنی چنانچه حرکت غیرصفحه‌ای اولیه‌ای مثل حرکت دورانی وجود داشته باشد، حرکت چرخشی در محدوده فرکانسی فوق نتیجه خواهد شد و در غیر این صورت حرکت صفحه‌ای است. نمودار ۲، مقایسه مرزهای پایداری بین پیش‌بینی مدل با نتایج تجربی را نشان می‌دهد.

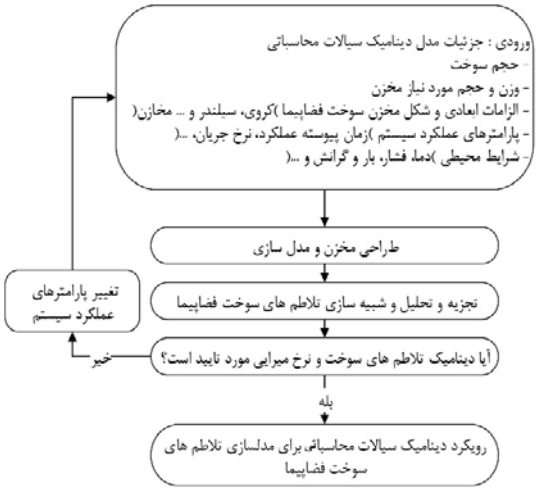


نمودار ۲) مقایسه نواحی تلاطم دورانی مدل پاندول مخروطی با داده‌های تجربی[2]

مرز پایینی فرکانس که بالای آن خط گره‌ای شروع به نوسان می‌کند، نسبتاً خوب پیش‌بینی شده است. اما مرز فرکانسی بالایی که پایین‌تر از آن تلاطم دورانی حتی بدون وجود چرخش در شرایط اولیه ایجاد می‌شود، فقط به‌ازای حرکات با دامنه کوچک، پیش‌بینی خوبی نشان می‌دهد. مرز فرکانس بالایی به‌صورت قوی به دقت هندسه تانک و تحریک وابسته است، یعنی هرچه تحریک جانبی و مدوّربودن مخزن دقیق‌تر باشد، مرز پایداری تلاطم و پاندول مخروطی بیش از پیش سازگارتر و به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. بنابراین به نظر می‌رسد که پاندول مخروطی مدل مکانیکی خوبی برای تلاطم دورانی باشد. تحقیقات دیگر نشان می‌دهند که چنانچه در معادلات پاندول به‌جای جای‌گذاری سینوس‌ها و کسینوس‌ها با چند عبارت اول از بسط سری‌ها استفاده شود، نتایج نه‌تنها در مورد مرزهای پایداری بلکه در مورد بزرگی و زاویه فاز ممان و نیرو نیز با نتایج تجربی سازگاری خوبی دارند. تحلیل‌های کامل‌تر حرکات نوع سوم (ناپایدار) نشان داده‌اند که این حرکات لزوماً آشوبناک هستند[23].

۳- روش مدل‌سازی سیستمی تکانه‌های مخزن سوخت

در این بخش، روندنمای مدل‌سازی سیستمی شبیه‌سازی تلاطم سوخت مخزن به‌صورت شکل ۵ معرفی می‌شود. این روندنما از شش گام اصلی تشکیل شده است. این شش گام به‌ترتیب بدین صورت بوده که گام اول، داده‌های ورودی مدل‌سازی دینامیک سیالات است که به‌طور کلی می‌توان 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 نرم‌افزار دینامیک سیالات (نوع جریان، نوع حل‌کننده، تاثیر زمان و گام‌های زمانی و غیره) را شامل می‌شوند و نهایتاً دسته سوم مربوط به پارامترهای مربوط به شرایط محیطی (دما، فشار، نیرو و جاذبه و غیره) هستند. تمامی این سه دسته پارامترها به‌عنوان ورودی نرم‌افزار دینامیک سیالات تعریف می‌شوند. گام دوم، طراحی مخزن و مدل‌سازی مخزن برای اجرای شبیه‌سازی است. با توجه به انتخاب مخزن کروی، اجرای شبیه‌سازی رفتار تلاطم سوخت مخزن مورد نظر دارای ۶۰% از حجم مخزن سوخت بوده و ساختار مخزن به‌گونه‌ای بوده که ورودی برای ورود سوخت به مخزن و اجرای شبیه‌سازی است. حجم سوخت درون مخزن برابر ۲/۶لیتر و مقدار نیروی واردشده به مخزن، برابر با ۰/۲پوند در نظر گرفته می‌شود (در حدود یک‌نیوتون). گام سوم، شبیه‌سازی و تحلیل تلاطم‌های سوخت درون مخزن است که با توجه به داده‌های ورودی مخزن مورد بررسی قرار می‌گیرد. از میان داده‌های ورودی، تمامی داده‌ها ثابت و غیرقابل تغییر هستند. در این میان تنها داده‌های تنظیمات نرم‌افزار قابل تغییر هستند. برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی پژوهش حاضر، نتایج با نتایج پژوهشی[17] مقایسه شده‌اند. گام چهارم، ارزیابی و تایید نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تحلیل است که مقایسه میزان تلاطم‌های سوخت درون مخزن در پایان شبیه‌سازی با نتایج پژوهش مرجع[17] را شامل می‌شود. 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 یک‌ثانیه است. در پایان گام چهارم، تایید نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در صورتی که نتایج شبیه‌سازی و تحلیل با مقادیر موجود در نتایج تجربی قابل صحه‌گذاری باشد، می‌توان از آن برای تولید مدل‌های دیگر تجربی استفاده نمود و در غیر این صورت شبیه‌سازی و تحلیل نتایج نیاز به بازنگری دارد. برای این منظور، پارامترهای تنظیمات نرم‌افزاری تغییر و شبیه‌سازی و تحلیل مدل مجدداً اجرا می‌شود. این فرآیند تا صحه‌گذاری کامل نتایج ادامه می‌یابد. برای نمونه در جدول ۱ تنظیمات پیش فرض نرم‌افزار برای شبکه‌بندی ارائه شده است.



شکل ۵) روش مدل‌سازی سیستمی تلاطم‌های مخزن سوخت

جدول ۱) تنظیمات پیش‌فرض نرم‌افزار برای شبکه بندی

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

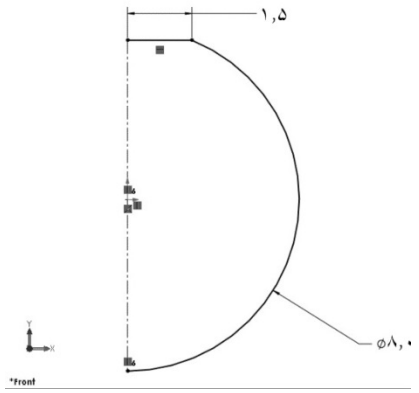
www.SID.ir

Archive of SID

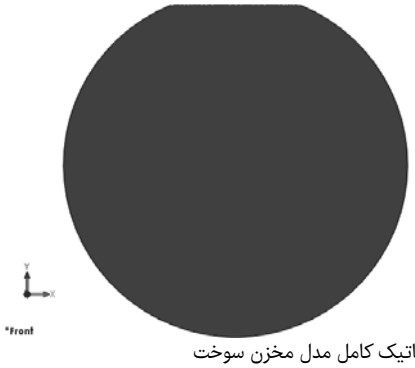
۴- طراحی و مدل‌سازیمخزن

با توجه به اهمیت صحه‌گذاری نتایج شبیه‌سازی با نمونه تجربی، لازم است طراحی و مدل‌سازی مخزن براساس مقاله مرجع[17] صورت پذیرد. برای این منظور، در ادامه مشخصات مخزن آورده شده است.

مخزن به‌صورت کروی دارای قطر ۸اینچ (۰/۲۰۳۲متر) و قطر ورودی به مخزن برابر ۳اینچ (۰/۰۷۶۲متر) است. دریچه‌ای نیز در بالای مخزن برای ورود سوخت و همچنین ایجاد شرایط اتمسفر قرار دارد. نمونه اولیه مدل مورد بررسی، در نرم‌افزار سالیدورک طراحی شده و نمونه نهایی برای انجام شبیه‌سازی در مجموعه نرم‌افزار انسیس بخش نرم‌افزاری مدل دیزاینر ترسیم شده است. نمونه مدل ساخته‌شده در آزمایشگاه برای انجام آزمون‌های تجربی در پژوهش مرجع[17] نشان داده شده است (شکل‌های ۶ و ۷).



شکل ۶) شماتیک دوبعدی مدل مخزن سوخت



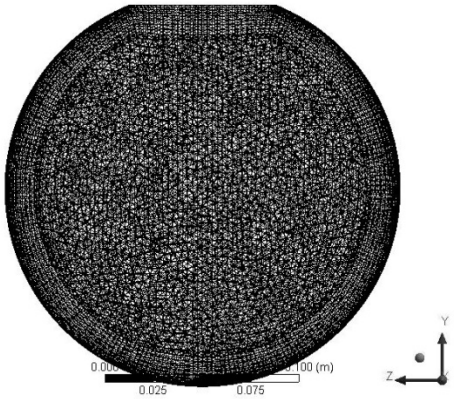
شکل ۷) شماتیک کامل مدل مخزن سوخت

نتایج تجربی مورد استفاده برای صحه‌گذاری نتایج شبیه‌سازی این مقاله در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فضایی امبری- رایدل ب دست آمده است. در این آزمایشگاه، تحقیقات تلاطم‌های سوخت با استفاده از تجهیزات تکان‌دهنده‌های خطی و سیستم دریافت داده‌های پیوسته صورت می‌گیرد. در این آزمایش، یک مخزن کروی ۸اینچی به‌همراه کابل نگهدارنده به یک محرک خطی متصل می‌شود. همچنین بین عملگر و مخزن سوخت برای انتقال نیرو، مبدل قرار داده شده است که باعث ایجاد تکانه در مخزن سوخت می‌شود و داده‌های تولیدشده توسط سیستم‌های کامپیوتری دریافت و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

راه‌حل مورد بررسی در آزمایشگاه تحقیقاتی فوق نشان می‌دهد برای یافتن راهی برای میرانمودن تاثیر تکانه‌های ناگهانی مخزن سوخت، بررسی میرایی انرژی در تکانه‌های سوخت در مخزن است. زیرا نرخ کاهش تلاطم‌ها و نوسانات به‌شکل مخزن و جنس سوخت و همچنین تلاطم سوخت بستگی دارد. اثرات تکانه‌ها بر سوخت درون مخزن غیرقابل انکار است و ماهیت ویسکوزیته سوخت باعث ناپدیدشدن انرژی و در نهایت حذف لرزش از سیال می‌شود که باعث کاهش نیروی واکنش در طول زمان می‌شود. تحلیل این اثرات که در مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی قابل بررسی است و برای صحه‌گذاری تلاطم‌های سوخت و فرکانس تحریک‌ها اتفاق می‌افتد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این اطلاعات می‌توان برای جلوگیری از برخورد فرکانس و تحریک رزونانس در سیستم مخزن سوخت استفاده نمود. مثالی از داده‌های تلاطم‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد، شکل کروی ۸اینچی را با حدود ۶۰% ظرفیت خود که حدود ۲/۶لیتر مایع بوده، در آن دامنه نوسانات در حدود ۰/۲پوند و با دقت ۰/۰۰۱پوند است.

همان گونه که در شکل ۸ نشان داده شده، بیشتر شبکه‌سازی در کنار دیواره صورت پذیرفته است. زیرا شبکه‌بندی برای بررسی اثرات برخورد سیال با دیواره مخزن ضروری است. شبکه‌بندی به‌کاررفته به‌صورت کامل غیرسازمان‌یافته است که در نرم‌افزار فلوئنت به شبکه پلی‌هیدرا تغییر داده شده است. به‌وسیله این تکنیک، تعداد کل سلول‌ها را می‌توان کاهش داد، بدون اینکه در نتیجه نهایی تاثیری ایجاد کند. بنابراین، این ابتکار سبب صرفه‌جویی بسیار زیادی در زمان محاسبه می‌شود. شرایط مرزی در کنار دیواره‌ها در نظر گرفته نشده و فشار مخزن، فشار ورودی مخزن و فشار اتمسفر است. هر چند بی‌اهمیت 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 ۱۰۱۳۲۵پاسکال در نظر گرفته شده است.

جدول ۲، مشخصات مش‌بندی در مرز میان سوخت و دیواره مخزن را نشان می‌دهد. این مشخصات، تعداد شبکه‌ها، نقاط اتصال آن از قبیل نرخ رشد شبکه، تعداد لایه‌های شبکه در کنار دیواره‌ها و ضخامت اولین لایه و غیره را شامل می‌شود.



شکل ۸) شماتیک برش‌خورده شبکه‌بندی مخزن سوخت

جدول ۲) تنظیمات ساختار شبکه‌های ایجادشده برای شبیه‌سازی

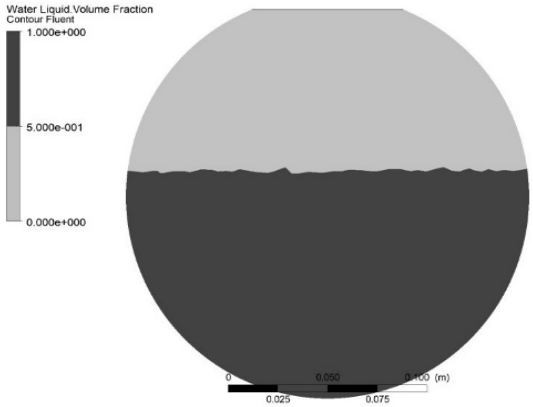
نوع شبکه	
تمام سطح‌ها	تنظیمات پیش‌فرض
شروع از اولین لایه	تنظیمات لایه مرزی
۰/۰۰۱متر	ارتفاع اولین لایه
۸	بیشینه تعداد لایه‌ها
۱/۲	نرخ رشد
Pre	الگوریتم
No	استفاده از تنظیمات پیشرفته
۱۸۷۵۴۷	اتصالات
۵۲۲۴۳۱	تعداد

www.SID.ir

Archive of SID

۵- روش تحلیل تکانه‌های سوخت مخزن

مدل‌سازی تلاطم‌های سوخت درون مخزن به‌وسیله 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 ($۹/۸۱ m/s^2$) 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 به‌صورت 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 اعمال‌شده در شبیه‌سازی، ورودی مخزن، باز و جریان هوا به‌صورت آزاد به داخل و بیرون مخزن حرکت می‌کند. سوخت موجود در مخزن، تقریبا ۶۰% حجم مخزن را پُر نموده است (شکل ۹). زمان شبیه‌سازی ۲۰ثانیه و گام زمانی اعمال‌شده برای حل ۰/۰۰۱ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۹) موقعیت سوخت در مخزن قبل از شبیه‌سازی

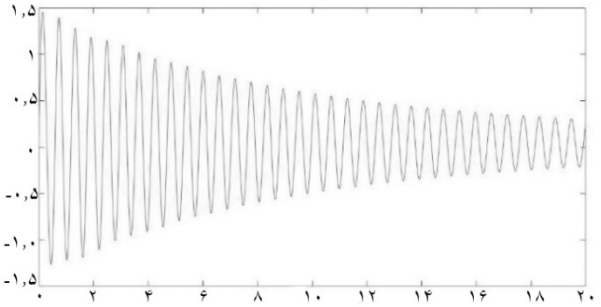
۶- ارزیابی نتایج

در این بخش لازم است تا نتایج حاصل از اجرای گام‌های روندنمای طراحی مورد ارزیابی و صحه‌گذاری قرار گیرند. چنانچه بیان شد، تلاطم‌های مخزن سوخت شبیه‌سازی‌شده با مقاله مرجع[17] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین صورت که نرخ نوسانات مخزن در مدت‌زمان مشخص، کانتور شکل و کانتور سرعت در مخزن در زمان‌های ۰/۲ و ۰/۴ و یک‌ثانیه در ادامه مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

نرخ نوسانات به‌اندازه‌ای است که در آن نوسانات به‌صورت 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 مدت‌زمان ۲۰ثانیه 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	***
۰/۰۶۵۶۴	نتایج تجربی
۰/۰۶۵۵۷	مدل محاسبات مرجع
۰/۰۶۵۶۴=۰/۲۲*۰/۲۹۲	نتایج استخراج‌شده



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

نتایج جدول ۳ در زمان ۲۰ثانیه محاسبه شده و نتایج محاسبات آزمایشگاهی و نرم‌افزاری ارائه شده است. با مقایسه این نتایج می‌توان به‌خوبی 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 به‌دست‌آمده از این تحقیقات، شامل کانتور شکل و کانتور سرعت در مخزن سوخت در زمان‌های ۰/۲ و ۰/۴ و یک‌ثانیه مورد مقایسه قرار گرفته است. چنانچه در ادامه تشریح می‌شوند، به‌وضوح می‌توان دقت روش ارائه‌شده را مشاهده نمود.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، کانتور موقعیت و فصل مشترک سوخت و گاز به‌ترتیب مربوط به مقاله مرجع[17] و نتیجه شبیه‌سازی تحقیق حاضر در زمان ۰/۲ثانیه است. دقت شبیه‌سازی از طریق مقایسه جداساز فصل مشترک میان سوخت و گاز قابل بررسی است. با ملاحظه این دو نمودار می‌توان به‌خوبی دقت شبیه‌سازی را در زمان ۰/۲ثانیه دریافت. همین ملاحظات و بررسی را می‌توان برای شکل‌های ۱۲ و ۱۳ در زمان ۰/۴ثانیه داشت. در زمان ۰/۴ثانیه نیز به‌خوبی 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 به‌منظور صحه‌گذاری 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 به‌ترتیب کانتور اندازه و جهت سرعت از مقاله مرجع[17] و نتیجه شبیه‌سازی تحقیق حاضر در زمان ۰/۲ثانیه 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 به‌ترتیب در زمان‌های ۰/۴ و یک‌ثانیه صورت پذیرفته است. مقایسه جهت‌های سرعت در قسمت‌های مختلف مخزن قابل بررسی است و مشاهده انجام‌شده به‌خوبی دقت شبیه‌سازی را در زمان ۰/۴ثانیه نشان می‌دهد.

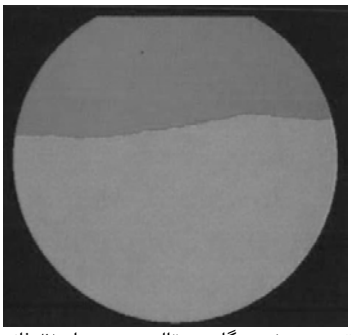
با بررسی که به‌ترتیب کانتور اندازه و جهت سرعت از مقاله مرجع[17] و نتیجه شبیه‌سازی تحقیق حاضر در زمان یک‌ثانیه بوده،

www.SID.ir

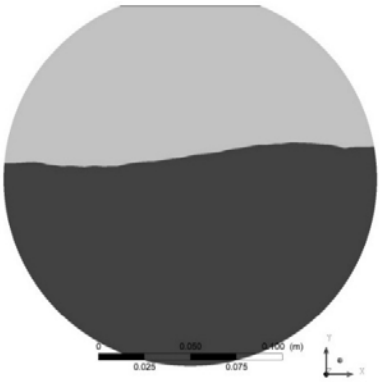
Archive of SID

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.

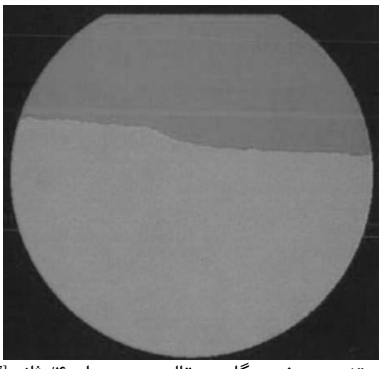
با بررسی نتایج تحقیق حاضر و نتایج موجود می‌توان دریافت، که روش حاضر دارای دقت مناسب است و با این مقایسه صحه‌گذاری بر نتایج قابل اثبات است.



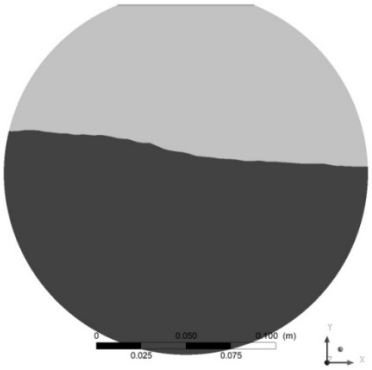
شکل ۱۰) کانتور تغییر سوخت و گاز در مقاله مرجع، زمان ۰/۲ثانیه[17]



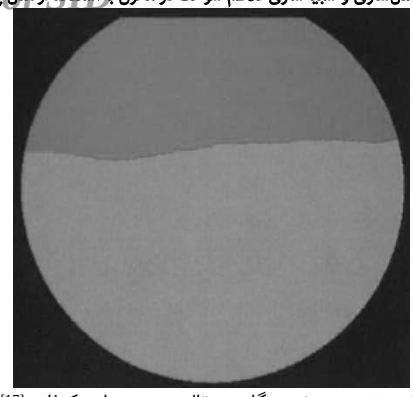
شکل ۱۱) نتایج کانتور تغییر سوخت و گاز (در تحقیق حاضر)، زمان ۰/۲ثانیه



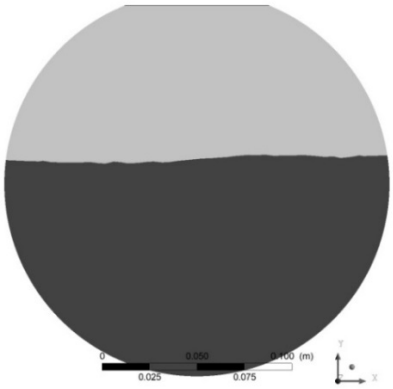
شکل ۱۲) کانتور تغییر سوخت و گاز در مقاله مرجع، زمان ۰/۴ثانیه[17]



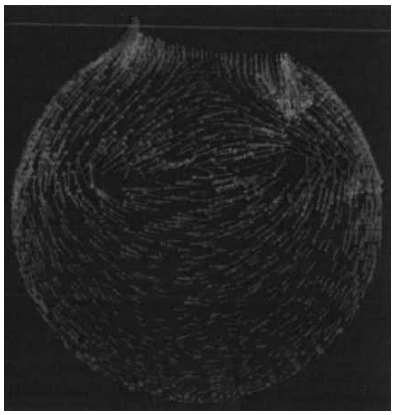
شکل ۱۳) نتایج کانتور تغییر سوخت و گاز (در تحقیق حاضر)، زمان ۰/۴ثانیه



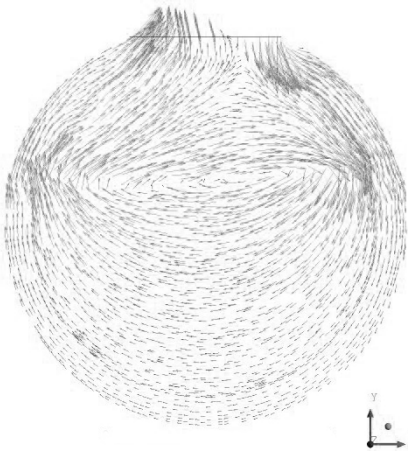
شکل ۱۴) کانتور تغییر سوخت و گاز در مقاله مرجع، زمان یک‌ثانیه[17]



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



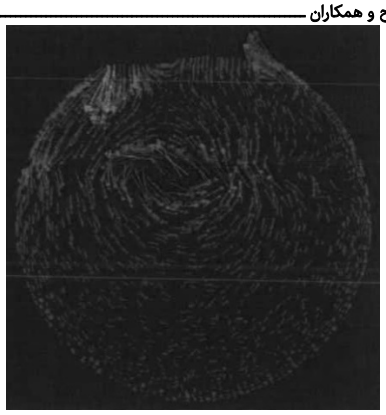
شکل ۱۶) کانتور تغییر سرعت و جهت جریان در مقاله مرجع، زمان ۰/۲ثانیه[17]



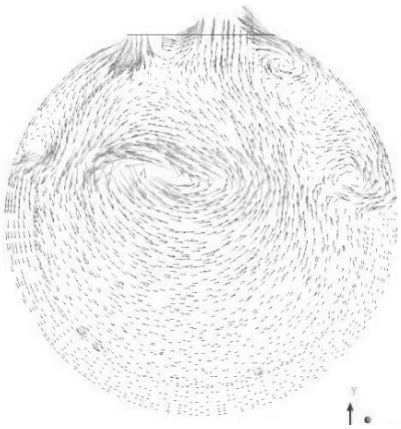
شکل ۱۷) نتایج کانتور تغییر سرعت و جهت جریان (در تحقیق حاضر)، زمان ۰/۲ثانیه

www.SID.ir

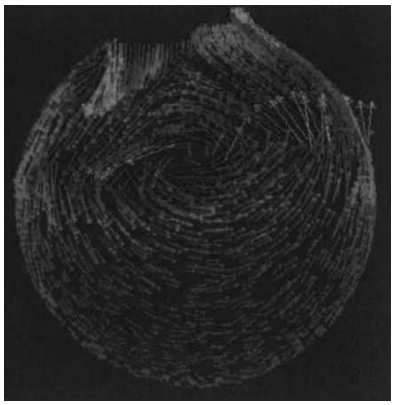
Archive of SID



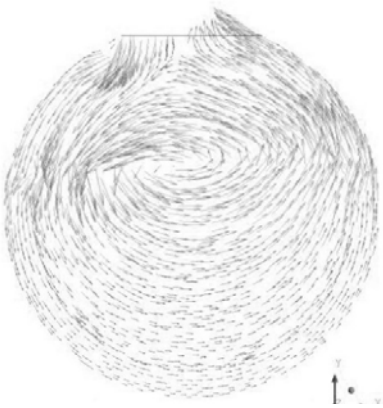
شکل ۱۸) کانتور تغییر سرعت و جهت جریان در مقاله مرجع، زمان ۰/۴ثانیه[17]



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



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



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

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 از رویکرد دینامیک سیالات محاسباتی بهره گرفته شد. در تحقیقات آتی می‌توان مدل‌های پیچیده‌تری از مخزن به‌همراه 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. به‌وسیله 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 ماموریت جلوگیری شود. نتایج استخراج‌شده، دید عمیق‌تری را نسبت به تحرکات سوخت درون مخزن در اختیار سازندگان قرار می‌دهد، به‌گونه‌ای که به‌وسیله 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 به‌صورت 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 ۲۰ثانیه 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 به‌ترتیب در شکل‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۴ در زمان‌های ۰/۲، ۰/۴ و یک‌ثانیه نشان داده شده است. همین نتایج برای تحقیق حاضر به‌منظور صحه‌گذاری و تایید نتایج با استفاده از نتایج تجربی مرجع[17]، به‌ترتیب 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 یک‌ثانیه است که نتایج مربوط به مرجع[17] به‌ترتیب برای زمان‌های مذکور در شکل‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۶ نشان داده شده است. همین نتایج برای تحقیق حاضر در شکل‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵ به‌منظور 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 پیشرانه (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

www.SID.ir

Archive of SID

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 Sclences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposlition. 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 AIAAIASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and aterials 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- Lenahen 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, Hersh 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

www.SID.ir