

Heat Transfer Analysis of a Catalytic Monopropellant Thruster Under the Influence of Wall Thickness

Mohammad Reza Salimi¹, Hadiseh Karimaei^{2*}

^{1,2} Aerospace Research Institute, Ministry of Science Research and Technology

ABSTRACT

Thermal control of a space system is essential for optimal performance and mission success. In this paper, the decomposition chamber of a catalytic monopropellant thruster has been numerically simulated at the pore scale. The effect of this wall thickness, 1-5 mm, on radiation heat transfer and conduction has been investigated. The importance of the maximum temperature in the structural considerations of the thruster, on the one hand, and the increase in the weight of the thruster due to the increase in the thickness of the wall to reduce the maximum temperature on the other hand, make the simultaneous evaluation of these parameters inevitable. The results showed that as the thickness of the wall increases, a significant drop up to about three times in the radiation heat flux has occurred. The dominant type of heat transfer in the current problem is conduction. The heat soak back upstream is up to 1000 times greater than the intensity of radiative heat transfer. Increasing the thickness of the wall causes an increase in the heat soak back on the thermal control system. The novelty is to investigate the geometric shape and wall thickness of a catalytic monopropellant thruster on the rate of radiation and conduction heat transfer to the upstream parts.

KEYWORDS

Monopropellant thruster, Catalyst bed, Conduction, Radiation, Thermal control system (TCS).

*Corresponding Author E-mail: karimaei@ari.ac.ir

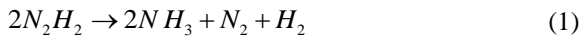
1. Introduction

Kersten [1] created a numerical model to investigate the steady-state and transient behavior of the catalyst bed and developed a computer program based on it. In the research of Shankar et al. [2], the equations related to the propellant decomposition were analyzed transiently. Hwang et al. [3] studied the effects of the failure of catalyst bed granules on the performance of a hydrazine thruster using Shankar et al.'s [2] analytical model for the induction region and Kersten's one-dimensional model [1] for the post-induction region. Salimi et al. [4-5] investigated the effects of parameters such as catalyst granule diameter, catalyst bed porosity coefficient, and chamber inlet pressure on the performance of the decomposition chamber and thruster.

In this paper, the decomposition chamber of a hydrazine monopropellant thruster has been numerically simulated at the pore scale. Then, the heat transfer analysis of the thruster under the influence of its wall thickness has been investigated. Simulations have been performed for catalyst granules with a diameter of 1 mm in a porosity coefficient of 0.4 and an inlet pressure of the chamber of 15 bar. The focus of the present research is the study of the effect of the thruster wall thickness on the radiation heat transfer (radiative cooling) and heat soak back (heat conduction) to the upstream components of the propulsion system such as control valves and sensors, which is considered to be its most important innovative aspect.

2. Methodology

The catalytic decomposition process of hydrazine in a monopropellant thruster can be ideally considered to consist of two main reactions, ignoring intermediate reactions. In the first reaction, gaseous hydrazine is decomposed into ammonia, nitrogen, and hydrogen gases through a very rapid and highly exothermic reaction according to equation (1). In the second reaction, the ammonia gas resulting from the hydrazine decomposition is decomposed into nitrogen and hydrogen gases through an endothermic reaction according to equation (2).



The conservative form of the Navier-Stokes equations [4] is given below:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + F_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i Y_k)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{Sc} \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial h}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{1}{Sc} + \frac{1}{Pr} \right) \sum_{k=1}^N h_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

where Pr is the Prandtl number and Sc is the Schmidt number. τ is the shear stress and u is the velocity. The reaction rate is also calculated using the Arrhenius law.

The chemical species transport equations are analyzed for N-1 chemical species to ensure mass conservation. It is assumed that the chemical reactions take place entirely in the vicinity of the catalyst surface. Due to the very low permeability coefficient of the catalyst granules, mass and heat transfer in the catalyst granule volume are neglected. The simulation was performed for a 10 N thruster with a catalyst bed containing alumina-based catalyst granules coated with active iridium.

Figure 1 shows the entire catalyst bed and a view of the computational mesh created around the catalyst granules.

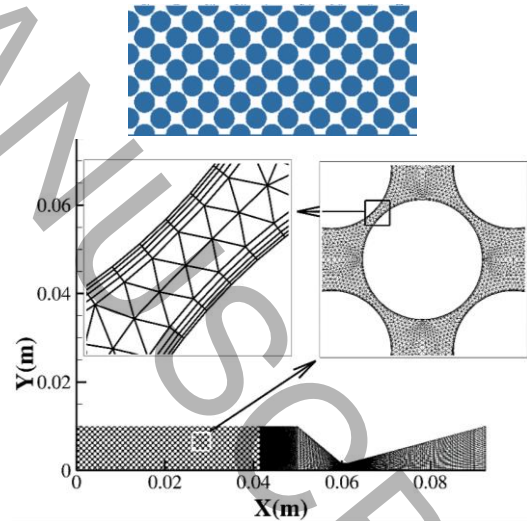


Figure 1. Mesh view around catalyst granules

The 5 cases under study differ in terms of wall thickness, mass, thermal conductivity surface area, and radiation surface area, which are named from cases 1 to 5 according to the wall thickness of 1 to 5 mm.

3. Results and Discussion

Some of the various performance parameters of the thruster include the mass fraction of hydrazine and other

chemical species, the temperature in the entire thruster, bed, and outer wall, and the pressure and fluid velocity variations that are the outputs of this analysis. The only heat transfer mechanism in the lateral wall of the thruster is the radiation heat transfer. Figure 2 shows the rate of the radiation heat flux from the lateral surface of the thruster. The maximum heat flux occurred at the end of the decomposition chamber. With increasing shell thickness, due to the decrease in wall temperature and also the dependence of radiation heat flux on the fourth power of the wall temperature, a significant drop in heat flux (radiative heat transfer) of up to three times has occurred.

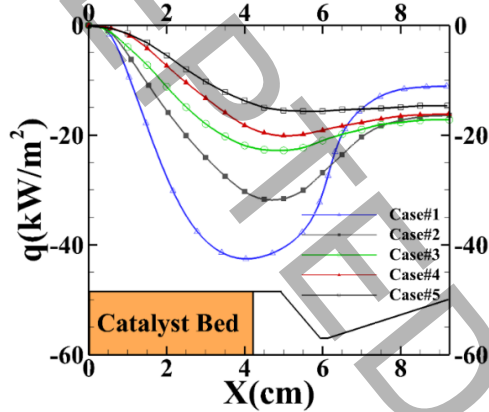


Figure 2. The rate of radiation heat flux from the lateral surface of the thruster in the 5 cases under study

Figure 3 shows the conduction heat flux rate from the shell to the constant temperature heat sink. The decrease in conduction heat flux occurs as the shell thickness increases. The values on the left vertical axis are the rate of heat flux soaking back upstream. The amount of heat soaking back upstream is 1000 times larger than the intensity of radiative heat transfer. Therefore, the dominant type of heat transfer in the present problem is conduction with heat soaking back upstream.

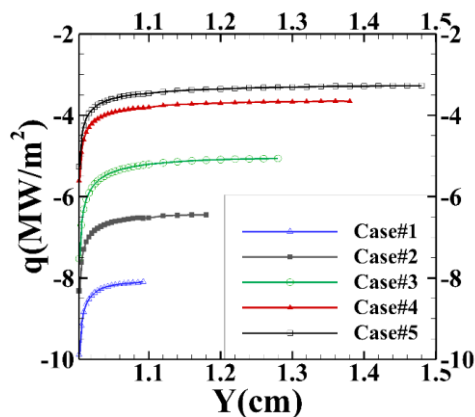


Figure 3. The rate of conductive heat flux from the shell to the constant temperature heat sink in the radial direction

Figure 4 shows the average area temperature of the discharge chamber wall and nozzle compared with the

decomposition chamber wall for all cases under study. Investigation of the graphs in all cases under study indicates that the average temperature of the nozzle section including the discharge chamber and nozzle is higher than that of the decomposition chamber. Although the reactions occurred in the decomposition chamber, the temperature of the discharge chamber and the nozzle is higher because the heat flux from the decomposition chamber was soaking back upstream through conduction heat transfer.

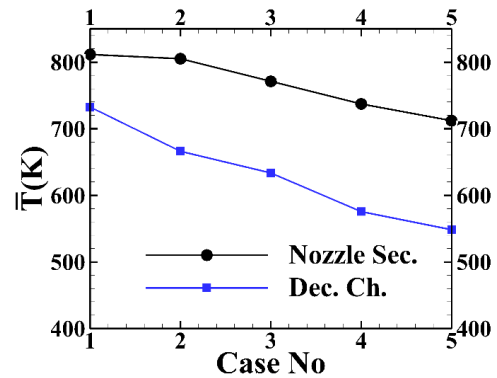


Figure 4. Comparison of the averaged area temperature of nozzle section with the decomposition chamber wall

4. Conclusions

The results showed that the variations in the shell temperature relative to the flow in these 5 cases under study are noticeable due to the effect of heat transfer. The dominant type of heat transfer in the current problem is conduction with heat soaking back upstream so that the amount of heat soaking back upstream is 1000 times larger than the intensity of radiative heat transfer. The discussion concludes that to control the maximum temperature and subsequently control the heat soaking back upstream, an intermediate condition must be met that satisfies the weight constraint. Thickening the nozzle wall is not a desirable solution. Increasing the shell thickness increases the weight of the thruster, which is a limiting factor.

5. References

- [1] A.S. Kersten, Analytical Study of Catalytic Reactors for Hydrazine Decomposition, Technical Rep., NASA UARL G., (1969), 7-458.
- [2] V. Shankar, A.K. Anantha Ram, K. A. Bhaskaran, Prediction of the Concentration of Hydrazine Decomposition Products Along a Granular Catalytic Bed, *Acta Astronautica*, 11(6), (1984), 287-299.
- [3] CH. Hwang, S.N. Lee, S.W. Baek, C.Y. Han, S.K. Kim, M.J. Yu, Effects of Catalyst Bed Failure on Thermo Chemical Phenomena for a Hydrazine Monopropellant Thruster Using Ir/Al₂O₃ Catalysts, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51(15), (2012), 5382-5393.
- [4] M.R. Salimi, H. Karimaei, M. Gholampour Yazdi, Numerical Study of Catalyst Bed Performance of a Monopropellant Thruster Under Influence of Porosity Coefficient, *Amir Kabir Journal of Mechanical Engineering*, 54 (7), (2022), 1607-1622.
- [5] M.R. Salimi, H. Karimaei, M. Gholampour Yazdi, Numerical Modeling and Parametric Analysis of Performance of a Monopropellant Thruster Using a Single-Part Catalyst Bed Model, *Combustion Theory and Modelling*, 28(1), (2024), 36-64

تحلیل انتقال حرارت یک رانشگر تک مولفه کاتالیستی تحت تاثیر ضخامت دیواره

محمد رضا سلیمی^۱، حدیثه کریمائی^{۲*}

۱ و ۲- گروه علوم فضایی، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری

*نویسنده مسئول karimaei@ari.ac.ir

چکیده

کنترل حرارتی یک سامانه فضایی برای عملکرد بهینه و موفقیت در مأموریت ضروری است. در این مقاله، محفظه تجزیه یک رانشگر تک پیشراانه هیدرازینی، در مقیاس دانه‌های تشکیل دهنده بستر کاتالیستی، بصورت عددی شبیه‌سازی شده است و تاثیر ضخامت پوسته، از ۱ تا ۵ میلی‌متر، بر روی انتقال حرارت تشعشع، هدایت و توزیع دمای رانشگر و دیگر پارامترهای عملکردی رانشگر بررسی شده است. اهمیت بیشینه دما در ملاحظات سازه‌ای رانشگر از یک سو و افزایش وزن رانشگر در پی افزایش ضخامت پوسته با هدف کاهش بیشینه دما از سوی دیگر، ارزیابی همزمان این پارامترها را اجتناب ناپذیر می‌کند. نتایج نشان داد با افزایش ضخامت پوسته، افت چشمگیر شار حرارتی تشعشع تا حدود سه برابر اتفاق افتاده است. جنس انتقال حرارت غالب در مسئله فعلی، از نوع هدایتی می‌باشد. میزان حرارت نشت کرده هدایتی به بالادست، نسبت به شدت انتقال حرارت تشعشعی از مرتبه تا ۱۰۰۰ برابر بزرگتر است. در نتیجه از این منظر، افزایش ضخامت پوسته سبب افزایش بار مزاحم حرارتی بر روی سامانه کنترل حرارت به دلیل نشت حرارت می‌گردد. نوآوری تحقیق حاضر بررسی شکل هندسی و ضخامت دیواره رانشگر تک مولفه هیدرازینی شامل محفظه تجزیه و نازل، روی میزان انتقال حرارت تشعشع و هدایت به قطعات بالادست محفظه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: رانشگر تک پیشراانه، بستر کاتالیستی، انتقال حرارت هدایت، انتقال حرارت تشعشع، سامانه کنترل حرارت.

*Corresponding Author E-mail: karimaei@ari.ac.ir

اکثر فضاپیماها مانند راکت‌ها، ماهواره‌ها، کپسول‌های زیستی و کاوشگرهای فضایی دارای سامانه‌های پیشران‌ش کوچکی به منظور مانور مداری و کنترل وضعیت می‌باشند. از جمله این سامانه‌های پیشران‌ش، رانشگرهای تک‌پیشرانه می‌باشند که در آنها تک‌پیشرانه مایع بعد از خروج از مخزن توسط یک انژکتور روی بستر کاتالیستی تزریق می‌شود. تک‌پیشرانه با عبور از بستر کاتالیستی و طی یک واکنش گرمازا به محصولات داغ گازی شکل تجزیه شده و در نهایت، گازهای داغ حاصل از تجزیه تک‌پیشرانه، با عبور از یک نازل همگرا-واگرا نیروی تراست تولید می‌کنند.

اولین تحقیق جامع در مورد مدل محاسبه، روی رانشگرهای تک‌پیشرانه، توسط اشمیتز و همکارانش [1] انجام شد. آنها نه تنها تعداد زیادی داده تجربی برای رانشگر هیدرازینی با استفاده از کاتالیست شل^۱ ۴۰۵ به دست آوردند، بلکه فرمول‌هایی را نیز برای ارزیابی رفتار و پاسخ یک رانشگر تک‌پیشرانه استخراج کردند. در محاسبه آنها، جریان در بستر کاتالیستی، با معادله ارگونز^۲ مدل‌سازی شد. سپس کرستن [2-3] یک مدل عددی برای بررسی رفتار پایا و گذرای بستر کاتالیستی ایجاد و یک برنامه رایانه‌ای بر مبنای آن توسعه داد. در مدل او، انتقال جرم از جریان به سطح بیرونی دانه‌های کاتالیست و از سطح به داخل آنها لحاظ شده بود. همچنین، فرض شده بود که تعادل شیمیایی و ترمودینامیکی بین گاز و دانه‌های کاتالیست وجود نداشته و از این رو معادلات انتقال جرم و انرژی برای هر دو فاز گاز و جامد تحلیل شد. در تحقیقات شنکار و همکارانش [4]، معادلات مربوط به تجزیه تک‌پیشرانه در آن به صورت گذرا تحلیل می‌شدند. لازم به ذکر است که آنها با استفاده از این روش توانستند اثرات پارامترهایی نظیر فشار ورودی، محفظه تجزیه و بارگذاری بستر^۳ روی توزیع دما و گونه‌های شیمیایی را مدل‌سازی کنند. همچنین آنها از نتایج تجزیه و تحلیل عددی خود برای طراحی یک رانشگر ۱۰ نیوتنی استفاده کردند. هوانگ و همکارانش [5] با استفاده از مدل تحلیلی شنکار و همکارانش برای ناحیه القایی و مدل یک بعدی کرستن [3] برای ناحیه پسا القایی، اثرات تخریب شدن دانه‌های بستر کاتالیستی روی عملکرد یک رانشگر هیدرازینی را مطالعه کردند. سلیمی و کریمایی [6] ایجاد کاتالیزور و بستر کاتالیزوری برای تجزیه هیدرازین در رانشگرهای تک‌پیشرانه کم‌پیشران را بحث نمودند. همچنین مواد تشکیل‌دهنده کاتالیست، روش‌های ساخت کاتالیست و بستر کاتالیست، ملاحظات ساخت و الزامات و همچنین جانمایی آن را مورد بررسی قرار دادند. پاکدهی و همکارانش [7] اثر تجزیه آمونیاک در یک رانشگر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی، بر دمای محفظه تجزیه، وزن مولکولی محصولات گازی و ضربه ویژه را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آنها حاکی از این بود که افزایش نرخ تجزیه آمونیاک، منجر به کاهش دما، وزن مولکولی و ضربه ویژه می‌شود. یکی از کاربردهای آنالیز مقیاس حفره در کاتالیست‌ها مربوط به واکنش الکتروشیمیایی در پیل سوختی است که امروزه مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است که مراجع [8-9] از جمله آنهاست.

رودز و همکاران [10] یک سیستم نمونه اولیه تک‌مولفه‌ای پراکسید هیدروژن که به طور خاص برای ماهواره‌های کوچک طراحی شده است، با تمرکز ویژه بر عملکرد کاتالیزور و انتقال حرارت، به تفصیل شرح دادند. ثابت شد که انتقال حرارت با اثرات قابل توجهی بر دمای کاتالیزور و عملکرد کلی سیستم، نگرانی اصلی در سیستم است. در کار آنها مدل‌سازی المان محدود برای شناسایی مسیرهای حرارتی در طراحی و ایجاد بهبودهایی برای کاهش اتلاف حرارت محفظه کاتالیست استفاده شد. آستسیو و همکاران [11] یک حلگر برای مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی محفظه‌های کاتالیستی در رانشگرهای تک‌مولفه بر اساس نرم‌افزار اوپن‌فوم^۴ ارائه نمودند. آنها کدی توسعه دادند که جریان گاز واکنشی در محیط متخلخل را، با انتقال جرم و حرارت یکپارچه می‌کند. پروفیل دما با مطالعات تجربی و نظری موجود در ادبیات مطابقت داشت و کسر جرمی تفاوت‌هایی را نشان می‌داد. سان و همکاران [12] مطالعه‌ای بر روی موتورهای راکت تک‌مولفه‌ای غیر سمی، به ویژه موتورهایی که از هان^۵ استفاده می‌کنند، انجام دادند. آنها یک مدل ترکیبی پیشنهاد نمودند که با در نظر گرفتن تجزیه تک‌پیشرانه مایع و انتقال حرارت غیرتعادلی برای محاسبه یک موتور مبتنی بر رانش ۶۰ نیوتن پیاده شد. دینامیک فشار موتور رفتارهای حساس به دما را نشان می‌دهد که بر نرخ تجزیه و انبساط پیشرانه پس از خاموش شدن تأثیر می‌گذارد. یونگ و همکاران [13] با استفاده از مدل‌سازی تجزیه کاتالیزوری، یک بستر کاتالیزوری را برای پیشرانه تک‌مولفه‌ای آب اکسیژنه مقیاس کردند. آنها مدل توسعه یافته توسط پاسینی و همکاران [14] را بکار بردند. آنها مشاهده کردند که برآوردهای دما از مدل با داده‌های تجربی مطابقت دارد. آنها دریافتند که بستر کاتالیست را می‌توان با تحلیل ظرفیت کاتالیست و ثابت‌های افت فشار از طریق مدل‌سازی تجزیه کاتالیستی، مقیاس نمود. سلیمی و همکاران [۱۵-۱۷] محفظه تجزیه یک رانشگر هیدرازینی^۶ را به صورت عددی با یک مدل بستر کاتالیستی تک‌بخشی در

^۱ Shell405

^۲ Erguns

^۳ Bed loading

^۴ OpenFOAM®

^۵ HAAN

^۶ Hydrazine

مقیاس دانه‌های کاتالیست شبیه‌سازی نمودند. سپس تاثیر پارامترهایی مانند قطر گرانول کاتالیست، ضریب تخلخل بستر کاتالیستی و همچنین فشار ورودی محفظه بر عملکرد محفظه تجزیه و رانشگر را بررسی نمودند.

در مقاله حاضر، محفظه تجزیه یک رانشگر تک‌پیش‌رانه هیدرازینی، در مقیاس حفره یا دانه‌های تشکیل دهنده بستر کاتالیستی، بصورت عددی شبیه‌سازی شده است. سپس تحلیل انتقال حرارت رانشگر تحت تاثیر ضخامت دیواره آن مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، شبیه‌سازی‌ها برای دانه‌های کاتالیست با قطر ۱ میلی‌متر و با ضریب تخلخل ۰/۴ و فشار ورودی محفظه ۱۵ بار انجام گرفته است. در شبیه‌سازی در مقیاس حفره، هیچ مدل ساده شده‌ای وارد نمی‌شود و بنابراین از دقت بالایی برخوردار است. در یک فضایما، وظیفه سیستم کنترل حرارتی^۱ این است که تمام اجزای فضایما را در طول تمام مراحل مأموریت در بازه دمایی قابل قبولی نگه دارد. کنترل حرارتی برای عملکرد بهینه و موفقیت در مأموریت ضروری است، زیرا اگر یک قطعه در معرض دماهای خیلی بالا یا خیلی پایین قرار گیرد، ممکن است آسیب ببیند یا عملکرد آن به شدت تحت تاثیر قرار گیرد. کنترل حرارتی همچنین برای پایدار نگه داشتن اجزای حساس بالادستی در شرایط دمایی معین ضروری است تا اطمینان حاصل شود که آنها تا حد امکان کارآمد هستند. مهمترین ورودی سامانه کنترل حرارت در یک فضایما بارهای حرارتی مربوط به اجزای مختلف است که یکی از مهمترین آنها رانشگرها هستند. موضوع تحقیق حاضر تاثیر ضخامت دیواره رانشگر بر روی انتقال حرارت^۲ (خنک‌کاری تشعشع^۳) و نشت حرارت^۴ (هدایت^۵ حرارت) به قطعات بالادستی سامانه پیش‌رانش نظیر شیرهای کنترل و حسگرها می‌باشد که مهمترین جنبه نوآورانه آن به شمار می‌رود. با محاسبه میزان نشت حرارت، طراح می‌تواند تصمیم بگیرد که چه حرارتی برای جذب این میزان حرارت غیرمطلوب در سامانه کنترل حرارتی، تعبیه نماید یا خیر. نوآوری تحقیق حاضر بررسی شکل هندسی و ضخامت دیواره رانشگر تک مولفه هیدرازینی (ترکیب محفظه تجزیه و نازل) روی میزان انتقال حرارت تشعشع و هدایت به قطعات بالادست محفظه می‌باشد. براساس پیشینه تحقیق، هیچ تحقیقی تا کنون روی این موضوع تمرکز نکرده است. در حالیکه، نتایج مقاله حاضر نشان از اهمیت ضخامت دیواره روی توزیع حرارت و میزان شارهای حرارتی مخرب به قطعات بالادست محفظه تجزیه بخصوص شیر کنترل جریان دارد. همچنین، شبیه‌سازی مقیاس حفره بستر کاتالیستی رانشگر نیز از دیگر نوآوری‌ها می‌باشد که این روش از دقت و کارایی بیشتر ضمن فرضیات کمتر نسبت به شبیه‌سازی‌های موجود که با رهیافت نماینده حجم ابتدایی^۶، محیط متخلخل را بصورت یک محیط همگن در نظر می‌گیرند، برخوردار است.

۲- فرضیات و روش تحلیل

تحلیل بستر تجزیه در تحقیق حاضر از دو بخش تشکیل شده است، بخش اول مربوط به تبخیر و گازی‌سازی تک‌پیش‌رانه بوده که در ناحیه القایی محفظه تجزیه به وقوع می‌پیوندد. در این ناحیه معادله ساده شده انرژی مطابق با تحقیق شنکار و همکارانش [4] مورد استفاده قرار گرفته و طول ناحیه به همراه خواص ترمودینامیک گاز در طول آن محاسبه می‌شوند. در بخش دوم بعد از مشخص شدن خواص جریان در انتهای ناحیه القایی، تجزیه هیدرازین در فاز گاز روی بستر کاتالیستی انجام می‌شود. فرآیند تجزیه کاتالیستی هیدرازین در یک رانشگر تک‌پیش‌رانه را می‌توان به صورت ایده‌آل شامل دو مرحله اصلی در نظر گرفت و از واکنش‌های میانی صرف نظر نمود. در مرحله اول، هیدرازین گازی طی یک واکنش بسیار سریع و به‌شدت گرمازا مطابق رابطه (۱) به گازهای آمونیاک و نیتروژن و هیدروژن تجزیه می‌گردد. گاز تولید شده در این واکنش، به دلیل تولید حجم بسیار زیاد و همچنین انبساط به دلیل وجود گرمای زیاد، باعث افزایش فشار محفظه تجزیه می‌شود. در مرحله دوم، گاز آمونیاک حاصل از تجزیه هیدرازین، طی یک واکنش گرماگیر مطابق رابطه (۲) به گازهای نیتروژن و هیدروژن تجزیه می‌گردد. که سرعت واکنش مرحله دوم بسیار کمتر از سرعت واکنش مرحله اول می‌باشد. در حقیقت این واکنش، کنترل سرعت کلی را در دست دارد.



نرخ واکنش‌های شیمیایی کاتالیستی تجزیه هیدرازین و آمونیاک بصورت زیر محاسبه می‌شوند [4]:

$$r_{N_2H_4} = A_{N_2H_4} \exp\left(-\frac{T_A^{N_2H_4}}{T_S}\right) Y_S^{N_2H_4} \quad (3)$$

^۱ Thermal control system (TCS)

^۲ Radiation

^۳ Radiative cooling

^۴ Heat soak back

^۵ Conduction

^۶ Representative Elementary Volume (REV)

$$r_{NH_3} = A_{NH_3} \exp\left(-\frac{T_A^{NH_3}}{T_S}\right) Y_S^{NH_3} \quad (4)$$

در معادلات فوق T_S معرف دمای سطح کاتالیست و Y_S معرف کسر جرمی گونه‌های شیمیایی در سطح کاتالیست با زمان می‌باشند. ثوابت نیز در جدول ۱ مشخص شده‌اند.

جدول ۱- ثابت‌های به کار رفته در معادلات آرنیوس [4]

Table 1- Constants used in Arrhenius equations [4]

ردیف	ثابت	مقدار	واحد
۱	$A_{N_2H_4}$	$1/5 \times 10^4$	یک بر ثانیه
۲	$T_A^{N_2H_4}$	۲۷۷۷/۷۸	کلوین
۳	A_{NH_3}	$2/53 \times 10^{10}$	یک بر ثانیه
۴	$T_A^{NH_3}$	۲۷۷۷/۷۸	کلوین

فرم بقیای معادلات ناویر استوکس [4] در ادامه ارائه می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + F_i \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i Y_k)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{Sc} \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial h}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{1}{Sc} + \frac{1}{Pr} \right) \sum_{k=1}^N h_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

که در آنها، Pr عدد پراتل و Sc عدد اشمیت می‌باشند. τ تنش برشی و u سرعت می‌باشد. مهمترین فرضیات بکار رفته در معادلات (۵)-(۸) عبارتند از:

- ۱- سیال پیوسته و تراکم‌پذیر در نظر گرفته شده است،
 - ۲- از معادله حالت گاز ایده‌آل استفاده شده است،
 - ۳- از نیروی بویانسی و کلیه نیروهای حجمی صرف‌نظر شده است،
 - ۴- از کار نیروی فشار و اتلاف لزجی در معادله انرژی صرف‌نظر شده است،
 - ۵- اعداد پراتل و اشمیت ثابت فرض شده‌اند،
 - ۶- لزجت سیال ثابت در نظر گرفته شده است،
 - ۷- از رهیافت رنژ^۱ و فرض بوزینسک^۲ برای شبیه‌سازی اثرات آشفتگی جریان بهره گرفته شده است.
- لازم به ذکر است در معادله (۷) نرخ $\dot{\omega}_i$ مستقیماً از روی معادلات (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند. نرخ تولید یا مصرف گونه i از طریق N واکنش شیمیایی مطابق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\dot{\omega}_i = M w_i \sum_{r=1}^N R_{i,r} \quad (9)$$

که در آن، $\dot{\omega}_i$ نرخ تولید یا مصرف گونه i ، $M w_i$ جرم مولکولی و $R_{i,r}$ بصورت زیر محاسبه می‌شود:

^۱ RANS

^۲ Boussinesq assumption

$$R_{i,r} = (v''_{i,r} - v'_{i,r}) \left[r_r \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{(\eta'_{j,r} + \eta''_{j,r})} \right] \quad (10)$$

رابطه فوق مربوط به یک واکنش یک سوپه بوده که در آن، $v'_{i,r}$ ضریب استوکیومتری واکنش دهنده i در واکنش r بوده و $v''_{i,r}$ ضریب استوکیومتری محصول i در واکنش r می باشد. عبارت r_r نیز معرف نرخ پیشرفت واکنش r و $C_{j,r}$ نیز غلظت مولی گونه j در واکنش r می باشد. ضرایب $\eta'_{j,r}$ و $\eta''_{j,r}$ نیز به ترتیب، نمای پیشروی مربوط به واکنش دهنده و محصول i در واکنش r می باشند. نرخ واکنش r_r نیز با استفاده از قانون آرنیوس بصورت معادلات (۳) و (۴) محاسبه می شود.

برای اطمینان از بقای جرم، معادلات انتقال گونه های شیمیایی برای $N-1$ گونه شیمیایی تحلیل می شود و کسر جرمی گونه N از بقای جرم، بصورت زیر محاسبه می شود:

$$\sum_{k=1}^N Y_k = 1 \quad (11)$$

همچنین دما نیز با استفاده از معادله انرژی جهت استخراج آنتالپی و رابطه زیر استفاده می شود:

$$T = \frac{h - \sum_k Y_k \Delta h_{fk}}{\bar{c}_p} \quad (12)$$

که در آن Δh_{fk} انرژی واکنش شیمیایی و Y_k کسر جرمی گونه ها است. \bar{c}_p نیز ظرفیت گرمایی میانگین می باشد که وابستگی آن به دما برای هر گونه شیمیایی در محاسبات وارد شده است و به صورت زیر می باشد:

$$\bar{c}_p = \frac{1}{T - T_{ref}} \int_{T_0}^T c_p dT \quad (13)$$

که در آن، c_p ظرفیت حرارتی مخلوط است که بصورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$c_p = \sum_{k=1}^N Y_k c_{p,k} \quad (14)$$

تغییر آنتالپی واکنش برای واکنش تجزیه آمونیاک برابر اختلاف آنتالپی تشکیل هیدرازین و آمونیاک است که برابر ۱۹۳- کیلوژول بر مول و تغییر آنتالپی واکنش تجزیه آمونیاک معادل آنتالپی تشکیل آمونیاک است که برابر ۹۱/۸ کیلوژول بر مول می باشد. فرض بر این است که واکنش های شیمیایی کاملاً در مجاورت کاتالیست انجام می شوند. بنابراین، واکنش ها از نوع سطحی بوده و به دلیل ضریب گذردهی یا نفوذپذیری^۱ بسیار کم گرانول های کاتالیست، از انتقال جرم و حرارت در گرانول های کاتالیست صرف نظر شده است.

۳- هندسه، شبکه بندی، شبیه سازی و صحنه گذاری

شبیه سازی برای یک رانشگر ۱۰ نیوتنی با بستر کاتالیستی حاوی دانه های کاتالیست پایه آلومینا با پوشش فلز فعال ایریدیوم انجام گرفته است. مشخصات هندسی و عملکردی محفظه تجزیه آن، در جدول ۲ ارائه شده است. هندسه و مش مسئله حاضر با استفاده از نرم افزار گمبیت ۲،۴،۶ ایجاد شده است. تعداد مش های بستر، حدود ۲۰۰ هزار می باشد که این تعداد مش پس از بررسی استقلال نتایج از شبکه بندی در نظر گرفته شده است. هنگامی که تعداد مش های بستر، حدود ۱۶۵ هزار می شود، کسر جرمی هیدرازین و نیز سرعت محوری در انتهای بستر کاتالیستی با افزایش تعداد مش دیگر تغییرات خاصی نمی کنند. لذا تعداد ۲۰۰ هزار مش برای شبیه سازی در نظر گرفته شد. پس از تولید شبکه، با استفاده از نرم افزار فلوئنت ۱۷/۱، واکنش تجزیه هیدرازین در مقیاس دانه های تشکیل دهنده بستر کاتالیستی شبیه سازی گردید. شبیه سازی ها با در نظر گرفتن تبخیر قطرات تک پیشراجه هیدرازین، در ناحیه القایی، توسط مدل شنکار انجام گرفته است.

تراکم شبکه محاسباتی در مجاورت دانه های کاتالیست به علت نوع واکنش های شیمیایی که از نوع واکنش های سطحی می باشد، بسیار دارای اهمیت است. شکل ۱ کل بستر کاتالیستی و نمایی از شبکه محاسباتی ایجاد شده پیرامون دانه های کاتالیست را نمایش می دهد. در مجاورت سطح دانه های کاتالیست، واکنش های شیمیایی بوقوع می پیوندند و در این ناحیه انتقال جرم و گونه های شیمیایی بسیار اهمیت دارند، از اینرو از شبکه با سازمان

^۱ Permeability

^۲ GAMBIT 2.4.6

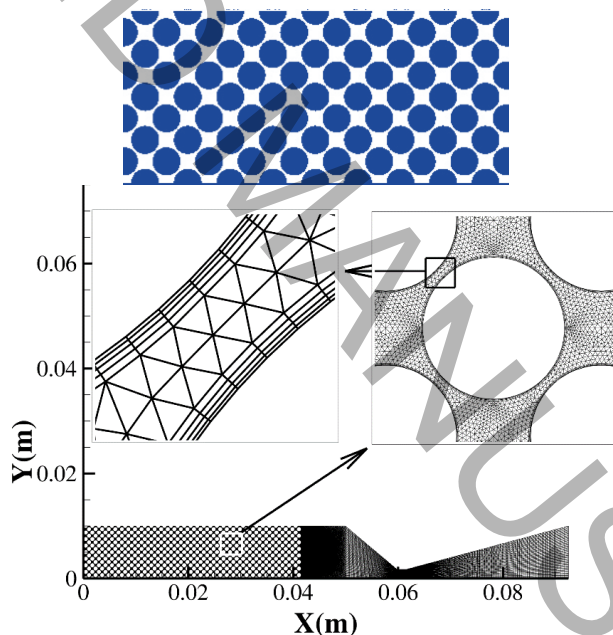
^۳ FLUENT 17.1

با تراکم بالا استفاده شده است. در یک واکنش سطحی، واکنش دهنده‌ها از طریق لایه مرزی در نتیجه پخش جرمی^۱ روی سطح منتقل می‌شوند، بنابراین کمیت‌های پخشی اهمیت داشته و در نتیجه، ابعاد و تعامد شبکه در این بخش بر پیش‌بینی تحلیل تاثیرگذار خواهد بود. نوع شبکه‌بندی ایجاد شده کوادپیو^۲ می‌باشد. فاصله اولین ردیف لایه مرزی از سطح دانه‌های کاتالیست کمتر از ۲ میکرون، با نرخ رشد ۱/۳ و تعداد ۵ ردیف در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها بصورت دوبعدی و متقارن محوری^۳ انجام شده‌اند. به همین دلیل شکل هندسی کاتالیست‌ها به صورت چنبره^۴ توپر در نظر گرفته شده است که متفاوت از شکل گرانولی آنهاست. محاسبه میدان جریان در نرم‌افزار فلوئنت، با فرض ورودی گاز در ابتدا استفاده شده است. با توجه به اهمیت بالای لایه مرزی در دیواره گرانول‌ها، از مدل توربولانسی دو معادله‌ای کی-امگا اس اس تی^۵ استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات هندسی رانشگر و نیز محفظه تجزیه

Table 2 - Geometrical specifications of the thruster and the decomposition chamber

ردیف	کمیت	مقدار	واحد
۱	قطر محفظه تجزیه	۲/۰۰	سانتی متر
۲	طول محفظه تجزیه	۴/۲۰	سانتی متر
۳	فشار ورودی محفظه تجزیه	۱۵	بار
۴	ضخامت دیواره	۰/۵ تا ۰/۱	سانتی متر
۵	دمای پیش‌رانه در انتهای ناحیه القایی	۵۰۰	کلوین
۶	قطر گرانول‌های کاتالیست	۱	میلی‌متر
۷	ضریب تخلخل بستر	۰/۴	-



شکل ۱- شبکه محاسباتی پیرامون دانه‌های کاتالیست
Figure 1 - Mesh view around catalyst granules

^۱ Mass diffusion

^۲ Quad-pave

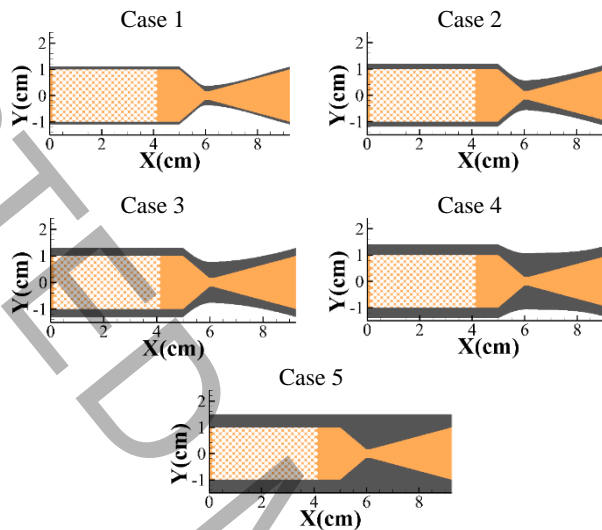
^۳ Axisymmetric

^۴ Torus

^۵ k- ω SST

از آنجایی که در رانشگرهای تک‌پیش‌رانه هیدرازینی به طور معمول هیچگونه خنک‌کاری انجام نمی‌شود، لذا می‌بایست رانشگر به صورتی طراحی شود که میزان گرمای انتقال‌یافته از آن کاهش یابد [18]. بنابراین جهت طراحی سازه رانشگر علاوه بر جنس، تعیین ضخامت دیواره آن بسیار مهم می‌باشد. به این منظور نیاز به تعیین دمای بیرونی دیواره و میزان شار حرارتی در طول رانشگر می‌باشد.

شکل ۲ هندسه رانشگر با ۵ ضخامت مختلف دیواره از ۱ تا ۵ میلی‌متر را به عنوان ۵ مورد تحت مطالعه^۱ نشان می‌دهد. بالتبع این ۵ مورد تحت مطالعه از لحاظ جرم، مساحت سطح هدایت حرارتی و مساحت سطح تشعشع با هم متفاوت هستند که در جدول ۳ ارائه شده است. جدول ۳ حاوی اطلاعات ابعادی و جرم می‌باشد. لازم به ذکر است که بیشینه ضخامت در ناحیه گلوگاه لحاظ شده است تا از این بخش در برابر حرارت محافظت گردد، بدین صورت که با مکانیزم پخش حرارت در سطح وسیع‌تری، از دمای دیواره نازل در بخش گلوگاه کاسته شود. ضمناً برای ضخامت‌های مختلف پوسته، وزن رانشگر با فرض جنس استیل، محاسبه شده و در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲- هندسه رانشگر با ضخامت مختلف دیواره از ۱ تا ۵ میلی‌متر

Figure 2 - Thruster geometry with different wall thicknesses from 1 to 5 mm

جدول ۳- جرم، مساحت سطح هدایت حرارتی و مساحت سطح تشعشع رانشگر برای ۵ مورد تحت مطالعه

Table 3 - Mass, thermal conductivity surface area, and radiative surface area of the thruster for the 5 cases under study

مورد تحت مطالعه	ضخامت دیواره (mm)	جرم (kg)	سطح تشعشع (m ²)	سطح هدایت حرارتی (m ²)
۱	۱	۱۳/۶ e-۳	۵/۴ e-۳	۶/۶ e-۵
۲	۲	۳۰/۵ e-۳	۶/۱ e-۳	۱۳/۸ e-۵
۳	۳	۵۰/۱ e-۳	۶/۸ e-۳	۲۱/۷ e-۵
۴	۴	۷۶/۴ e-۳	۷/۶ e-۳	۳۰/۲ e-۵
۵	۵	۱۲۱/۱ e-۳	۸/۷ e-۳	۳۹/۳ e-۵

حال به منظور صحت‌گذاری^۲، نتایج به‌دست آمده از روش عددی کار حاضر با نتایج حل عددی هوانگ و همکارانش [5] مقایسه شده است. برای بررسی صحت شبیه‌سازی‌ها، نتایج تحقیق ایشان با فرض این که قطر دانه‌ها هم در بالادست و هم در پایین دست بستر ۱ میلی‌متر، ضریب تخلخل ۰/۴ و هیچ‌گونه تخریبی در بستر ایجاد نشده، در نظر گرفته شده است. هندسه و ابعاد محفظه تجزیه و شرایط کاری رانشگر، عیناً همانند تحقیق هوانگ و همکارانش در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ پروفیل دما در طول محفظه تجزیه تحقیق حاضر با نتایج هوانگ و همکارانش [5] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج وجود دارد. براساس نمودارهای نمایش داده شده، بیشینه اختلاف بین نتایج برای دما حدود ۱۰٪ و برای کسر جرمی هیدرازین در حدود ۲۵٪ می‌باشد. پروفیل کسر جرمی گونه هیدرازین نیز در شکل ۴ با نتایج عددی هوانگ و همکارانش [5] مقایسه شده است. در این نمودارها نیز مطابقت خوبی بین نتایج دیده می‌شود. اختلافات موجود بین نتایج حاضر با داده‌های هوانگ

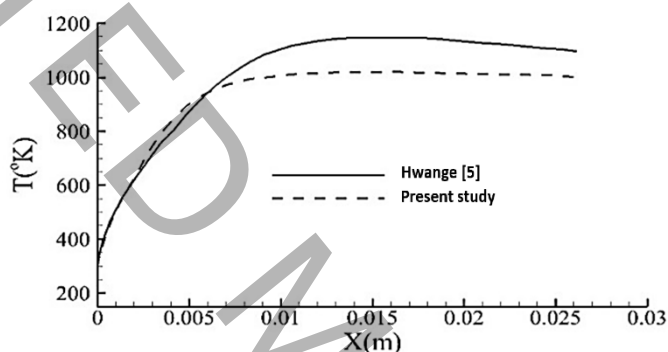
^۱ Case study

^۲ Validation

و همکارانش [5] به این دلیل است که بستر کاتالیستی در تحقیقات هوانگ، به عنوان یک محیط متخلخل یک‌بعدی در نظر گرفته شده است در حالیکه این بخش در تحقیق حاضر بصورت تقارن محوری تحلیل شده است. علاوه بر این، محفظه تجزیه در تحقیق هوانگ بصورت یک محیط پیوسته فرض شده، اما تحلیل محیط متخلخل در مقاله حاضر در مقیاس خلل و فرج انجام گرفته است. نهایتاً، دمای دیواره محفظه در تحقیق هوانگ مشخص نیست، حال آنکه در تحقیق حاضر انتقال حرارت هدایت داخل دیواره محفظه تجزیه کاملاً شبیه‌سازی شده و دمای محیط پیرامون محفظه برابر ۱۰۰ کلوین فرض شده است.

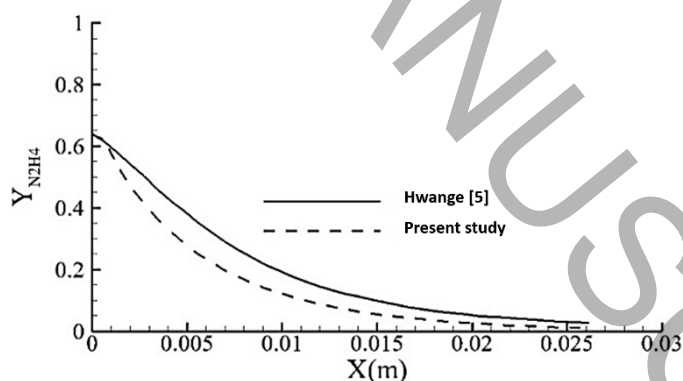
۴- نتایج و بحث

برخی پارامترهای مختلف عملکردی رانشگر عبارتند از کسر جرمی هیدرازین و سایر گونه‌های شیمیایی، دمای سراسری و دما در بستر و دمای دیواره بیرونی، تغییرات فشار و سرعت سیال که در این بخش به آنها پرداخته شده است. شکل ۵ کانتور کسر جرمی هیدرازین^۱ با هدف نشان دادن اهمیت تسخیر لایه مرزی جرمی با تراکم مناسب شبکه را نمایش می‌دهد. در نواحی سطحی که پخش جرمی اتفاق می‌افتد، ۵ لایه شبکه ایجاد شده است و بدین ترتیب شبکه ریز شده است. در نواحی که نازک‌ترین ضخامت لایه اتفاق افتاده است که البته در شکل ۵ نیز بزرگنمایی شده است، در آن نواحی جریان کانالی^۲ شده است و بنابراین بیشینه سرعت اتفاق می‌افتد و این دلیل دیگری بر افزایش تراکم شبکه محاسباتی در آن نواحی است.



شکل ۳ - پروفیل دما در طول بستر کاتالیستی

Figure 3 - Temperature profile along the catalyst bed

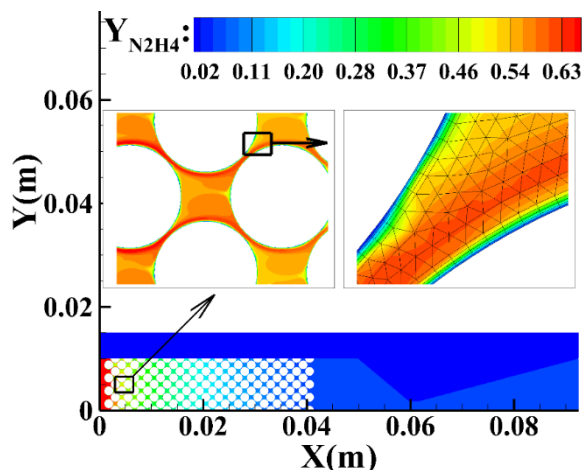


شکل ۴ - پروفیل کسر جرمی هیدرازین در طول بستر کاتالیستی

Figure 4 - Hydrazine mass fraction profile along the catalyst bed

^۱ N₂H₄ mass fraction

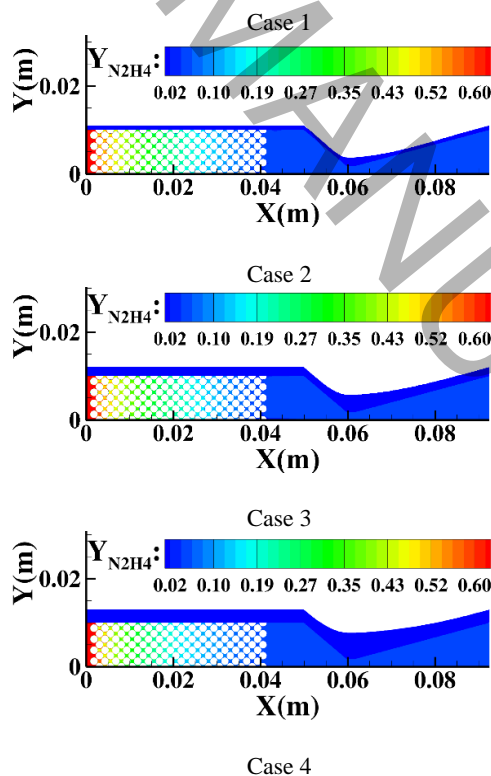
^۲ Channelized flow

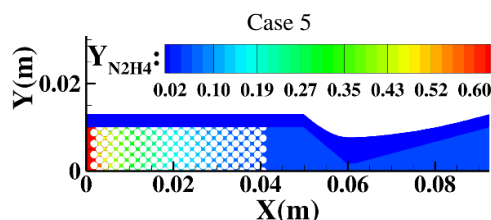
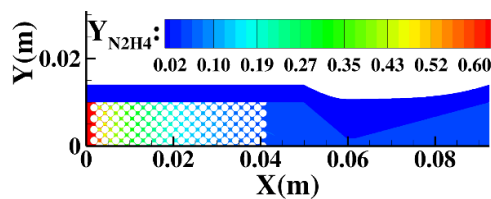


شکل ۵- کانتور کسر جرمی هیدرازین با نمایی از شبکه محاسباتی

Figure 5 - Hydrazine mass fraction contour with a view of the mesh

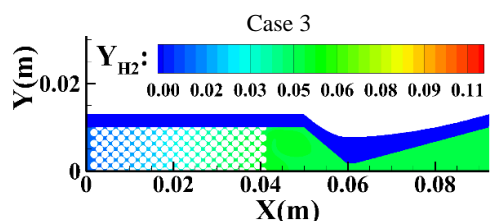
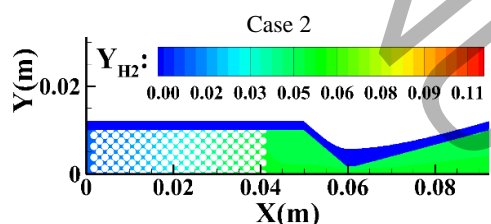
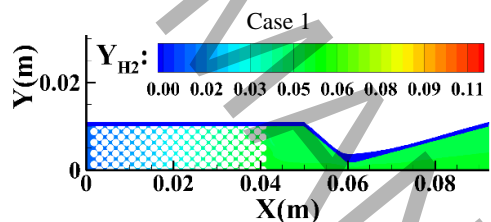
در ادامه، کانتور گونه‌های شیمیایی نمایش داده می‌شود. شکل ۶، کانتورهای کسر جرمی میانگین‌گیری شده هیدرازین را برای هر ۵ مورد تحت مطالعه نمایش می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، به علت غلبه تجزیه کاتالیستی، با افزایش ضخامت دیواره، واکنش‌های شیمیایی که از نوع سطحی هستند تقریباً هیچ تاثیری نمی‌پذیرند و بنابراین در میزان تجزیه هیدرازین تفاوت محسوسی اتفاق نمی‌افتد. در این تحلیل فرض بر این است که تجزیه از نوع سطحی کاتالیستی اتفاق می‌افتد و از جنبه تجزیه حجمی صرف‌نظر شده است. به همین دلیل است که ضخامت دیواره روی واکنش شیمیایی اثری نگذاشته است و در صورت لحاظ نمودن تجزیه حجمی احتمالاً به دلیل قدری تفاوت در دما، واکنش‌ها کمی تحت تاثیر قرار می‌گرفت. به‌رحال محققین زیادی با فرض فقط تجزیه سطحی کاتالیستی تحلیل خود را انجام و صحت‌گذاری نموده‌اند، زیرا در مسئله حاضر تجزیه سطحی بر حجمی کاملاً غلبه دارد.





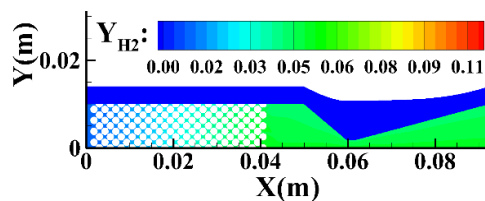
شکل ۶- کانتورهای کسر جرمی میانگین‌گیری شده هیدرازین برای ۵ مورد تحت مطالعه
 Figure 6 - Time-averaged mass fraction contours of hydrazine for the 5 cases under study

با هدف بررسی کسر جرمی سایر گونه‌های شیمیایی، **Error! Reference source not found.** شامل کانتورهای کسر جرمی میانگین‌گیری شده هیدروژن به عنوان یکی از گونه‌ها ارائه شده است. اینکه فقط کسر جرمی هیدروژن ارائه شده است، به این دلیل است که ارائه سایر گونه‌ها در بردارنده نتایج بیشتری نبوده و برای پرهیز از تکرار به هیدروژن بسنده شده است. تفاوت محسوسی در کانتورهای سایر گونه‌های شیمیایی چه برای هیدروژن و چه سایر گونه‌ها برای هر ۵ مورد تحت مطالعه، دیده نمی‌شود. در محفظه تجزیه هیدرازینی مورد مطالعه، در واقع دو واکنش تجزیه اتفاق می‌افتد. اول واکنش تجزیه هیدرازین که در شکل ۶ نشان داده شد که در موردهای تحت مطالعه تفاوتی مشاهده نمی‌شود. دوم واکنش تجزیه آمونیاک^۱ که آن نیز با ارائه **Error! Reference source not found.** مربوط به هیدروژن که از محصولات تجزیه آمونیاک است، نشان داده شد که از نظر واکنش تجزیه آمونیاک نیز تفاوتی در موردهای تحت مطالعه مشاهده نمی‌شود.



Case 4

^۱NH₃



Case 5

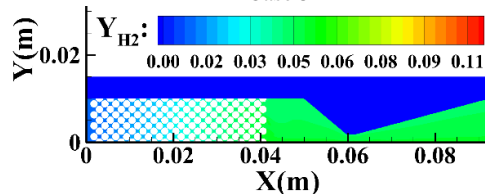
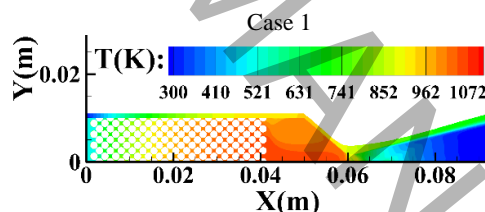
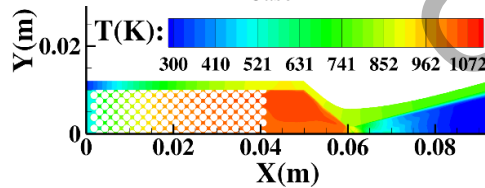


Figure 7 – Time-averaged mass fraction contours of hydrogen (as one of the species) for the 5 cases under study

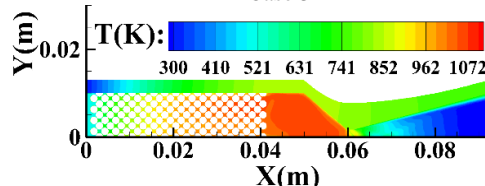
حال به بررسی کانتورهای دما پرداخته می‌شود. دما را می‌توان در سه بخش بررسی نمود. اول در محفظه تجزیه کاتالیستی، دوم در محفظه تخلیه (خالی از کاتالیست) و نهایتاً در خود نازل. ابتدا تخمین دما در سراسر رانشگر یعنی داخل محفظه تجزیه و محفظه تخلیه نازل و همچنین پوسته، ارائه می‌شود. نتایج ارائه شده در شکل ۷ نشان می‌دهد که تفاوت در دمای داخل محفظه تجزیه بسیار ناچیز است و اما در محفظه تخلیه نازل در این مورد ۵ تحت مطالعه، اختلافات دمای جزئی دیده می‌شود. این روند کاملاً مورد انتظار است، زیرا فرآیند تجزیه دستخوش تغییر قرار نگرفته است تا دمای جریان داخلی تحت تاثیر چندانی قرار بگیرد. مکانیسم اصلی کنترل دمای داخل محفظه تجزیه، فعال شدن واکنش گرماگیر تجزیه آمونیاک می‌باشد. فعال شدن این واکنش، ترکیب شیمیایی و در نتیجه دمای گاز داخل محفظه را کنترل می‌کند. اما تغییرات در دمای پوسته نسبت به جریان در این مورد ۵ تحت مطالعه، محسوس می‌باشد. علت این امر تاثیر انتقال حرارت می‌باشد. علیرغم اینکه با زیاد شدن ضخامت پوسته رانشگر، تغییر محسوسی در عملکرد رانشگر دیده نشده است، اما شرایط مکانیکی رانشگر از منظر انتقال حرارت تحت تاثیر قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که توزیع حرارت پوسته در محدوده محفظه تخلیه نازل و خود نازل با افزایش ضخامت پوسته، یکنواخت‌تر شده است.



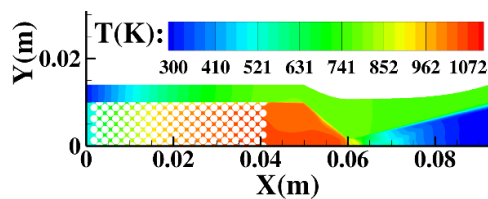
Case 2



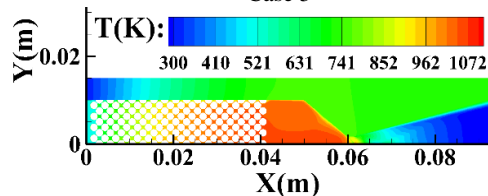
Case 3



Case 4



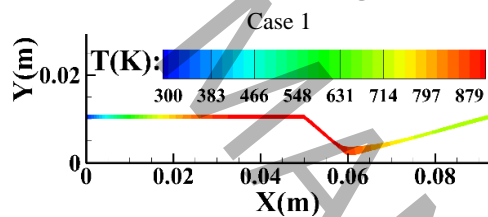
Case 5



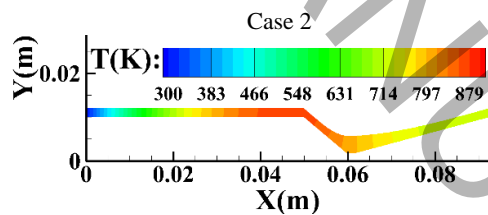
شکل ۷- کانتورهای دمای میانگین گیری شده زمانی در سراسر رانشگر برای ۵ مورد تحت مطالعه

Figure 8 - Time-averaged temperature contours across the thruster for the 5 cases under study

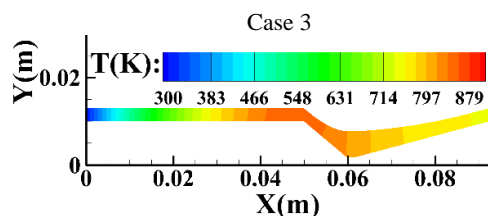
در کانتورهای شکل ۸، دماهای دیواره رانشگر با هدف نمایش دقیق تر توزیع دما در پوسته رانشگر ارائه شده‌اند. تاثیر قابل توجهی که ضخامت پوسته در توزیع یکنواخت تر حرارت و کاهش دمای بیشینه دارد، کاملاً مشهود است. هر چقدر ضخامت پوسته کمتر است، دمای روی پوسته بالاتر است. همچنین شایان ذکر است که بیشینه دما در محل نقطه اتصال نازل و محفظه تجزیه یعنی ابتدای محفظه تخلیه رخ داده است. لازم به ذکر است که اختلاف دما در منطقه مذکور با سایر مناطق، قابل توجه است. پیش بینی بیشینه دما از این جهت مهم است که باید ملاحظات مربوط به ذوب نشدن پوسته رانشگر و استحکام آن (حد تحمل دما) که از بیشینه دما تاثیر می‌گیرند را در نظر داشت و ضخامت را در حدی کاهش داد که ایمنی حاصل شود. اما از طرفی افزایش ضخامت پوسته سبب افزایش وزن رانشگر می‌شود که این عاملی محدودکننده است. بنابراین جهت کنترل بیشینه دما و متعاقب آن کنترل نشت حرارت به بالادست، یک شرایط بینابینی باید رعایت گردد که قید وزن رانشگر را نیز ارضاء نماید.



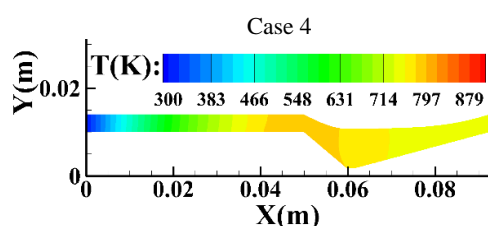
Case 1



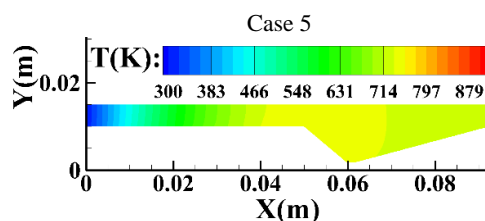
Case 2



Case 3



Case 4

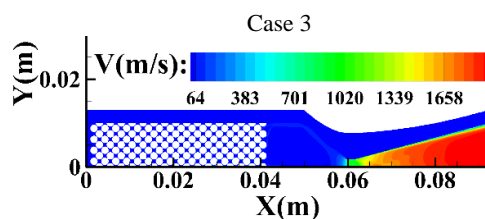
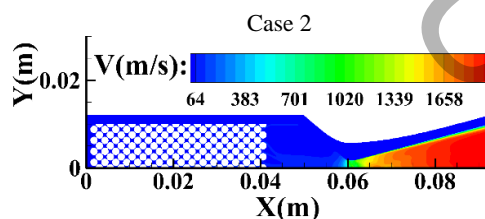
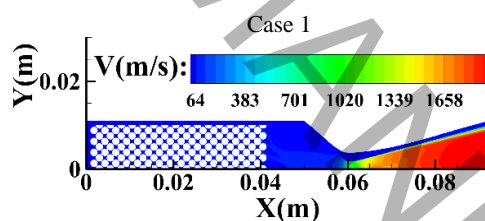


شکل ۸ - کانتورهای دمای میانگین گیری شده زمانی در پوسته رانشگر برای ۵ مورد تحت مطالعه

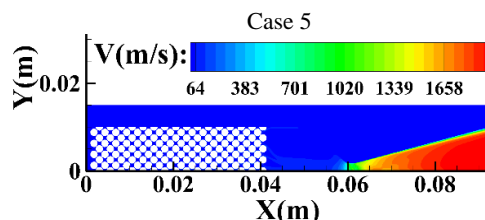
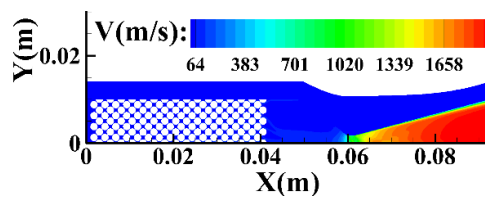
Figure 9 - Time-averaged temperature contours in the thruster shell for the 5 cases under study

حال به ارائه و بررسی کانتورهای سرعت جریان در شکل ۹ برای هر ۵ مورد تحت مطالعه پرداخته می‌شود. عدم تفاوت در سرعت جریان در ۵ مورد تحت مطالعه، در نتیجه عدم تفاوت در توزیع گونه‌های شیمیایی و تفاوت اندک در میدان دما می‌باشد. هدف از بررسی کانتور سرعت، بررسی میزان تاثیر ضخامت پوسته روی میزان تراست و ضربه ویژه است. عدم تفاوت در سرعت به معنای عدم تفاوت در میزان تراست و ضربه ویژه خواهد بود. شکل ۱۰ کانتورهای فشار میانگین گیری شده برای هر ۵ مورد تحت مطالعه را نشان می‌دهد که تفاوت خاصی در آنها دیده نمی‌شود. این عدم تفاوت، به دو دلیل می‌باشد. دلیل اول این است که میدان فشار، تابع ضربه گذردهی محیط متخلخل بوده و چون محیط متخلخل تغییری نکرده، میدان فشار نیز دستخوش تغییر نگردیده است. دلیل دوم این است که میدان فشار متأثر از آزادسازی انرژی و تغییرات چگالی می‌باشد که اینها خود تابع دما هستند. از طرفی در دما و گونه‌های شیمیایی تغییری حاصل نشده است، پس تغییرات چگالی نیز اتفاق نیافتاده است. پس به علت عدم تفاوت در ضربه تخلخل و شکل ذرات کاتالیست و در نتیجه ضربه گذردهی محیط متخلخل، کانتورهای فشار در پی تغییر ضخامت پوسته، تفاوتی با هم نکرده‌اند.

همانگونه که قبلاً نیز بیان گردید، پس به طور کلی دو مکانیزم انتقال حرارت در این سامانه وجود دارد که عبارتند از تشعشع و هدایت. در اینجا تشعشع از طریق سطح انتقال حرارت کنترل شده است و هدایت از طریق ضخامت گوشت دیواره رانشگر کنترل شده است. در یک فضایما، وظیفه سامانه کنترل حرارتی این است که تمام اجزای فضایما را در طول تمام مراحل مأموریت در بازه دمایی قابل قبولی نگه دارد. از اینرو این سامانه باید با انتقال حرارت هدایت که بار حرارتی را به بالادست یعنی سر رانشگر نشت داده، مقابله نماید.



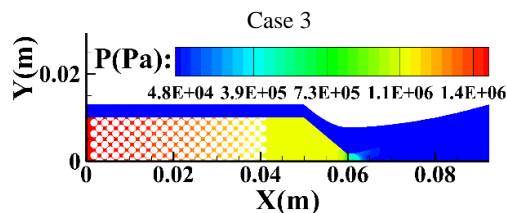
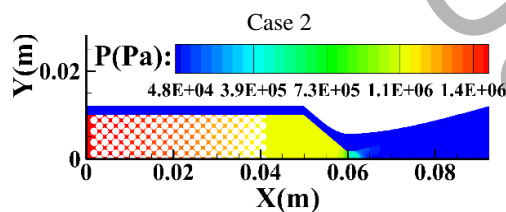
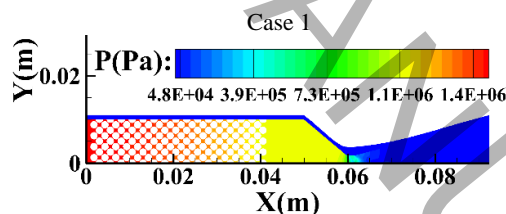
Case 4



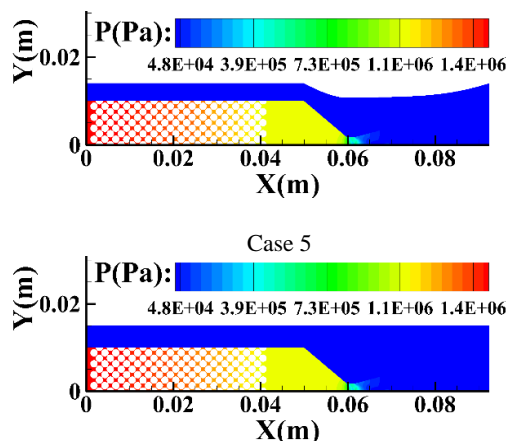
شکل ۹- کانتورهای سرعت میانگین گیری شده برای ۵ مورد تحت مطالعه

Figure 10 - Time-averaged velocity contours for the 5 cases under study

مکانیزم اول، تشعشع است. در واقع تنها مکانیزم انتقال حرارت در دیواره جانبی رانشگر، انتقال حرارت تشعشع می‌باشد. در ادامه نمودارهای شار حرارتی استخراج و ارائه شده است. شکل ۱۱ تغییرات نرخ شار حرارتی تشعشع از سطح جانبی رانشگر را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که بیشینه میزان شار حرارتی در انتهای محفظه تجزیه رخ داده است. با افزایش ضخامت پوسته، به دلیل کاهش دمای دیواره و همچنین وابستگی شار حرارتی تشعشع به توان چهارم دمای دیواره، افت چشمگیر شار حرارتی (انتقال حرارت تشعشعی) اتفاق افتاده است. مشاهده می‌شود که انتقال حرارت تشعشعی از بیش از 40 کیلووات بر مترمربع به کمتر از 20 کیلووات بر مترمربع می‌رسد و این به معنای قریب به سه برابر افت می‌باشد. این افت البته مزایایی دارد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. مزیت آن این است که بار حرارتی وارده بر سامانه کنترل حرارت کم می‌شود. در واقع رانشگر حرارت را در خود نگه می‌دارد و کمتر حرارت از دست می‌دهد و بالتبع راندمان حرارتی را بالاتر نگه می‌دارد. با افزایش ضخامت پوسته، نمودارهای شار حرارتی هموارتر شده‌اند که این به معنای توزیع یکنواخت‌تر شار حرارتی می‌باشد. همچنین با افزایش ضخامت پوسته، میزان انتقال حرارت از طریق تشعشع، کاهش یافته است. در واقع از بررسی نمودار مشهود است که بیشینه نرخ شار حرارتی تشعشع (منفی‌تر است، چون شار خروجی از سیستم است) با افزایش ضخامت پوسته رانشگر، رو به کاهش می‌رود در عین حال که روند نمودار شار نیز تحت تاثیر قرار گرفته است.



Case 4

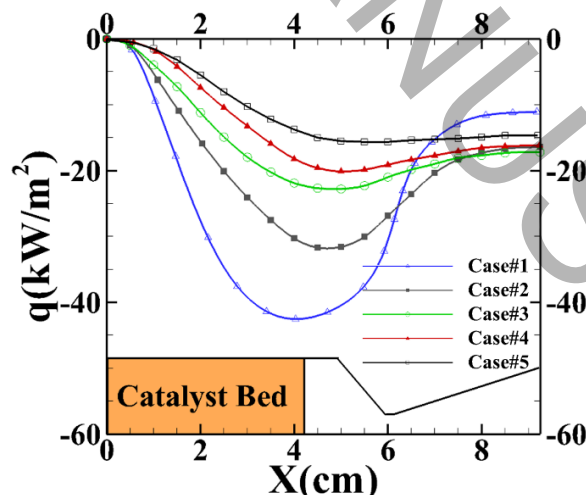


شکل ۱۰- کانتورهای فشار میانگین گیری شده برای ۵ مورد تحت مطالعه
 Figure 11 – Time-averaged pressure contours for the 5 cases under study

در اینجا بهتر است خاطر نشان شود که یک تحلیل حساسیت نیز بر روی دمای محیط یا همان دمای بینهایت به عنوان شرط مرزی در تحلیل‌ها صورت گرفته است. دمای بینهایت در همه تحلیل‌ها ۱۰۰ کلوین لحاظ گردید، اما برای مطالعه اثر آن، تحلیل با دمای بینهایت ۳۰۰ کلوین نیز تکرار گردید. نتایج نشان داد که انتقال حرارت تشعشع به دمای بینهایت وابسته نبوده و تاثیری از آن نمی‌پذیرد. فی‌الواقع این دمای بیشینه تشعشع است که کنترل انتقال حرارت تشعشع را در دست دارد و چون مرتبه بزرگی این دما که حدود ۹۰۰ کلوین است، با مرتبه بزرگی دمای بینهایت خیلی تفاوت دارد و از طرفی در محاسبات میزان انتقال حرارت تشعشع، توان چهارم دما نمود پیدا می‌کند (مطابق رابطه (۱۵))، همین انتظار متصور بود که دمای بینهایت تاثیر چندانی بر نتایج نگذارد. با توجه به محیط خلاء پیرامون رانشگر، اثرات تشعشع توسط قانون کلاسیک استفان بولتزمن لحاظ شده و معادله آن به صورت زیر است:

$$Q_{rad} = \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_\infty^4) \quad (15)$$

عبارت σ در معادله (۱۵) معرف ثابت استفان بولتزمن می‌باشد که برابر $5.67 \times 10^{-8} \frac{J}{sm^2 K^4}$ نظر گرفته شده است. همچنین، ضریب ε تابش نیز با فرض جسم سیاه ایده آل برابر ۱ در نظر گرفته شده است. لازم به یادآوری است که تشعشع روی دیواره بیرونی محفظه و با محیط اطراف رانشگر در نظر گرفته شده است. بنابراین، اثرات تشعشع داخل محفظه تجزیه مد نظر نبوده است.

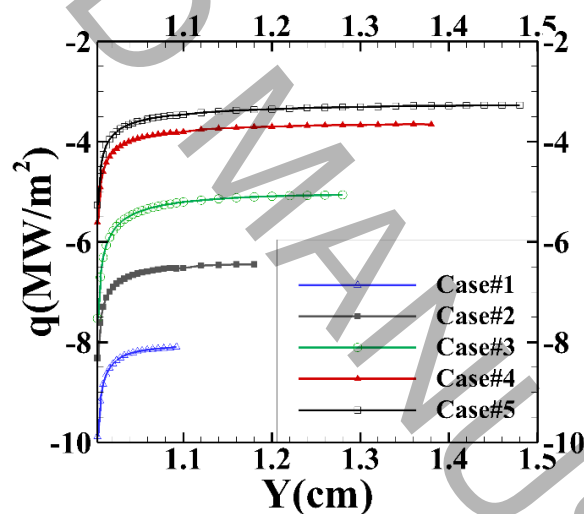


شکل ۱۱- تغییرات نرخ شار حرارتی تشعشع از سطح جانبی رانشگر در راستای طولی در هر ۵ مورد تحت مطالعه
 Figure 12 - The rate of radiation heat flux from the lateral surface of the thruster in the 5 cases under study

شکل ۱۲ تغییرات نرخ شار حرارتی هدایت از پوسته به چاه حرارتی دما ثابت را نشان می‌دهد. کاهش شار حرارتی هدایت در پی افزایش ضخامت پوسته رخ داده است. همچنین با افزایش ضخامت پوسته، این روند کاهشی کند شده است که با کاهش اختلاف بین نمودارها خود را نشان داده

است. آنچه که در سمت چپ نمودار یعنی روی محور عمودی سمت چپ مشاهده می‌شود، نرخ شار حرارتی نشت کرده به بالادست می‌باشد. باید دقت شود که میزان حرارت نشت کرده به بالادست، نسبت به شدت انتقال حرارت تشعشعی از مرتبه تا ۱۰۰۰ برابر بزرگتر است، چون انتقال حرارت بر واحد سطح مقطع حلقوی پوسته در نظر گرفته شده است. بنابراین جنس انتقال حرارت غالب در مسئله فعلی، از نوع هدایتی با نشت حرارت به بالادست می‌باشد. در نتیجه از این منظر، افزایش ضخامت پوسته سبب افزایش بار مزاحم حرارتی بر روی سامانه کنترل حرارت می‌گردد. بنابراین هرچند که در نمودار قبل مشاهده گردید که ضخامت بیشتر پوسته، کاهش بیشینه دما را در پی دارد و انتقال حرارت را یکنواخت‌تر می‌کند، اما نمودار فعلی نشان داد که نشت حرارت به بالادست افزایش می‌یابد که این اصلاً مطلوب نبوده و برای سامانه کنترل حرارت در دسرساز است. افزایش این نوع بار حرارتی، روی مدار تغذیه^۱ اثر نامطلوب دارد. در مورد تحت مطالعه ۱ با نازکترین پوسته، بیشترین افزایش نرخ بار حرارتی نشت کرده و در مورد تحت مطالعه ۵ با ضخیم‌ترین پوسته، نرخ بار حرارتی نشت کرده کمتری برآورد شده است. حال اگر انتگرال سطح زیر نمودار که معادل میزان شار حرارتی است مد نظر قرار گیرد، دیده می‌شود که برای مورد تحت مطالعه ۵ بیشترین است. پس برای این مورد، بار روی سامانه کنترل حرارت و متعاقب آن تاثیر نامطلوب آن روی مدار تغذیه بیشتر از سایر موارد است و این یک نتیجه حائز اهمیت محسوب می‌شود. درجه بزرگی بار حرارتی هدایت از تشعشع خیلی بیشتر است، لذا جمع‌بندی بحث این نتیجه را می‌رساند که ضخیم نمودن دیواره نازل راهکار مطلوبی نمی‌باشد. به همین علت است که معمولاً نازل‌ها تا حد امکان، ظریف طراحی و ساخته می‌شوند تا هم محدودیت جرمی ارضاء شود و هم محدودیت بار حرارتی بر سامانه کنترل حرارت رعایت گردد.

در شکل ۱۳ توزیع دما روی دیواره بیرونی رانشگر ارائه شده است. افزایش ضخامت پوسته، کاهش دمای بیشینه را به دنبال داشته است و از اینرو توزیع دمای یکنواخت‌تری به دست داده است. همچنین بیشینه دما در انتهای محفظه تجزیه و داخل محفظه تخلیه نازل رخ داده است. هرچند که نکته قابل تامل، حد نازک کردن پوسته رانشگر است که با بیشینه دمای سطح پوسته و محدودیت‌های سازه‌ای به عنوان معیار، مقید می‌گردد. به هر حال بدیهی است که ضخامت بیشتر، توزیع دمای یکنواخت‌تر را در پی دارد و این از منظر سازه‌ای سبب تعدیل نقاط داغ^۲ در پوسته خواهد شد.

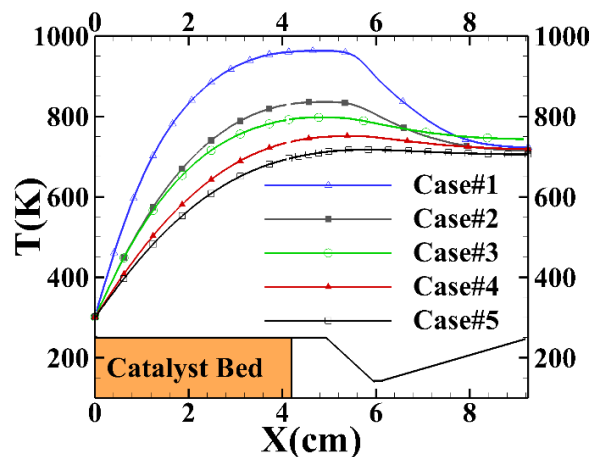


شکل ۱۳- تغییرات نرخ شار حرارتی هدایتی از پوسته به چاه حرارتی دما ثابت در راستای شعاعی در ۵ مورد تحت مطالعه

Figure 13 - the rate of conductive heat flux from the shell to the constant temperature heat sink in the radial direction in the 5 cases under study

^۱ Feeding system

^۲ Hot spots

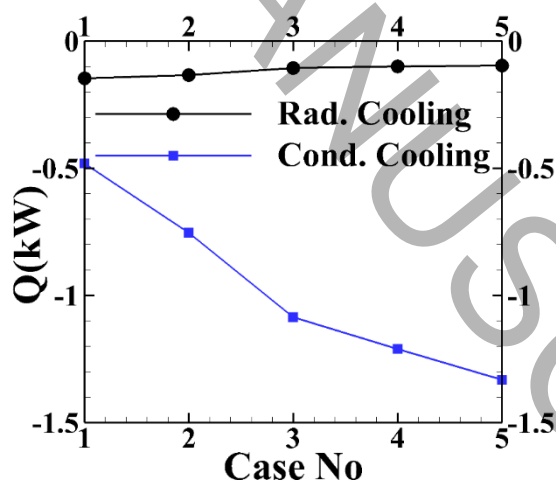


شکل ۱۳- توزیع دما روی دیواره بیرونی رانشگر

Figure 14 - Temperature distribution on the outer wall of the thruster

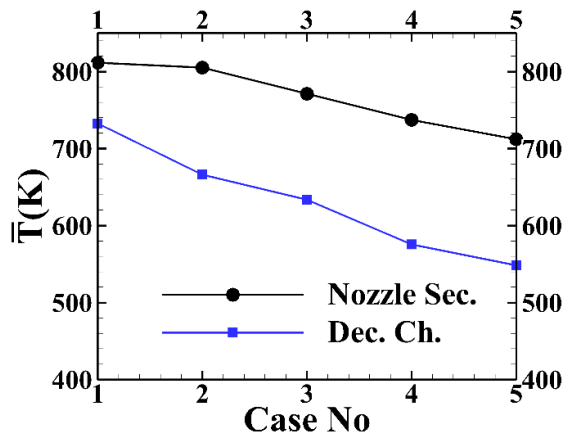
شکل ۱۴ نسبت شار انرژی انتقال یافته از طریق هدایت و تشعشع را نشان می‌دهد. در این شکل، غلبه انرژی انتقال یافته از طریق هدایت حرارتی به بالادست نسبت به تشعشع کاملاً مشهود است. در این نمودار برای هر ۵ مورد تحت مطالعه، میزان شار انرژی انتقال یافته چه از طریق هدایت و چه از طریق تشعشع محاسبه و ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش انرژی انتقال یافته از طریق هدایت حرارتی با افزایش ضخامت پوسته اتفاق افتاده است که به دلیل افزایش سطح مقطع انتقال حرارت مربوط به هدایت و کاهش دمای پوسته مربوط به تشعشع می‌باشد. از اینرو در ضخامت‌های بالای پوسته، می‌توان با تقریب خوبی از انتقال حرارت تشعشع در برابر هدایت صرف‌نظر نمود. مسئله حائز اهمیت در اینجا با توجه به افزایش ضخامت پوسته، خطر نشت حرارتی به اجزاء حساس مانند شیرهای کنترل تراست و غیره می‌باشد.

در شکل ۱۵ مقایسه میانگین دمای دیواره محفظه تخلیه و نازل با دیواره محفظه تجزیه صورت گرفته است. بررسی نمودار در همه ۵ مورد تحت مطالعه حاکی از این است که میانگین دمای بخش نازل شامل محفظه تخلیه و نازل بیشتر از محفظه تجزیه است. هرچند که واکنش‌ها در محفظه تجزیه رخ داده است، اما دمای محفظه تخلیه و نازل بالاتر است، زیرا شار حرارت از محفظه تجزیه در حال نشت کردن به بالادست از طریق انتقال حرارت هدایت بوده است.



شکل ۱۴- کل شار انرژی انتقال یافته از طریق هدایت و تشعشع در همه ۵ مورد تحت مطالعه

Figure 15 - Total energy flux transferred through conduction and radiation in all 5 cases under study



شکل ۱۵- مقایسه میانگین سطحی دمای دیواره محفظه تخلیه و نازل با دیواره محفظه تجزیه در هر ۵ مورد تحت مطالعه
 Figure 16 - Comparison of the averaged area temperature of the discharge chamber wall and nozzle with the decomposition chamber wall for all cases under study

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، تجزیه تک پیشرانه هیدرازین روی بستر کاتالیستی متشکل از گرانول های آلومینا که با فلز فعال ایریدیوم پوشش داده شده اند در یک رانشگر تک پیشرانه، از طریق شبیه سازی در مقیاس حفره ها، با هدف بررسی اثرات ضخامت دیواره رانشگر بر پارامترهای عملکردی و انتقال حرارت رانشگر تحلیل گردید. به علت غلبه تجزیه کاتالیستی، واکنش های شیمیایی که از نوع سطحی هستند با افزایش ضخامت دیواره، تقریباً هیچ تاثیری نمی پذیرند و بنابراین در میزان تجزیه هیدرازین تفاوت محسوسی اتفاق نمی افتد. تفاوت در دمای جریان داخل محفظه تجزیه بسیار ناچیز است ولی در محفظه تخلیه نازل در این ۵ مورد تحت مطالعه از ضخامت دیواره ۱ تا ۵ میلی متر، اختلافات دمای جزئی دیده می شود. تغییرات در دمای پوسته نسبت به جریان در این ۵ مورد تحت مطالعه، محسوس می باشد که علت این امر تاثیر انتقال حرارت می باشد. هر چقدر ضخامت پوسته کمتر است، دمای روی پوسته بالاتر است. عدم تفاوت در سرعت جریان در ۵ مورد تحت مطالعه، در نتیجه عدم تفاوت در توزیع گونه های شیمیایی و تفاوت اندک در میدان دما می باشد که به معنای عدم تفاوت در میزان تراست است. به علت عدم تفاوت در ضریب تخلخل و شکل ذرات کاتالیست و در نتیجه ضریب گذردهی محیط متخلخل، کانتورهای فشار نیز تفاوتی با هم نمی کنند.

نتایج نشان داد که بیشینه نرخ شار حرارتی تشعشع با افزایش ضخامت پوسته رانشگر، در این بازه ضخامت دیواره تا حدود سه برابر رو به کاهش می رود. بیشینه میزان شار حرارتی تشعشع در انتهای محفظه تجزیه رخ داده است. با افزایش ضخامت پوسته، به دلیل کاهش دمای دیواره و همچنین وابستگی قوی شار حرارتی تشعشع به دمای دیواره، افت چشمگیر شار حرارتی اتفاق افتاده است. از طرفی کاهش شار حرارتی هدایت در پی افزایش ضخامت پوسته رخ داده است. جنس انتقال حرارت غالب در مسئله فعلی، از نوع هدایت با نشت حرارت به بالادست می باشد به طوری که میزان حرارت نشت کرده هدایتی به بالادست، نسبت به شدت انتقال حرارت تشعشعی از مرتبه تا ۱۰۰۰ برابر بزرگتر است. توان هدایت حرارتی در یک رانشگر بسیار وابسته به ضخامت گوشت دیواره رانشگر می باشد. در نتیجه از این منظر، افزایش ضخامت پوسته سبب افزایش بار مزاحم حرارتی (نشت حرارت) بر روی سامانه کنترل حرارت می گردد. افزایش این نوع بار حرارتی، روی مدار تغذیه به ویژه اجزاء حساس مانند شیرهای کنترل تراست اثر نامطلوب دارد.

درجه بزرگی بار حرارتی هدایت از تشعشع خیلی بیشتر است، لذا جمع بندی بحث این نتیجه را می رساند که ضخیم نمودن دیواره نازل راهکار مطلوبی نمی باشد. افزایش ضخامت پوسته سبب افزایش وزن رانشگر می شود که این عاملی محدودکننده است. بنابراین جهت کنترل بیشینه دما و متعاقب آن کنترل نشت حرارت به بالادست، یک شرایط بینابینی باید رعایت گردد که قید محدودیت وزن را نیز ارضاء نماید.

مراجع

[1] B.W. Schmitz, W.W. Smith, D.A. Williams, D. Maybee, Design and Scaling Criteria for Monopropellant Hydrazine Rocket Engines and Gas Generators Employing Shell 405 Catalyst, in: AIAA Second Propulsion Joint Specialist Conference, Colorado Springs, Colorado, (1966).

[2] A.S. Kersten, Analytical Study of Catalytic Reactors for Hydrazine Decomposition, Technical Rep., NASA UARL G., (1969), 7-458.

- [3] A.S. Kersten, Analytical and Experimental Studies of the Transient Behaviour of Catalytic Reactor for Hydrazine Decomposition, Technical Rep., UARL Contract NAS., (1967), 459-960.
- [4] V. Shankar, A.K. Anantha Ram, K. A. Bhaskaran, Prediction of the Concentration of Hydrazine Decomposition Products Along a Granular Catalytic Bed, *Acta Astronautica*, 11(6), (1984), 287–299.
- [5] CH. Hwang, S.N. Lee, S.W. Baek, C.Y. Han, S.K. Kim, M.J. Yu, Effects of Catalyst Bed Failure on Thermo Chemical Phenomena for a Hydrazine Monopropellant Thruster Using Ir/Al₂O₃ Catalysts, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51(15), (2012), 5382–5393.
- [6] M.R. Salimi, H. Karimaei, Making Catalyst and Preparing Catalyst Bed for Hydrazine Decomposition in Low-Thrust Monopropellant Thrusters, *J. Technol. Aerospace Eng.*, 2(1), (2019), 17-25 (In Persian).
- [7] Sh. Pakdehi, F. Shirvani, R. Zolfaghari, A Thermodynamic Study on Catalytic Decomposition of Hydrazine in a Space Thruster, *Arch. Thermodyn.*, 40(4), (2019), 151-166.
- [8] L. Chen, R. Zhang, Q. Kang, W.Q. Tao, Pore-scale study of pore-ionomer interfacial reactive transport processes in proton exchange membrane fuel cell catalyst layer, *Chemical Engineering Journal*, 39(1), (2020), 123590-9.
- [9] M. Farzaneh, H. Ström, F. Zanini, S. Carmignato, S. Sasic, D. Maggiolo, Pore-scale transport and two-phase fluid structures in fibrous porous layers: Application to fuel cells and beyond, *Transport in Porous Media*, 136(1), (2021), 245-270.
- [10] B.L. Rhodes, E.R. Ulrich, P.D. Ronney, Small-Scale Hydrogen Peroxide Vapor Propulsion System: Catalyst Performance and Heat Transfer, In *AIAA Propulsion and Energy Conference*, (2019 Forum), 4029-4038.
- [11] J.R. Asencio, R.I. Savonov, and R.I. Marques, An Open-source Solver to Model the Catalytic Decomposition of Monopropellants for Space Thrusters, *Journal of Aerospace Technology and Management*, 12(1), (2020), 11-20.
- [12] D.C. Sun, J. Liu, and W.B. Xiang, Numerical simulation of the transient process of monopropellant rocket engines, *Aerospace Science and Technology*, 10(3), (2020), 105921-9.
- [13] S. Jung, S. Choi, S. Heo, S. Kwon, Scaling of catalyst bed for hydrogen peroxide monopropellant thrusters using catalytic decomposition modeling, *Acta Astronautica*, 187(1), (2021), 167-180.
- [14] A. Pasini, L. Torre, L. Romeo, A. Cervone, L. d'Agostino, Reduced-order model for H₂O₂ catalytic reactor performance analysis, *Journal of Propulsion and Power*, 26(3), (2010), 446-453.
- [15] M.R. Salimi, H. Karimaei, M. Gholampour Yazdi, Numerical Study of Catalyst Bed Performance of a Monopropellant Thruster Under Influence of Porosity Coefficient, *Amir Kabir Journal of Mechanical Engineering*, 54 (7), (2022), 1607-1622.
- [16] M.R. Salimi, H. Karimaei, M. Gholampour Yazdi, Investigation of the Effect of Catalyst Granule Diameter on the Performance of Decomposition Chamber of a Hydrazine Catalytic Thruster, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 34(4), (2023), 33-46.
- [17] M.R. Salimi, H. Karimaei, M. Gholampour Yazdi, Numerical Modeling and Parametric Analysis of Performance of a Monopropellant Thruster Using a Single-Part Catalyst Bed Model, *Combustion Theory and Modelling*, 28(1), (2024), 36-64.
- [18] Z.G. Gao, G.X. Li, T. Zhang, X.H. Liu, Z.H. Wang, X. Liu, Numerical simulation for the decomposition of DT-3 in a monopropellant thruster, *Aerospace Science and Technology*, 74(1), (2018), 132-144.

Heat Transfer Analysis of a Catalytic Monopropellant Thruster Under the Influence of Wall Thickness

Mohammad Reza Salimi¹, Hadiseh Karimaei^{2*}

1 and 2- Aerospace Research Institute, Ministry of Science Research and Technology

*karimaei@ari.ac.ir

Abstract

Thermal control of a space system is essential for optimal performance and mission success. In this paper, the decomposition chamber of a catalytic monopropellant thruster has been numerically simulated at the pore scale. The effect of this wall thickness, 1-5 mm, on radiation heat transfer and conduction has been investigated. The importance of the maximum temperature in the structural considerations of the thruster, on the one hand, and the increase in the weight of the thruster due to the increase in the thickness of the wall to reduce the maximum temperature on the other hand, make the simultaneous evaluation of these parameters inevitable. The results showed that as the thickness of the wall increases, a significant drop up to about three times in the radiation heat flux has occurred. The dominant type of heat transfer in the current problem is conduction. The heat soak back upstream is up to 1000 times greater than the intensity of radiative heat transfer. Increasing the thickness of the wall causes an increase in the heat soak back on the

thermal control system. The novelty is to investigate the geometric shape and wall thickness of a catalytic monopropellant thruster on the rate of radiation and conduction heat transfer to the upstream parts.

Keywords: Monopropellant thruster, Catalyst bed, Conduction, Radiation, Thermal control system (TCS).

*Corresponding Author E-mail: karimaci@ari.ac.ir