مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1396، دوره 17، شماره 7، ص‌ص 152-160

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

طراحی بهینه سامانه مدیریت پیشرانه (PMD) مخزن حامل سوخت هیدرازین

حسن ناصح[1*]، علی عالی پور[2]

1- استادیار، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی فضایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الکترونیک، تهران
*تهران، صندوق پستی 834-14665، hnaseh@ari.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 24 فروردین 1396
پذیرش: 21 خرداد 1396
ارائه در سایت: 22 تیر 1396

کلید واژگان:
طراحی بهینه
سامانه مدیریت پیشرانه (PMD)
تحلیل عددی
هیدرازین
مخزن سوخت

چکیده

هدف از ارائه مقاله، روش بهینه طراحی سیستمی سامانه مدیریت پیشرانه یا PMD مخزن حامل سوخت هیدرازین برای استفاده در شرایط بدون گرانش می‌باشد. برای این منظور، از روش‌های عددی برای تحلیل مخزن و رفتار سوخت درون مخزن به همراه PMD برای بهینه‌سازی پارامترهای طراحی سامانه استفاده شده است. بدین صورت که، برای بررسی رفتار سوخت، سامانه مدیریت پیشرانه با استفاده از روش حجم سیال (VOF) در نرم افزار انسیس مدل‌سازی نهایی، شبکه‌بندی و تحلیل شده است. همچنین مدل‌سازی اولیه مخزن و سامانه پیشرانه در نرم‌افزار سالیدورک صورت پذیرفته است. شبیه‌سازی‌های عددی به منظور بررسی عملکرد PMD و اثبات پدیده مویینگی برای سوخت‌رسانی پایدار در شرایط بدون گرانش انجام شده است. متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی طراحی مخزن و PMD به ترتیب 1- کمینه نمودن نسبت وزن به ضریب اطمینان، 2- مشخصات ابعادی مخزن و PMD (ارتفاع، قطر، ابعاد طول و عرض). پارامترهای بهینه‌سازی PMD با هدف دست‌یابی به بیشترین مقادیر دبی جرمی و نرخ حجمی جریان صورت می‌پذیرد. به عبارت دیگر، هدف دستیابی به بیشترین مقادیر سوخت به PMD می‌باشد که در پایان زمان شبیه‌سازی توسط نمودار نرخ جریان قابل اکتساب است. نتایج تحلیل عددی به‌دست آمده عبارتند از: پارامترهای سیستمی بهینه مربوط به مشخصات مخزن و سامانه مدیریت پیشرانه (دستیابی به کمینه وزن و بیشینه ضریب اطمینان و همچنین بیشینه دبی جرمی خروجی از سامانه مدیریت پیشرانه). صحه‌گذاری نتایج با مقایسه پارامترهای سیستمی بهینه به‌دست آمده از نمونه‌های موجود با ابعاد شبکه متفاوت صورت می‌پذیرد. نتایج شبیه‌سازی دبی خروجی برای مدت زمان چهار ثانیه در مقایسه با نمونه موجود، موید کارآیی سیستم طراحی شده می‌باشد.

Propellant Management Device (PMD) Design Optimization of Hydrazine Fuel Tank

Hassan Naseh[1*], Ali Alipour[2]

1- Astronautics Research Department, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran
2- Electronic Section, Islamic Azad University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14665-834, Tehran, Iran, hnaseh@ari.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 April 2017
Accepted 11 June 2017
Available Online 13 July 2017

Keywords:
Optimal design
Propellant management Device (PMD)
Numerical analysis
Hydrazine
Fuel tank

ABSTRACT

The purpose of this article is to design the optimum method of Propellant Management Device (PMD) of hydrazine fuel tank which is used in zero-gravity conditions. To this end, numerical methods are used for analysis of the tank and the fuel behavior inside the tank with PMD to optimize system design parameters. Hence, Ansys software is used to finalize modeling, analysis, meshing and consideration of fuel behavior in PMD by utilizing the Volume Of Fluid (VOF) method. Also, Solid Works software is used for primary PMD and tank modeling. Then, numerical simulation is performed to consider PMD's performance and to illustrate the capillary phenomenon for continuous fuel transferring in zero-gravity conditions. The design variables in tank and PMD optimization respectively are: minimizing the tank weight to safety factor ratio; dimensional specifications of tank and PMD (height, diameter, length and width dimensions). The objectives of PMD optimization are to achieve maximum volumetric and mass flow rate values, and on the other hand, to achieve the most desirable amount of fuel to PMD so that at the end of the time of simulation it can used by flow rates curves. Numerical analysis results that are obtained include: optimal system parameters related to the specifications of the tank with minimum weight and maximum safety factor and also optimal system parameters related to specifications of PMD with maximum performance of mass and volume flow rates in zero gravity. In conclusion, by comparing the existing systems with the optimal system parameters results will be verified. The outlet mass flow rate in simulations of 4 seconds verified the performance of designed system.

1- مقدمه

فضاپیماها، ماهواره‌ها و بلوک‌های انتقال مداری[1] برای انجام مانورهای مورد

[1] Upper stages

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

H. Naseh, A. Alipour, Propellant Management Device (PMD) Design Optimization of Hydrazine Fuel Tank, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 152-160, 2017 (in Persian)

نیاز (ملاقات مداری[1]، نگهداشت ایستگاهی[2] و انتقال مداری و...)، از سامانه پیشرانش استفاده می‌کنند. سامانه‌های پیشرانش سوخت مایع برای حمل سوخت موردنیاز از مخازن پیشران مجهز به سامانه مدیریت پیشرانه (PMD) استفاده می‌کنند. وظیفه سامانه مدیریت پیشرانه، نگهداری سوخت در دهانه خروجی مخزن و سوخت‌رسانی بی‌وقفه به محفظه احتراق حتی در شرایط بدون گرانش و با گرانش بسیار کم می‌باشد. بیش از نیم قرن است که سامانه مدیریت پیشرانه به‌عنوان یک سامانه با استفاده از پدیده موئینگی (کشش سطحی) در مخازن سوخت مایع مورد استفاده قرار گرفته است. علی‌رغم ناچیز بودن نیروهای کشش سطحی در بسیاری از مسائل مهندسی، ولی این نیروها در مخازن حمل سوخت در شرایط کم‌جاذبه و بدون گرانش در ماهواره‌ها و فضاپیماها در مدار زمین بسیار حائز اهمیت و نقش مهمی را ایفا می‌نمایند. با استفاده از PMD می‌توان برای سفینه‌های فضایی یک مخزن سوخت سبک، ساده، قابل اعتماد و دارای روش ساخت آسان را فراهم نمود. سامانه مدیریت پیشرانه برای جدا نمودن سیال و گاز مربوط به سامانه فشارگذاری (بالشتک) در مخازن سوخت مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. سامانه مدیریت پیشرانه دارای انواع مختلف (دیافراگمی، ارتجاعی، توده‌ساز و ...) می‌باشد که در این مدل‌سازی و تحلیل، با توجه به بررسی مزایا و معایب هر یک، از نوع تجهیزات توده‌ساز استفاده شده است.

جیکل [1]، با ارائه مقاله‌ای با موضوع، سامانه مدیریت مصرف پیشرانه، طراحی مفهومی و تجزیه و تحلیل یک PMD با ساختار تیغه‌ای را مورد بررسی قرار داده است. در مراجع [2]، [3] و [4] به ترتیب برای مدل‌های اسفنجی، توری، گلدانی برای توزیع پیشران در مخزن در شرایط (گرانش بسیار کم) صورت پذیرفته است. (در مراجع فوق نتایج بدست آمده، محصول نهایی طراحی مفهومی شده است که صحه گذاری آن با حل معادلات و برای درصدی از کل ترسیم نهایی انجام شده است، برای نمونه، طراحی یکی از پره‌ها را در کنار دیواره‌ای عمودی مورد بررسی قرار داده و براین اساس صحه‌گذاری کل پره‌ها را اثبات نموده‌است). تام و جیکل[5] و [6]، مقالاتی را ارائه نمودند که در آن مخزن از نوع اکسیدایزر همراه با کشش سطحی و مخزن ساخته شده با عدسی مشترک را مورد بررسی قرار می‌دهد. (در این مراجع نتایج ارائه شده به صورت کلی و ویژه محصول نهایی و مونتاژ شده می‌باشد. از مراحل ساخت نمونه و شبیه‌سازی‌ها و بهینه سازی های انجام شده تا رسیدن به محصول نهایی بررسی انجام نشده است). تام و جیکل [7]، با ارائه مقاله‌ای تحت عنوان، کشش سطحی در مخزن مجهز به سامانه مدیریت پیشرانه در مدار زمین برای انتقال سیال سوخت پرداخته است. (نتایج این تحقیق، برای بهینه‌سازی مخزن سوخت هیدرازینی مورد استفاده قرار گرفته است). با همکاری مراکز دانشگاهی و تحقیقاتی در کشور 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 تیغه‌ها منتشر شده است). روبرت و همکاران در ناسا [9]، روشی برای توسعه و پیاده‌سازی یک فرآیند برای تولید سامانه مدیریت پیشرانه 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 پیاده‌سازی برای تولید یک سامانه مدیریت پیشرانه از جنس آلومینیوم که سازگار با مخزن سوخت هیدرازین باشد را ارائه نموده است. (صحه گذاری این مقاله با توجه به نتایج آزمایشگاهی انجام شده است و آزمایش انجام شده 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 طراحی شده از نوع دیافراگمی بوده‌است و تکانه های با درجات آزادی را در روی زمین مورد بررسی قرار داده است نه شرایط بدون گرانش). تام و جیکل [11]، در سال 2016 با ارائه مقاله‌ای با عنوان سیر تکامل طراحی و تولید مدیریت مصرف سوخت برای پروازهای فضایی در اروپا و آمریکا به بررسی مخزن های ساخته شده می‌پردازند. (نگاهی به روند مخزن های تولید شده از سال 1970 تا کنون دارد و نتایج فقط شامل عکس از مخزن های مونتاژ شده و نهایی می‌باشد). تام و همکاران [12]، مخزن سوخت کاوشگر مسنجر را مورد بررسی قرار داده و فازهای طی شده در فرایند ساخت را به‌صورت کلی با توجه به زیاد بودن آن بررسی کرده‌اند نمونه کارهای بیان شده می‌تواند استفاده شود برای آزمون بر روی مخزن‌هایی که در آینده قرار است ساخته شود (مخزن ساخته و مورد استفاده قرار گرفته است و بهینه‌سازی‌های نهایی انجام گرفته است. طراحی مخزن از نظر ساختار و حجم با مخزن موجود در این مقاله متفاوت می‌باشد و طراحی داخل مخزن متناسب با ماموریت می‌باشد و با PMD که در این مقاله طراحی شده تفاوت بسیاری دارد).

تام و همکاران [13]، بر روی مخزن‌های از جنس تیتانیوم با روکش کامپوزیتی کار کرده‌اند [14] و برای نمونه مخزن‌ها را ساخته و آزمون‌های سازه‌ای را بر روی آنها انجام داده‌اند [15] و همچنین ساختار مخزن به همراه آزمون های دینامیکی مخزن را مورد بررسی قرار داده اند [16]. (مخزن های ساخته شده مورد بررسی و نتایج نهایی آن در مقاله آورده شده است. تحلیل و بررسی بر روی سوخت درون مخزن موجود نمی‌باشد). تام و همکارانش [17]، مخزن سوخت کاوشگر مریخ را که در سال 1988 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 را به حداقل رسانده است. مخزن موجود از نظر حاشیه ایمنی سازه مورد بررسی قرار گرفته و آزمون‌های تجربی فشاری بیشتری انجام شده است. سامانه مدیریت پیشرانه استفاده شده مورد بازبینی و بزرگتر شده است. (تکانه های مخزن سوخت در مقاله در محیط بدون گرانش محاسبه نشده است و باید مورد بررسی قرار گیرد، ابعاد این مخزن و ضرایب اطمینان آن در طراحی مخزن این مقاله استفاده شده است). همکاران چینی [18]، طراحی و تحلیل سامانه مدیریت پیشرانه با استفاده از روش حجم مایع VOF صورت پذیرفته است. در این مرجع با استفاده از الگوریتم حرکت سیمپل سی، تحلیل و شبیه‌سازی‌ها به‌صورت دوبعدی نشان داده شده است و محاسبات متغیر با زمان انجام شده است. همچنین حل جریان به‌صورت دوفازی و با فرض گاز هلیوم و سوخت هیدرازین صورت پذیرفته است. که طی مراحلی و با استفاده از نمودار نرخ جریان بهینه‌سازی انجام شده است. (شبیه‌سازی با آن که در مقدمه سه‌بعدی ذکر شده است ولی تمامی تصاویر ارائه شده دوبعدی می‌باشد، و تحلیل‌ها فقط بر روی PMD انجام شده است). همکاران چینی [19]، مقایسه‌ای بین شبیه‌ساز نرم‌افزاری و نتایج آزمایشگاهی شبیه‌سازی بدون گرانش انجام شده است. (نتایج نرم‌افزاری نهایی و با ارائه عکس دوبعدی انجام شده است و نتایج آزمایشگاه با ارائه عکس انجام شده است و خطاها و تفاوت‌های بین این دو را بررسی کرده است). الهندال و همکاران [20]، شبیه‌سازی دوبعدی حباب به روش حجم مایع. دیلون سانسز و همکاران[21]، شبیه‌سازی نیروهای وارد شده به سوخت درون مخزن همراه با دیافراگم، فضاپیما و تاثیر این تکانه‌ها بر

[1] Rendezvous and docking
[2] Station keeping

روی حرکت سوخت با نرم‌افزار CFD و تحت تاثیر گرانش. مارسل و همکارانش[22]، بر روی شبیه‌ساز تکانه‌های سوخت در مخزن همراه با دیافراگم، با نرم افزار CFD تحت تاثیر گرانش کار کرده اند. همزمان نتایج تجربی را با نتایج نرم‌افزاری مقایسه کرده‌اند. (با توجه به دستگاهی که انتخاب کرده‌اند و نزدیک بودن نتایج نهایی این آزمایش با توجه به گرانش زمین انجام شده است و هیچ‌گونه PMD برای مخزن طراحی نشده است و فقط تکانه در مخزن را مورد بررسی قرار داده‌اند). تام و همکاران [23] طراحی، ساخت و مونتاژ بدنه مخزن با پوشش کامپوزیتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آقای بلنجر و همکاران [24] طراحی و تولید بدنه مخزن با روکش کامپوزیتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. یوسف و حمیدخان به‌صورت جداگانه، به بررسی سازه‌هایی فضایی پرتاب با ملاحظات بهینه‌سازی استاتیکی [25] و دینامیکی [26] تمرکز نمودند. بهینه‌سازی انجام شده و نتایج با مجموعه نرم‌افزار انسیس ایجاد شده است. (توجه به رفتار دینامیکی سازه در زمان پرتاب و قرارگیری مدار بیرون از جو زمین). آمبر و همکاران [27]، بر روی شبیه‌سازی تکانه‌های سوخت درون مخزن با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری این کار را انجام داده‌اند و مخزن موردنظر متناسب با مخزن به‌کار رفته در فضاپیمای Orion می‌باشد. (برای این شبیه‌ساز هیچ‌گونه PMD و دیگر قسمت‌ها مورد بررسی نمی‌باشد). فازهای تحلیل، گاز هلیوم و سوخت مایع هیدرازین به صورت دو فازی مدل شده است (طراحی نهایی به صورت دو بعدی بوده و اشکال بسیار ساده فقط بررسی ارتفاع سوخت انجام شده است).

هدف از ارائه این مقاله ارائه روشی جامع برای انجام طراحی، شبیه سازی، آنالیز و بهینه‌سازی مخزن سوخت همراه با PMD برای رفع معایب تحلیل‌های مذکور در پیشینه پژوهش می‌باشد. 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 به همراه سامانه مدیریت پیشرانه، برای نمونه ارضا قیود طراحی برای دستیابی به بالاترین ورودی دبی حجمی مطلوب سوخت به PMD در مدت زمان مشخص و در نهایت عدم عبور گاز از سامانه مدیریت پیشرانه به درون موتور می‌باشد که همراه با بیشینه ضریب اطمینان و کمینه وزن می‌باشد. بخش سازه مخزن و PMD در اولین مرحله همان گونه که اشاره شده است با توجه به نوع آلیاژ تیتانیوم انتخابی ضخامت پوسته PMD، مخزن و ورودی و خروجی مخزن را مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است.

بهینه‌سازی سازه با توجه به محدوده فشار و دمای کاری مخزن انجام شده است و هدف از این بخش استخراج کمینه وزن مخزن با توجه به ضریب اطمینان موردنیاز می‌باشد [17].

برای مخزن، در مرحله بعد همانند مراجع [25] و [26] نتایج دینامیک سازه مخزن و PMD مورد بررسی قرار گرفته است و می‌توان بهینه سازی جدید را با توجه به محدودیت‌های طراحی در بخش شبیه‌ساز دینامیک انجام داد. یکی از اهداف اصلی بخش تحلیل دینامیک، بررسی رفتار مخزن و PMD در زمان پرتاب با حامل سایوز می‌باشد. با انجام صحه‌گذاری و مقایسه نتایج تحلیل سازه و دینامیک مخزن و PMD، تحلیل سوخت مخزن با توجه به رفتار سوخت در شرایط بدون گرانش و با گرانش ناچیز و در محدوده کاری صورت پذیرفته است.

در نهایت مخزن و سامانه مدیریت پیشرانه از نظر حجم سوخت ورودی از مخزن به سامانه مدیریت پیشرانه در مدت زمان شبیه‌سازی بهینه‌سازی شده است. بنابراین در این مقاله می‌توان طراحی جامع مخزن و سامانه مدیریت پیشرانه از نوع تجهیزات توده‌ساز و همچنین بهینه‌سازی سامانه مدیریت پیشرانه برای دستیابی به بیشینه دبی و بهینه‌سازی مخزن از نظر بیشینه فشار و کمینه ضریب اطمینان صورت پذیرفته است.

2- طراحی مخزن حمل پیشران

در این مقاله، طراحی مفهومی مخزن و سامانه مدیریت پیشرانه با حجم و ابعاد مشخص در نرم‌افزار سالیدورک ، مطابق "شکل 1" صورت پذیرفته است. قطر مخزن برابر 107 سانتی‌متر و ضریب اطمینان آزمون سازه مخزن در فشار 2.59 و 3.10 مگاپاسکال انتخاب شده است [17]. بعد از مشخص شدن و ترسیم ابعاد فیزیکی مخزن و سامانه مدیریت پیشران، جهت انجام کلیه مراحل پردازشی (انجام طراحی، طرح‌واره پیش پردازش، شبیه‌سازی سازه‌ای، دینامیکی و رفتار سوخت درون مخزن، انجام تحلیل و بهینه‌سازی نتایج و ترسیم‌های بهینه‌سازی) از نرم‌افزار انسیس استفاده شده است. سامانه مدیریت پیشرانه توده‌ساز انتخاب شده است که چهار پره بزرگ و چهار پایه نگهدارنده به مخزن سوخت را شامل می‌شود. سوخت از میان این پایه‌ها به داخل PMD برای نگهداری سوخت، هدایت می‌شود [18-19].

مدل‌سازی نهایی، تحلیل و شبیه‌سازی سامانه مدیریت پیشرانه به همراه سازه مخزن در مجموعه نرم‌افزار انسیس صورت پذیرفته است و شبکه‌بندی در ماژول شبکه نرم‌افزار انسیس و از شبکه‌های با ساختار چهارگوش و مکعبی استفاده شده است، شرایط شبیه‌سازی تحلیل سازه مخزن و PMD با توجه به شرایط کاری مناسب انتخاب شده است [17].

در این مقاله شرایط انتخاب شده برای تحلیل دینامیک مخزن و PMD از داده‌های حامل فضایی سایوز استفاده شده است. برای انجام تحلیل بر روی سوخت درون مخزن از ماژول فلوئنت 17 استفاده شده است. شرایط کلی انتخاب شده برای تحلیل: 1- الگوریتم استفاده برای شبیه‌سازی سیمپل سی، 2- شرایط مرزی در کنار دیواره ها درنظر گرفته نشده است، 3- جریان به صورت دوفازی درنظر گرفته شده (فاز مایع (هیدرازین)، فاز گاز (هلیوم)، 4- تنش سطحی بین دو فاز برابر 0.03 N/m، 5- گام زمانی برای محاسبات را برابر با 0.001 s در نظر گرفته شده است. محاسبات برای شبیه‌سازی ساختار مخزن و PMD به‌صورت سه‌بعدی و شبیه‌سازی سوخت درون مخزن به صورت دوبعدی انجام شده است. شبکه‌بندی‌ها برای تایید درستی نتایج و تعیین درصد خطا در اندازه شبکه‌های (شبکه) متفاوت برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

نمونه برش مخزن برای شبیه سازی و تحلیل اولیه سازه مخزن در شکل 2 و نمونه انتخاب شده برای تحلیل و شبیه‌سازی نهایی در "شکل 3" نشان داده شده است. نمونه مخزن و PMD برای انجام تحلیل و شبیه‌سازی

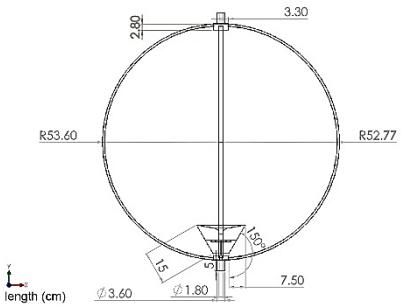

Fig. 1 Fuel tank with Propellant Management Device (PMD)

شکل 1 مخزن سوخت به همراه سامانه مدیریت پیشرانه (PMD)

دینامیک به ترتیب در "شکل 4" و "شکل 5" نشان داده شده است. نمونه اولیه طراحی انجام شده برای تحلیل سوخت درون مخزن در "شکل 6" نشان داده شده است.

3- روش تحلیل عددی حجم سیال (VOF)

روش حجم سیال (VOF) شکل و مکان سطح آزاد پیشران را براساس کسر

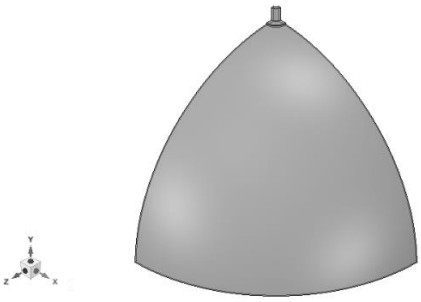

Fig. 2 Tank's 90 ° cross section for the primary structural analysis

شکل 2 برش 90 درجه‌ی مخزن برای تحلیل اولیه سازه مخزن

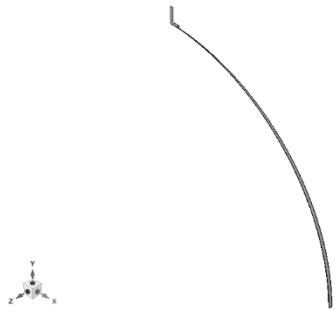

Fig. 3 Tank's 1 ° cross section for the final structural analysis

شکل 3 برش 1 درجه از مخزن برای تحلیل نهایی سازه مخزن

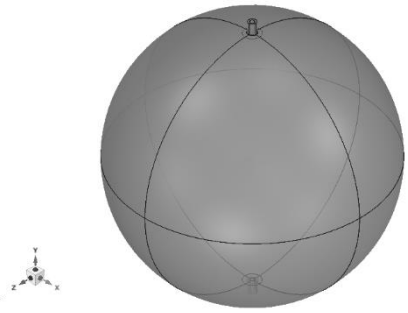

Fig. 4 Tank used to dynamic analysis

شکل 4 مخزن مورد استفاده در تحلیل دینامیک

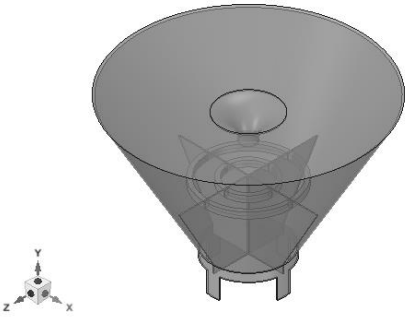

Fig. 5 PMD used to dynamic analysis

شکل 5 PMD مورد استفاده برای تحلیل دینامیک

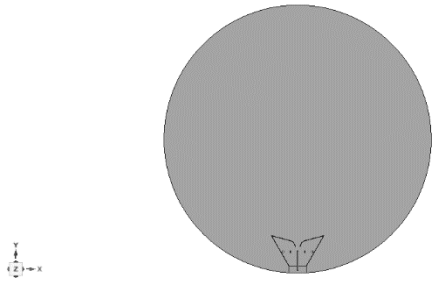

Fig. 6 Analysis Model for consideration of fuel treatment in tank and PMD

شکل 6 مدل تحلیل رفتار سوخت مخزن و تاثیر PMD

حجمی سیال تعیین می‌نماید. برای این منظور از معادلات پیوستگی و معادلات ممنتوم (اندازه‌حرکت) به ترتیب به‌صورت روابط (1) و (4) استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S \qquad (1)$$

پارامترها در رابطه فوق عبارتند از: S، جمله چشمه، ρ، چگالی سیال، u_i، سرعت متوسط جرم می‌باشند. در یک سیستم دو فاز، در صورتی که فازها را با اندیس یک و دو نمایش داده می‌شود، اگر کسر حجمی هر فاز دنبال شود، براساس چگالی کل به صورت زیر خواهد بود:

$$\rho = a_1\rho_1 + a_2\rho_2 = (1 - a_2)\rho_1 + a_2\rho_2 \qquad (2)$$

در رابطه فوق، α کسر حجمی فاز می‌باشد. برای فاز اولیه، معادله کسر حجمی در معادلات حل نخواهد شد و فقط به صورت قید به صورت رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$a_1 + a_2 = 1 \qquad (3)$$

معادله ممنتوم به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho u_j + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho u_i u_j = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \rho g_j \qquad (4)$$

در رابطه (4)، t، زمان، g، شتاب جاذبه، μ ضریب ویسکوزیته سیال می‌باشند. برای اثر کشش سطحی نیز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial p}{\partial x_j} = -\sigma\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{1}{R}\right) \qquad (5)$$

در رابطه فوق: σ ضریب نیروی کشش سطحی، R شعاع مخزن می‌باشند. بنابراین معادله اندازه حرکت را می‌توان به رابطه زیر تبدیل نمود.

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho u_j + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho u_i u_j = \sigma\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{1}{R}\right) + \mu\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \rho g_j \qquad (6)$$

4- بهینه‌سازی پارامتری PMD

یکی از مطالعات انجام شده در این مقاله انجام بهینه‌سازی ورود سوخت از مخزن به PMD با استفاده از تنظیمات کنترل محاسباتی یکسان برای تمام مدل‌ها در زمان 0.6 ثانیه می‌باشد. این بهینه‌سازی به صورت دوبعدی بوده و نتیجه حاصل شده از آن شکل سه‌بعدی PMD بهینه‌سازی شده را به تصویر می‌کشد. پارامترها برای رسیدن به مدلی با راندمان بالا و بهینه را از پارامترهای طراحی PMD انتخاب شده است که در "شکل 7" کلیه این مقادیر و دامنه تغییرات آن نشان داده شده است. میزان تغییر پارامترها و نتایج استخراج شده از این تغییرات در جدول 1 گرداوری شده است. نتایج حاصل از این بهینه‌سازی را می‌توان در "شکل 8" خلاصه کرد که دو نمونه

PMD را نشان می‌دهد، در سمت راست نمونه‌ای از PMD بهینه شده و با راندمان بالا و سمت چپ PMD با راندمان پایین، نتایج خروجی بررسی شده برای بهینه‌سازی شامل افزایش نرخ جریان جرمی، نرخ جریان حجمی و نرخ جریان در واحد زمان می‌باشد. نتایج PMD بهینه‌سازی شده در جدول 2 براساس میزان کوچک کردن اندازه شبکه نمایش داده شده است و نمودار نرخ جریان آن در "شکل 9" قابل مشاهده می‌باشد. بر همین مبنا در جدول 3 و "شکل 10" نتایج PMD با راندمان پایین نشان داده شده است. در جدول 4 و "شکل 11" مقایسه با اندازه شبکه 0.2 میلی‌متر، میان گزینه با راندمان بالا و گزینه با راندمان پایین انجام و نشان داده شده است.

5- ارزیابی نتایج تحلیل عددی

تحلیل سازه مخزن برای دستیابی به کمینه وزن نسبت به ضریب اطمینان

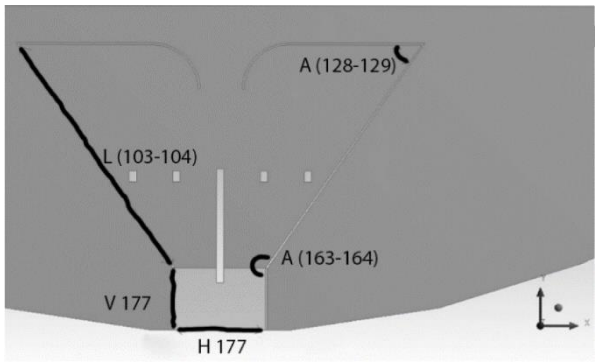

Fig. 7 Parameters used to PMD optimization

شکل 7 پارامترهای مورد استفاده در بهینه‌سازی PMD

جدول 1 مقایسه پارامترهای طراحی

Table 1 Comparison of design parameters

Mesh 0.4 mm				
Mass Flow Rate (kg/s)	Volumetric Flow Rate (m3/s)	Length (mm)	Figure 7's parameters (deg)	Time (s)
0.04733154	4.6816558e-05	5		
0.023344149	2.3090157e-05	6	H177	
0.019580824	1.9367778e-05	7		
0.073383985	7.2585544e-05	4		
0.063901753	6.3206482e-05	3	V177	
0.036506833	3.6109627e-05	2		
0.019475649	1.9263748e-05	16		
0.023647218	2.3389929e-05	15	L103/104	0.6
0.10139638	0.00010029315	14		
0.045959163	4.5459113e-05	150		
-0.003552022	-3.5133749e-06	145	A163/164	
-0.050174108	-4.9628198e-05	140		
0.041857853	4.1402426e-05	55		
0.057103532	5.6482228e-05	50	A128/129	
0.042267308	4.1807426e-05	45		

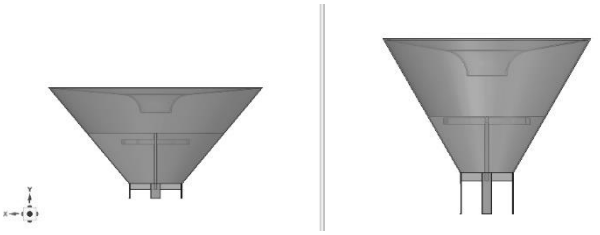

Fig. 8 The optimum and non-optimum (worst case) configurations in right and left hands, respectively

شکل 8 طرح‌واره بهینه در سمت راست و حالت غیربهینه (بدترین شرایط) در سمت چپ

جدول 2 نتایج حالت بهینه

Table 2 The optimum results

Flow Rate kg/s		
Max Value	End Value	اندازه شبکه (mm)
0.3395	0.0877	0.2
0.3375	0.0802	0.4
0.3564	0.0497	0.6

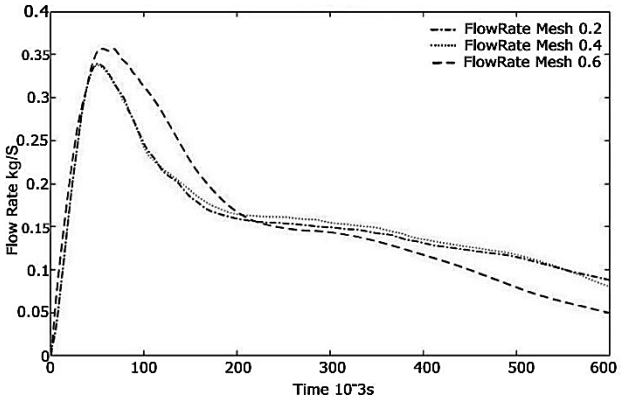

Fig. 9 optimum mass flow rate in optimum design

شکل 9 دبی جرمی خروجی در طراح بهینه

جدول 3 نتایج بدترین حالت

Table 3 worst case results

Flow Rate kg/s		
Max Value	End Value	اندازه شبکه (mm)
0.1805	-0.0059	0.2
0.2074	-0.0523	0.4
0.2092	-0.0559	0.6

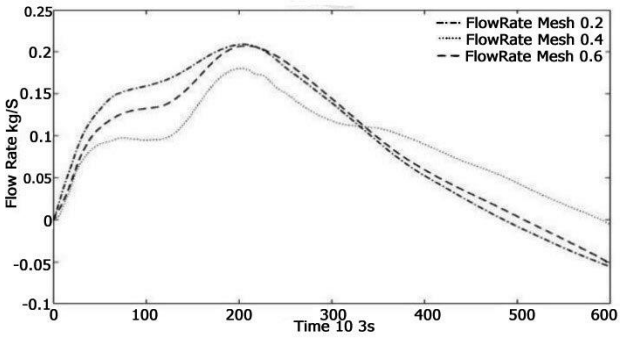

Fig. 10 Mass flow rate in worst case design

شکل 10 دبی جرمی خروجی بدترین حالت طراحی

جدول 4 مقایسه نتایج بین حالت بهینه و بدترین

Table 4 comparison of the optimum and worst case results

Flow Rate kg/s		
Max Value	End Value	نوع طراحی
0.3395	0.0877	طراحی بهینه
0.1806	-0.0059	طراحی بد

موردنظر می‌باشد. در این‌جا جنس مخزن، از آلیاژ تیتانیوم و ضخامت پوسته مخزن برابر 1.45 میلی‌متر به ترتیب انتخاب و محاسبه و نتایج آن در ادامه آورده شده است. نتایج ارائه شده برای سازه شامل، کمینه ضریب اطمینان، بیشینه و کمینه تنش معادل و بیشینه و کمینه تغییر طول برای مخزن و PMD می‌باشد. نتایج مخزن در جدول 5 و نتایج PMD در جدول 6 ارائه شده است. برای تایید نتایج خروجی از روش کاهش اندازه شبکه استفاده شده

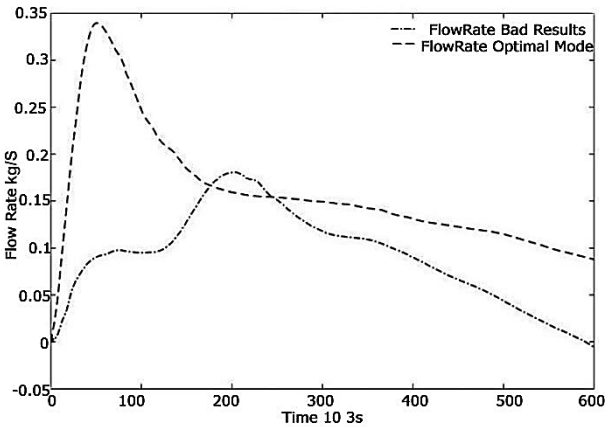

Fig. 11 Mass flow rate in optimum and worst case

شکل 11 تغییرات دبی جرمی خروجی حالت بهینه و بدترین حالت

و نسبت تغییر انداز شبکه برای انجام محاسبات سازه و مقایسه بین آن‌ها با اندازه شبکه میان مقادیر 0.3 و 0.21 و 0.17 و 0.14 میلی‌متر برای مخزن و اندازه شبکه 3 و 2 و 1 میلی‌متر برای PMD انجام شده است. دمای انجام محاسبات مقدار 40 درجه سانتی‌گراد که در محدوده مجاز و کاری مخزن می‌باشد. فشار محاسبات دو مقدار 3.10 و 2.59 مگاپاسکال، انتخاب شده است.[17]

تحلیل دینامیک برای طراحی بهینه مخزن و PMD نسبت به بارها و ارتعاشات وارد شده در زمان انتقال به محل پرتاب و زمان پرتاب یا انتقال به مدار موردنظر می‌باشد. نتایج ارائه شده در این قسمت برای مخزن و PMD شامل ارتعاشات طبیعی می‌باشد که در طراحی همیشه به عنوان اولین تحلیل از تحلیل‌های دینامیکی است که انجام می‌پذیرد. تحلیل ارتعاشات تصادفی و ارتعاشات هارمونیک دو مورد دیگر هستند که مناسب می‌باشند. نتایج تحلیل دینامیک مخزن در جدول 7 و نتایج تحلیل PMD در جدول 8 ارائه شده است. دمای محاسبات در محدوده مجاز کاری و 22 درجه سانتی‌گراد انتخاب است. نتایج خروجی آن شامل، 1- تغییر طول، 2- تنش معادل در محدوده فرکانسی، 3- فرکانس بیشینه تغییر طول می‌باشد.

تحلیل سوخت مخزن به طور جداگانه از بخش 4 و با حجم 5 درصد در شرایط بدون گرانش و در زمان 12 ثانیه انجام شده است. نتایج تحلیل در شرایط مختلف همانند تغییر فشار مخزن، تغییر مقدار گرانش در جهت های متفاوت و تغییر زاویه بین سوخت و گاز در کنار دیواره ها در جدول 9 ارائه شده است. در "شکل 12" موقعیت سوخت و گاز قبل از تحلیل نسبت به یکدیگر نشان داده شده و در "شکل 13" تغییرات انجام شده پس از تحلیل در زمان 12 ثانیه نشان داده شده است [18]. در "شکل 14" نمودار سرعت حجمی ورود سوخت به PMD را در زمان 12 ثانیه نشان داده شده است [19].

در نهایت طراحی سه بعدی نهایی مخزن و PMD در "شکل 15" و "شکل 16" مشاهده می‌شوند.

صحه‌گذاری و تایید نتایج در "شکل 17" نشان داده شده است. اختلاف نتایج در این شکل (نمودار طراحی حاضر و نتایج مرجع [19])، خطای قابل قبول را نشان می‌دهد. در این مقاله سعی شده شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با تنظیمات یکسان نرم‌افزاری انجام شود. البته شایان ذکر است که با توجه به عدم ارائه مشخصات هندسی سامانه مدیریت پیشرانه و عدم دسترسی به مشخصات مخزن، از خطای موجود در نتایج می‌توان صرف‌نظر نمود.

جدول 5 نتایج تحلیل سازه مخزن

Table 5 Structural analysis results

	فشار				دما
	2.59 MPa		3.10 MPa		C 40
	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	شبکه mm	*****
ضریب اطمینان	*	1.2948	*	1.5497	0.3	
	*	1.2791	*	1.5310	0.21	
	*	1.2673	*	1.5169	0.17	
	*	1.2624	*	15110	0.14	
تنش معادل MPa	718.27	0.7516	600.10	0.6280	0.3	
	727.08	0.7526	607.46	0.5288	0.21	
	733.84	0.7530	613.11	0.6291	0.17	
	736.67	0.7514	615.48	0.6278	0.14	
تغییر طول mm	2.0795	1.2173	1.7374	1.0171	0.3	
	2.1703	1.3091	1.7373	1.0172	0.21	
	2.1703	1.3091	1.7373	1.0173	0.17	
	2.0794	1.2176	1.7373	1.0173	0.14	

جدول 6 نتایج تحلیل سازه PMD

Table 6 PMD's structural analysis results

	فشار		دما
	3.10 MPa		40 C
	کمینه	بیشینه	شبکه mm	*****
ضریب اطمینان	> 10	*	3	
	> 10	*	2	
	> 10	*	1	
تنش معادل MPa	3.7528 e-007	1.977	3	
	0	1.7524	2	
	4.5524 e-008	1.9955	1	
تغییر طول mm	0	1.7545 e-003	3	
	0	1.7528 e-003	2	
	0	1.7525 e-003	1	

جدول 7 تحلیل دینامیکی مخزن

Table 7 Tank's dynamic analysis

			22 C		دما
			*****	فرکانس Hz	کمینه	بیشینه
فرکانس طبیعی	محوری			80.273	0.00076315	6.5349
	جانبی		تغییر طول mm	25.584	2.7752 e- 05	7.8594
ارتعاشات هارمونیک	X			100	3.1698e-008	3.366e-004
				40.6	- 1.2978e-003	1.3973e-003
			تنش معادل MPa	100	2.2219e-007	7.9756e-002
					2.6095e-010	8.404e-004
	Y		تغییر طول mm	80.2	1.9164e-007	1.1233e-005
					- 1.3997e-007	6.8443e-004
	Z		تغییر طول mm	100	1.8234e-010	1.0599e-006
			تنش معادل MPa		2.2169e-010	2.2878e-004
			تغییر طول mm	40.6	0.0	4.9945e-005
ارتعاشات تصادفی	Y		تغییر طول mm	***	0.0	1.2734
			تنش معادل MPa		1.7074e-004	378.47
	X		تغییر طول mm		0.0	2.3467
			تنش معادل MPa		3.6797e-004	553.93
	Z		تغییر طول mm		0.0	2.3473
			تنش معادل MPa		3.9641e-004	551.69

جدول 8 نتایج تحلیل دینامیک PMD

Table 8 PMD's dynamic analysis results

دما		22 C				
		*****	فرکانس Hz	کمینه	بیشینه
فرکانس طبیعی	محوری		521.3	0.86518	63.898
	جانبی	تغییرطول mm	180.6	7.8083 e- 003	63.263
			100	0.0	1.7547 e- 003
	X		10.9	- 1.0028e-003	1.003e-003
ارتعاشات هارمونیک		تنش معادل MPa		1.2344 e- 004	7.0427 e- 003
				5.6722e-006	1.6993
	Y	تغییرطول mm	100	0.00	1.7547e-003
				0.00	1.4383e- 003
		تغییر طول mm		0.00	1.7547e-003
	Z	تنش معادل MPa		5.7404e-006	1.6993
		تغییر طول mm	10.9	-1.0026 e-003	1.0031e- 003
	Y	تغییر طول mm		5.1998 e- 002	0.0
		تنش معادل MPa		9.0181	7.6137e-004
ارتعااشات تصادفی	X	تغییر طول mm	***	4.3511 e- 002	0.0
		تنش معادل MPa		72.836	9.068 e- 003
	Z	تغییر طول mm		4.3543 e- 002	0.0
		تنش معادل MPa		70.017	1.275 e- 002

جدول 9 نتایج تحلیل PMD در زمان 12 ثانیه

Table 9 results of PMD Analysis at 12 seconds

دما	15 C	زمان	12 S	فشار	2.07 MPa
	جرم سرعت حجمی				(kg/s)
	گرانش		بدون گرانش		0.10830
	Y-		0.001		0.10807
	X-		0.001		0.10855
	فشار		2.59MPa		0.10860
زاویه بین دو فاز در کنار دیواره ها			0.5		0.10824
			0.17		0.10315
			0.21		0.09675

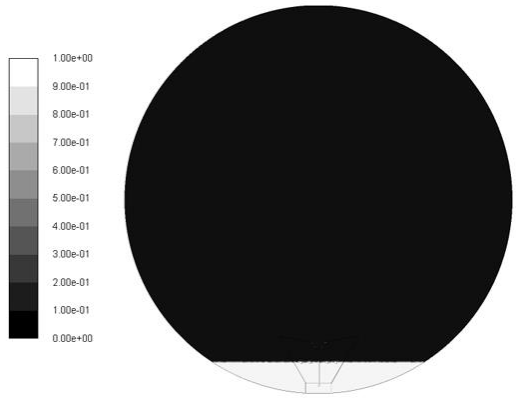

Fig. 12 Fuel and gas position towards each other at the time of 0 seconds

شکل 12 موقعیت سوخت و گاز نسبت به یکدیگر در زمان 0 ثانیه

6- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله مخزن به همراه PMD طراحی و مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. شرایط انتخابی برای تحلیل و بهینه‌سازی با توجه به شرایط محیط کاری در فضای بدون گرانش و با توجه به گرانش ناچیز انجام شده است. در غیاب

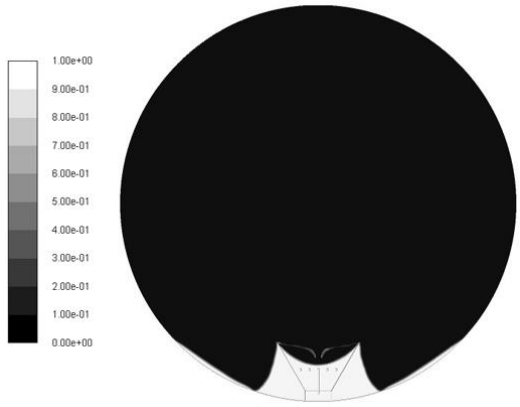

Fig. 13 Fuel motion analysis results in PMD after the time of 12 seconds

شکل 13 نتایج تحلیل سوخت در PMD بعد از زمان 12 ثانیه

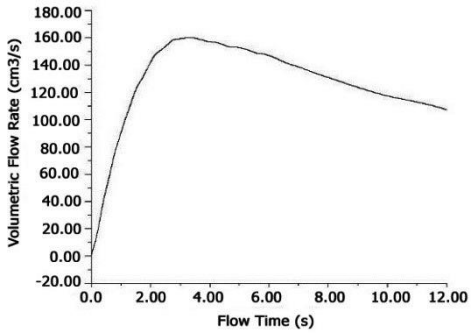

Fig. 14 variation of volumetric flow rate for fuel entrance to PMD

شکل 14 تغییرات سرعت حجمیz ورود سوخت به PMD

Fig. 15 Final tank and PMD schematic

شکل 15 طرحواره نهایی مخزن و PMD

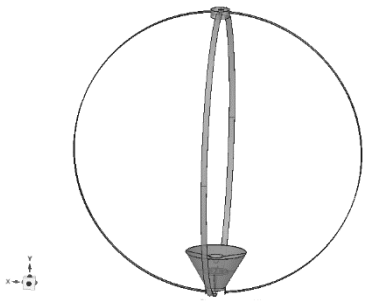

Fig. 16 Final PMD schematic in the tank

شکل 16 طرحواره نهایی PMD نصب شده در مخزن

نیروی گرانش، نیروی تنش سطحی مقدار قابل توجهی می‌باشد و با آن

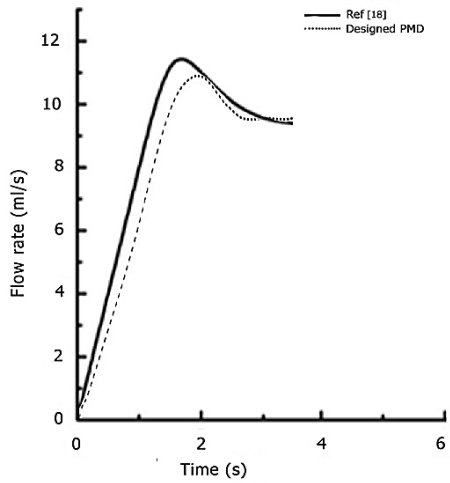

Fig. 17 PMD Performance Comparison and Verification

شکل 17 مقایسه و تایید عملکرد PMD

می‌توان تا اندازه بسیار زیادی حرکت سوخت درون مخزن را کنترل نمود. در این شبیه‌سازی سوخت در مخزن بر روی دیواره‌های مخزن حرکت می کند و از دهانه خروجی مخزن دور می‌شود. با نصب PMD در دهانه خروجی حرکت و دور شدن سوخت از دهانه خروجی کنترل شده است که باعث ورود سوخت به PMD می‌شود. بهینه‌سازی پارامتری انجام شده باعث می‌شود ورود مولفه‌های سوخت به PMD به بالاترین مقدار افزایش یابد. سازه مخزن با توجه به نسبت کمینه وزن به ضریب اطمینان بهینه‌سازی شده است و نتایج آن در جداول 5 و 6 آورده شده است. ورودی‌های بارهای تحلیل و شبیه‌ساز دینامیکی مخزن و PMD براساس مقادیر بارهای حامل فضایی سایوز صورت پذیرفته است و نتایج آن نیز به ترتیب در جداول 7 و 8 آورده شده است. تحلیل سوخت در مخزن با توجه به شرایط دو فاز در "شکل 12" نسبت به یکدیگر انجام شده است و نتایج تحلیل حرکت سوخت درون مخزن در مدت زمان 12 ثانیه در "شکل 13" و نمودار سرعت حجمی ورود سوخت به PMD در "شکل 14" نشان داده شده است. بهینه‌سازی ورود سوخت به مخزن با توجه به تغییر پارامتری در سازه PMD انجام شده است و تغییر پارامترهای طراحی PMD در "شکل 7" نشان داده شده است. تاثیر تغییر هر یک از این پارامترها بر میزان ورود مولفه سوخت (نرخ انتقال حجم، نرخ انتقال جرم) به PMD در جدول 1 نشان داده شده است. مبنای بهینه‌سازی انجام شده در این مقاله افزایش ورود مولفه سوخت (نرخ انتقال حجم، نرخ انتقال جرم) به داخل PMD می‌باشد. پارامترهای ورودی مولفه‌های سوخت از مخزن به PMD که نشان‌دهنده بهینه‌سازی انجام شده می‌باشد با نرم افزار Ansys مورد بررسی قرار گرفته‌اند که شامل، (1- نرخ انتقال جرم، 2- نرخ انتقال حجم، 3- نمودار نرخ جریان) سوخت در زمان شبیه‌سازی می‌باشد. دو ساختار متفاوت PMD معرفی و در "شکل 8" نشان داده شده است و نتایج بهینه‌سازی طراحی پارامتری با اندازه‌های شبکه (0.2,0.4,0.6) میلیمتر در جدول 2 و نمودار نرخ انتقال جریان سوخت به PMD در "شکل 9" نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده حالت بد و با بازده پایین با اندازه‌های شبکه (0.2,0.4,0.6) میلی‌متر در جدول 3 و نمودار نرخ جریان در زمان شبیه‌سازی در "شکل 10" نشان داده شده است. مقایسه بین دو طراحی بهینه‌سازی شده و با بازده بالا از نظر ورود حجم سوخت به PMD و طراحی با بازده پایین یا دارای کمترین مقدار ورود حجم سوخت به PMD که تصویر آن در "شکل 8" نشان داده شده است، با اندازه‌های شبکه 0.2 میلی متر انجام شده و نتایج بالاترین نرخ انتقال جریان از مخزن به PMD و نرخ جریان ورودی به PMD در پایان زمان شبیه‌سازی در جدول 4 و نمودار نرخ انتقال جریان به PMD در زمان شبیه‌سازی در "شکل 11" مقایسه نشان داده شده است. طراحی سه‌بعدی از مخزن و PMD بهینه‌سازی شده در "شکل 15" و "شکل 16" ارائه شده است و صحه‌گذاری شبیه‌سازی با توجه به بهینه‌سازی انجام شده در مرجع [18] انجام شده است و در "شکل 17" دبی جرمی خروجی نتایج قابل مقایسه و مشاهده می‌باشد.

7- فهرست مراجع

[1] D. E .Jaekle, Propellant management device conceptual design and analysis: Vanes, *27th AIAA/SAE/ASME/ASEE, Joint Propulsion Conference*, Sacramento, California, June 24-26, 1991.
[2] D. E .Jaekle, Propellant management device conceptual design and analysis: Sponges, *29th AIAA/SAE/ASME/ASEE, Joint Propulsion Conference*, Montery, California, June 28-30, 1993.
[3] D. E .Jaekle, Propellant management device conceptual design and analysis: Galleries, *33rd AIAA/SAE/ASME/ASEE, Joint Propulsion Conference*, Montery, California, June 28-30, 1997.
[4] D. E. Jaekle, Propellant management device conceptual design and analysis: Traps and troughs, *31st AIAA/SAE/ASME/ASEE, Joint Propulsion Conference*, San Diego, California, June 10-12, 1995.
[5] W. D .Tam, J .Jaekle, Design and manufacture of an oxidizer tank with surface tension PMD, *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Arizona, United States, July 10-13, 2005.
[6] W. H .Tam, I. Ballinger, D. E. Jaekle, Conceptual design of space efficient tanks, *42nd AIAA Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Sacramento, California, July 9-12, 2006.
[7] W. H .Tam, I. Ballinger, Surface tension PMD tank for on orbit fluid transfer, *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. & Exhibit*, Hartford, Connecticut, July 21-23, 2008.
[8] Y. K. Chen, S. H. Collicott, Experimental study on the capillary flow in the vane-wall gap geometry, *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, Jan 5-8, 2004.
[9] R. H. Estes, 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, July 30 –Aug, 01, 2012.
[10] B. Lenahen, A Bernier, S. Gangadharan, A computational investigation for determining the natural frequencies and damping effects of diaphragm implemented spacecraft propellant tanks, *48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Atlanta, Georgia, July 30 - Aug 01, 2012.
[11] W. H .Tam, M. Hersh, I. Ballinger, Hybrid propellant tanks for spacecraft and launch vehicles, *39th AIAA Propulsion Conference*, Alabama, United States, 2003.
[12] W. Tam, S. Wiley, K. Dommer, L. Mosher, D. Persons, Design and manufacture of the messenger propellant tank assembly, *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Indiana, United States, July 7-10, 2002.
[13] G. Kawahara, S. McCleskey, Titanium-Lined, Carbon Composite Overwrapped Pressure Vessel, *32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE, Joint Propulsion Conference*, Lake Buena Vista, July 1-3, 1996.
[14] W. Tam, I. Ballinger, J. Kuo, W. Lay, S. McCleskey, P. Morales, Z. Taylor, S. Epstein, Design and manufacture of a composite overwrapped xenon conical pressure vessel, *32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Lake Buena Vista, FL, July 1-3, 1996.
[15] W. Tam, A. Jackson, E. Nishida, Y. Kasai, A. Tsujihata, K. Kajiwara, Design and manufacture of the ETS VIII xenon tank, *36thAIAA/ASME/SAE/ASEE, Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Alabama, United States, July 17-19, 2000.
[16] W. Tam, P. Griffin, A. Jackson, Design and manufacture of a composite overwrapped pressurant tank assembly, *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. & Exhibit*, Indiana, United States, July 7-10, 2002.
[17] Tam. W, Ballinger. I, Propellant tank with surface tension PMD for tight center-of-mass propellant control, *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. & Exhibit*, Hartford, Connecticut, July 21-23, 2008.
[18] J. T. Liu, C. Zhou, Y. L. Wu, B. T. Zhuang, Y. Li, Numerical investigation of performance of vane-type propellant management device by VOF methods, *International Symposium of Cavitation and Multiphase Flow*, 18-21, Beijing, China, October, 2014.
[19] Q. Hu, Y. Li, H. L. Pan, J. T Liu, B. T Zhuang, Numerical analysis and experiment research on fluid orbital performance of vane type propellant management device, *International Symposium of Cavitation and Multiphase Flow*, 18-21, Beijing, China, October, 2014.
[20] Y. Alhendal, A. Turan, W. Aly, VOF simulation of marangoni flow of gas bubbles in 2D-axisymmetric column, *International Conference on Computational Science, University of* Amsterdam, The Netherlands, May 31 - June 2, 2010.
[21] D. Sances, E. Riddle, S. Gangadharan, J. Sudermann, B. Marsell, 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, Apr. 12, 2010.

[22] M. Brandon, G. Sathya, C. Yadira, S. James, S. Keith, R. James, *A CFD approach to modeling spacecraft fuel slosh*, *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Orlando, Florida, Jan 5-8, 2009.

[23] W. Tam, P. Griffin, Design and manufacture of a composite overwrapped pressurant tank assembly, *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit Joint Propulsion Conferences*, Indianapolis, Indiana, July 7-10, 2002.

[24] J. Benton, I. Ballinger, A. Ferretti, N. Ierardo, Design & manufacture of a high performance high mass efficient gas tank for the vega avum, *43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit Joint Propulsion Conferences*, July, 2007.

[25] M. Ayub, Z. Ahmer, S. Khan, M. Shah, Mechanical behavior characterization of aluminium based honey comb structure by optimized modeling and numerical simulations, *Journal of Space Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 26-33, 2011.

[26] H. Khan, A. Israr, Design, Modeling and analysis of low earth orbit satellite, *The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Krabi, Thailand, October 19-21, 2011.

[27] Kreppel, Samantha, Investigation of propellant sloshing and zero gravity equilibrium for the orion service module propellant tanks, *38th COSPAR Scientific Assembly*, Bremen, Germany, July 18-15, 2010.

[28] Liu. Xiaolin, Y. Huang, Li. Guangyu, CFD simulation of capillary rise of liquid in cylindrical container with lateral vanes, *Sixth International Symposium on Physics of Fluids (ISPF6) International Journal of Modern Physics Conference Series*, Vol. 42, pp. 745-756, 2016.

[29] R. Malekfa, A. Cherag, G Ahmadi, Computational simulation of marangoni convection under microgravity condition, *Scientia Iranica Transaction B:Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 513-524, 2009.

[30] A. Brakke, The surface evolver, *Experimental Mathematics*, Vol. 1, No. 2, pp. 141-165, 1992.

[31] E. Perez, *Soyuz at the guiana space centre user's manual*, *Issue 2 Revision 0*, March, 2012.