

مدل سازی، طراحی و ساخت راکتور بستر ثابت واکنش تجزیه کاتالیستی هیدرازین

مظفر سلیمی^۱، شهرام قنبری پاکدهی^{۲*}، علی اکبر شکران^۳

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، ۳- دکتری دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

(تاریخ وصول: ۹۸/۲/۳۱، تاریخ پذیرش: ۹۸/۴/۲)

چکیده

در این پژوهش، ابتدا مدل پایدار یک بعدی برای راکتور بستر ثابت کاتالیستی ارائه شده است. تمامی معادلات انتقال جرم، انتقال حرارت و مومنتوم با در نظر گرفتن فرضیات مناسب در این مدل لحاظ شده است. نتایج حاصل از مدل سازی، تغییرات دمایی، تغییرات غلظت مواد واکنش و افت فشار در طول راکتور را پیش بینی می کند. در ادامه، با استفاده از داده های مدل سازی، طراحی راکتور تجزیه کاتالیستی هیدرازین انجام شد. این طراحی با در نظر گرفتن تراست و ضربه ویژه آغاز و با محاسبه قطر بستر ادامه پیدا می کند. در روند طراحی، با در نظر گرفتن طول بستر به دست آمده از مدل سازی و همچنین حدس فلاکس جرمی، میزان تفکیک آمونیاک محاسبه می شود. در نهایت، راکتور طراحی شده ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش ها، حداکثر دمای راکتور برابر با ۶۵۰ سلسیوس، میزان تفکیک آمونیاک معادل ۵۹٪ و افت فشار برابر ۱/۳ bar بودند که تطابق مناسبی را با داده های مدل سازی نشان دادند.

واژه های کلیدی: راکتور بستر ثابت، مدل سازی، طراحی راکتور، تراستر، هیدرازین.

Modeling, Designing and Construction of the Hydrazine Decomposition Fixed-Bed Reactor

M. Salimi, Sh. Ghanbari Pakdehi*, A. Shekarian

Malek Ashtar University of Technology, Tehran

(Received: 5/21/2019, Accepted: 6/23/2019)

Abstract

In this research, firstly, a one-dimensional steady state model for a catalytic fixed bed reactor is presented. All mass transfer, heat transfer and momentum equations are considered in this model, applying appropriate assumptions. The results of modeling predict temperature and concentration changes and also pressure drop along the reactor bed length. By applying the modeling, hydrazine catalytic reactor was designed. The design procedure includes thrust and specific impulse and continues with calculation of the bed diameter. Ammonia dissociation and the mass flux were calculated along the length of the bed. Finally, the reactor was designed and tested. In these tests, the maximum reactor temperature was 650 °C, the ammonia dissociation was 59% and the pressure drop was 1.3 bar, presenting a good coherency with the modeling data.

Keywords: Fixed-bed Reactor, Modeling, Reactor Design, Thruster, Hydrazine.

۱- مقدمه

بین، فلزاتی مانند پلاتین، پالادیوم، روتنیوم، نیکل و ایریدیوم به‌عنوان فلز فعال و اکسید آلومینوم و سیلیکا، به‌عنوان پایه پیشنهاد شده‌اند [۸-۱۳]. تحقیقات ثابت کرده‌اند که کاتالیست با فلز فعال ایریدیوم بر پایه گاما - آلومینا بهترین گزینه برای تجزیه کاتالیستی هیدرازین در تراستر به حساب می‌آید. یکی از علل برتری این کاتالیست، فعالیت و هدایت‌پذیری گرمایی بالای آن است [۱۴]. از طرف دیگر، کاتالیست با جزء فعال ایریدیوم می‌تواند تأثیر زیادی در کنترل سرعت تجزیه آمونیاکی که در طول واکنش تولید می‌شود، داشته باشد [۱۵].

در مراجع، واکنش کلی تجزیه هیدرازین به دو صورت واکنش (۱) و (۲) بیان شده است [۱۸-۱۶]:



واکنش (۱) که واکنش تجزیه هیدرازین است، بسیار سریع رخ می‌دهد و گازهای نیتروژن، هیدروژن و آمونیاک تولید می‌کند. همان‌طور که مشخص شده است، این واکنش گرمازا بوده و تولید گرمای بسیاری می‌کند. گاز تولید شده در این واکنش، به دلیل تولید حجم بسیار زیاد و همچنین انبساط به دلیل وجود گرمای زیاد، باعث افزایش فشار راکتور می‌شود.

به‌طور کلی، واکنش (۱) به دلیل سرعت بسیار زیاد آن، نمی‌تواند کنترل‌کننده سرعت واکنش باشد. از طرف دیگر، واکنش (۲) که واکنش تجزیه آمونیاک است، به دلیل دارا بودن ثابت سرعت کمتر نسبت به واکنش (۱) و همچنین تعادلی بودن، واکنش کندی است. در حقیقت این واکنش، کنترل سرعت کلی را در دست دارد. بدین ترتیب، مرکز توجه برای واکنش تجزیه هیدرازین، واکنش (۲) است. این موضوع حتی در انتخاب جزء فعال کاتالیستی نیز اهمیت زیاد خود را نشان می‌دهد [۱۶].

مقالات مختلفی در زمینه تراسترهای هیدرازینی منتشر شده‌اند. پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که اکثر مقالات منتشر شده در این زمینه به بحث ساخت و ارزیابی کاتالیست پرداخته‌اند [۲۳-۱۹، ۱۶ و ۳].

اولین مطالعه موجود در زمینه تجزیه و تحلیل عددی تراستر کاتالیستی هیدرازینی توسط کِستِن [۲۴] در سال ۱۹۶۷ تحت یک گزارش سالانه در ناسا منتشر شد. در این گزارش، عملکرد یک راکتور کاتالیستی تجزیه هیدرازین با کاتالیست شل ۴۰۵ به صورت ریاضی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بر طبق نتایج این تحقیق، معادلات حاکم در فاز جامد و فاز گاز نشان دادند که دیدگاه تجزیه و تحلیل راکتور باید به صورت یک محیط متخلخل تک بعدی باشد.

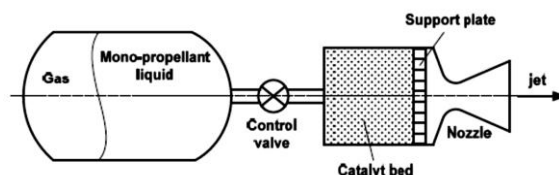
کرسپو [۲۵] در سال ۱۹۷۶ در طی یک گزارش در اسپانیا، ضربه ویژه یک تراستر هیدرازینی را بر مبنای تجزیه آمونیاک مورد محاسبه قرار داد. همچنین وی رابطه‌ای برای نسبت‌های تجزیه آمونیاک و هیدرازین

امروزه توانایی کنترل و هدایت سامانه‌های فضایی از جمله ماهواره‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. به‌عنوان نمونه، اگر حرکت ماهواره در فضا کنترل نشود، پس از گذشت مدت زمان به نسبت کوتاهی، به دلیل عدم توانایی در کنترل وضعیت و مدار، عمر ماهواره به پایان خواهد رسید. از این رو، استفاده از سامانه‌های پیشرفته‌تری و توسعه آن‌ها، امری ضروری در صنعت فضایی به حساب می‌آید.

امروزه سامانه‌های مختلفی جهت کنترل و هدایت ماهواره‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. هر کدام از این سامانه‌ها با توجه به ویژگی‌های خود، زمینه به‌کارگیری مختص خود را دارا هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهند یکی از بهترین سامانه‌ها جهت کنترل دقیق وضعیت ماهواره و همچنین انجام مانورهای مداری، تراستر تک‌پیشران هیدرازینی است [۴-۱]. ویژگی‌های خاص این سامانه از جمله تراست و ضربه ویژه آن می‌تواند به‌کارگیری آن را به‌عنوان یک سامانه پیشرفته با قابلیت مانور بالا، توجیه نماید.

ماده اصلی که به‌عنوان خوراک در یک سامانه تک‌پیشران هیدرازینی مورد استفاده قرار می‌گیرد، هیدرازین است. پایدار شیمیایی و حرارتی، خواص فیزیکی و ویژگی‌های احتراقی مناسب از جمله مهم‌ترین خواص هیدرازین به‌عنوان یک تک‌پیشران به حساب می‌آیند [۵].

یک سامانه پیشرفته کاتالیستی هیدرازینی از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، این سامانه متشکل از مخزن خوراک، شیر کنترل، بستر کاتالیستی (محفظه واکنش) و نازل است [۶].



شکل ۱- ساختار سامانه پیشران کاتالیستی هیدرازین.

مهم‌ترین قسمت در یک تراستر هیدرازینی، راکتور کاتالیستی آن است که در آن هیدرازین، واکنش داده و گازهایی با دمای بالا تولید می‌شوند. این گازها پس از عبور از نازل، نیرویی ایجاد می‌کنند که می‌توان از آن جهت پیشران استفاده نمود [۷].

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری در زمینه ساخت و استفاده از کاتالیست‌های مختلف در سامانه تک‌پیشران هیدرازین انجام شده و یا در حال انجام است که این خود نشان از اهمیت و ضرورت موضوع دارد. کاتالیست‌های مختلفی برای تجزیه هیدرازین پیشنهاد شده‌اند. در این

ساخت راکتور مورد نظر است. مدل سازی راکتور بستر ثابت به صورت پایا و یک بعدی در جهت طولی راکتور انجام شده است. فرض در نظر گرفتن تغییرات شعاعی به دلیل نسبت بالای طول به شعاع راکتور بسیار مناسب است. کاتالیست مورد استفاده در داخل راکتور به صورت کروی و به صورت همگن^۱ در داخل راکتور توزیع شده است. روابط (۳) و (۴) سینتیک این واکنش را در مجاورت کاتالیست ایریدیوم بر پایه گاما - آلومینا نشان می دهند [۱۷]:

$$r_1 = 1.0 \times 10^{10} e^{\left(\frac{-2777.78}{T}\right)} C_{N_2H_4} = k_1 C_{N_2H_4} \quad (3)$$

$$r_2 = 1.0 \times 10^{14} e^{\left(\frac{-2777.78}{T}\right)} \frac{C_{NH_3}}{C_{H_2}^{1.6}} = k_2 \frac{C_{NH_3}}{C_{H_2}^{1.6}} \quad (4)$$

که در این روابط، r_1 و r_2 سرعت واکنش و k_1 و k_2 ثابت های سرعت برای واکنش اول و دوم هستند.

همان طور که در فرض های مربوط به مدل سازی این بخش اشاره شد، مدل در حالت همگن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به منظور اینکه مدل به حالت همگن نزدیک گردد، لازم است تا در صورت تأثیر مشخص ضرایب انتقال جرم در محاسبات سینتیکی، این ضرایب نیز در ثابت سرعت در نظر گرفته شوند. به طور کلی، اگر واکنش سریع اتفاق بیفتد، نرخ انتقال جرم به سطح، محدود کننده نرخ واکنش کلی است. در عوض، در واکنش های کند، ثابت سرعت واکنش نقش اصلی را ایفا کرده و کنترل کننده واکنش است [۲۸].

با توضیحات بند قبل، فرض می شود که ضریب انتقال مؤثر (k_{eff}) به جای هر کدام از ثوابت k_1 و k_2 استفاده می شود. دارید:

$$k_{eff} = \frac{k_f k_c^*}{k_c^* + k_r} \quad (5)$$

در واکنش اول (معادله (۳)) که یک واکنش سریع است، $k_r \gg k_c^*$ است. در این واکنش، مقاومت انتقال جرم در محیط خارجی دانه های کاتالیست اتفاق می افتد. به عبارت دیگر:

$$\frac{k_c^*}{k_r} \ll 1 \quad (6)$$

بنابراین:

$$k_1 = k_{eff} \approx k_c^* \quad (7)$$

بدین ترتیب برای محاسبه k_c^* لازم است تا ضریب انتقال جرم در راکتور بستر ثابت (k_c) از رابطه (۸) استفاده می شود [۲۹].

$$\left[\frac{\phi}{(1-\phi)\gamma} \frac{k_c A_s D_p}{D_{AB}} \right] = 1.0 \left(\frac{UD_p \rho}{\mu(1-\phi)\gamma} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu}{\rho D_{AB}} \right)^{1/2} \quad (8)$$

که در رابطه (۸)، k_c ضریب انتقال جرم، D_{AB} ضریب نفوذ فاز گازی، U سرعت ظاهری گاز، d_p قطر کاتالیست، γ فاکتور شکل^۳ (معادل قطر کره در حجم یکسان) و ϕ کسر خالی^۴ راکتور بستر ثابت که بستگی به قطر پیشراشه و ابعاد کاتالیست های به کار رفته داشته و به طور معمول بین $0.45 - 0.7$ در نظر گرفته می شود [۳۰]. A_s نیز سطح ویژه بستر کاتالیستی است که از رابطه (۹) به دست می آید:

پیشنهاد داد. بر مبنای فرضیه این محقق، ناحیه ای به عنوان ناحیه تبخیر هیدرازین پیش از تماس هیدرازین با بستر کاتالیستی در نظر گرفته شد. اکلاف و دینر [۲۶] در سال ۱۹۸۹ در مقاله ای، مدل سازی و شبیه سازی تراستر هیدرازینی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. این محققان، سینتیک تجزیه کاتالیستی هیدرازین را در یک تراستر ۲۰ نیوتنی با در نظر گرفتن دو مسیر مختلف برای انجام واکنش کاتالیستی جهت تولید آمونیاک به عنوان محصول میانی، مورد بررسی قرار دادند. همچنین موازنه انتقال حرارت و بررسی رفتار دمایی سامانه نیز در این مدل سازی مورد توجه قرار گرفت. آن ها نتایج حاصل از مدل سازی خود را با تحلیل دمای دیواره راکتور در محل های مشخص مورد ارزیابی قرار دادند.

از جمله تحقیقاتی که در زمینه مدل سازی تراسترهای کاتالیستی تک پیشراشه انجام پذیرفته است، می توان به مقاله گولاتی و بارث [۲۷] اشاره کرد. استفاده از معادلات پیوستگی و اولر جهت تحلیل دبی ورودی، استخراج معادله سیالاتی حاکم بر اریفیس انژکتور و همچنین اعمال موازنه انتقال حرارت بر روی بستر کاتالیستی، از جمله مواردی است که در این مقاله به آن ها اشاره شده است. نتایج حاصل از این تحقیق منجر به ارائه روابطی جهت محاسبه میزان اتلاف حرارت در بستر کاتالیستی، دما در بستر کاتالیستی، تغییرات انرژی درونی در بستر کاتالیستی، محاسبه دبی حجمی و جرمی خروجی از شیر کنترل کننده جریان و در نهایت مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج تجربی شده است. بررسی مقالات و پژوهش های انجام گرفته در زمینه مطالعه رفتار راکتور کاتالیستی تجزیه هیدرازین نشان می دهد که در هیچ کدام از تحقیقات منتشر شده، استفاده از داده های حاصل از مدل سازی و یا شبیه سازی به منظور طراحی راکتور مورد استفاده در یک تراستر با شرایط عملیاتی نزدیک به شرایط واقعی انجام نشده است. به بیان دیگر، استفاده از ابزار مدل سازی ریاضی می تواند منجر به حصول داده هایی شود که می توان با تحلیل آن ها، معیارها و الزامات لازم جهت طراحی محفظه واکنش یک تراستر را انجام داد.

هدف از انجام این پژوهش، انجام یک مدل سازی ریاضی برای پیش بینی رفتار یک راکتور بستر ثابت کاتالیستی در طی انجام واکنش تجزیه هیدرازین است. نتایج حاصل از این مدل سازی، اطلاعات اولیه و ضروری را جهت طراحی و ساخت یک راکتور تجزیه کاتالیستی هیدرازین به عنوان بخش اصلی یک تراستر ارائه می کند. با توجه به ماهت طراحی این سامانه، الگوریتمی جهت اجرای گام به گام طراحی راکتور یک تراستر هیدرازینی ارائه شده است.

۲- معادلات مدل

هدف از انجام مدل سازی، بررسی رفتار یک راکتور تجزیه کاتالیستی هیدرازین و استخراج داده ها و اطلاعات مورد نیاز جهت طراحی و

1- Homogeneous
2- Superficial Gas Velocity
3- Shape Factor
4- Void Fraction

$$k_{O_2} e^{-\left(\frac{E_2}{RT}\right)} \left(\frac{P_T}{F_T RT}\right)^{-0.6} \frac{F_{NH_3}}{F_{H_2}^{1.6}} A_c \quad (22)$$

$$\frac{dF_{N_2}}{dz} = \left(\frac{1}{2} \times k_{O_1} e^{-\left(\frac{E_1}{RT}\right)} \frac{P_T}{F_T RT} F_{N_2} H_4 + \frac{1}{2} \times k_{O_2} e^{-\left(\frac{E_2}{RT}\right)} \left(\frac{P_T}{F_T RT}\right)^{-0.6} \frac{F_{NH_3}}{F_{H_2}^{1.6}} A_c\right) \quad (23)$$

با موازنه انرژی برای حالت پایدار، رابطه (۲۴) به دست می آید:

$$\frac{dT}{dz} = \frac{-r_1 \Delta H_1 - r_2 \Delta H_2}{F_{N_2} H_4 C_{N_2} H_4 + F_{NH_3} C_{PNH_3} + F_{N_2} C_{PN_2} + F_{H_2} C_{PH_2}} A_c \quad (24)$$

C_{Pi} تابعی بر حسب دما است که در جدول (۱) معادلات مرتبط با آن ارائه شده است. همچنین ΔH ، آنتالپی واکنش است که مقادیر آن در روابط (۱ و ۲) مشخص شده است.

جدول ۱- معادلات C_p [۳۱].

رابطه C_p (J/gmol.K)
$C_p = 35.15 + 2.954 \times 10^{-2} T + 0.4421 \times 10^{-5} T^2 - 6.686 \times 10^{-9} T^3$
$C_p = 28.84 + 0.00765 \times 10^{-2} T + 0.3288 \times 10^{-5} T^2 - 0.8698 \times 10^{-9} T^3$
$C_p = 29.00 + 0.2199 \times 10^{-2} T + 0.5723 \times 10^{-5} T^2 - 2.871 \times 10^{-9} T^3$
$C_p = 9.768 + 0.1894 T - 0.0001657 T^2 + 6.02 \times 10^{-8} T^3$

همواره در راکتورهای بستر ثابت به دلیل وجود کاتالیست با اشکال مختلف و همچنین تخلخل موجود در بستر، افت فشار پارامتر مهمی محسوب می شود. در تحقیقات ثابت شده است که بهترین رابطه جهت محاسبه افت فشار، رابطه ارگان^۱ است. این رابطه ارگان در معادله (۲۵) ارائه شده است [۳۲]:

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{2G}{\rho r_p} \left(\frac{1-\phi}{\phi^3}\right) \left[\frac{300(1-\phi)\mu_m}{r_p} + 1.75G\right] \quad (25)$$

در رابطه (۲۵)، P فشار کلی راکتور، ϕ کسر ته راکتور^۲، r_p شعاع دانه های کاتالیستی در راکتور، μ_m گرانیوی مخلوط گازی، ρ چگالی مخلوط گازی و G سرعت ظاهری جرمی^۳ است.

همان طور که در معادله ارگان مشخص است، لازم است تا چگالی و گرانیوی مخلوط گازی محاسبه شود. مقدار چگالی مخلوط گازی با محاسبه میانگین چگالی مخلوط گاز در هر مرحله از محاسبات رایانه ای را می توان به دست آورد. اما این روش برای محاسبه گرانیوی مخلوط مناسب ناست؛ چرا که احتمال می رود خطای بسیار بزرگی در محاسبه گرانیوی با این روش به دلیل حضور گاز هیدروژن رخ دهد. بدین ترتیب، از روش ویلک^۴ برای محاسبه گرانیوی مخلوط گازی استفاده شده است [۳۳]. محاسبات در این روش نیز به صورت مرحله ای و برای هر غلظت اجزای گاز محاسبه می گردد:

$$\eta_m = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \eta_i}{\sum_{j=1}^n y_j \phi_{ij}} \quad (26)$$

$$\phi_{ij} = \frac{[1 + (\eta_i / \eta_j)^{0.5} (M_j / M_i)^{0.25}]^2}{[8(1 + (M_i / M_j))]^{0.5}} \quad (27)$$

$$A_s = 12 \frac{1-\phi}{d_p} \quad (9)$$

رابطه ضریب نفوذ مؤثر از رابطه (۱۰) به دست می آید:

$$k_c^* = k_c \times A_s \quad (10)$$

در مورد واکنش دوم، از آنجا که واکنش کند است، بنابراین: $k_r \ll k_c^*$. در این واکنش، مقاومت انتقال جرم درون کاتالیست اتفاق می افتد. به عبارت دیگر:

$$\frac{k_c^*}{k_r} \gg 1 \quad (11)$$

بنابراین:

$$k_2 = k_{eff} \approx k_r \quad (12)$$

معادلات جزء مولی در راکتور برای اجزای شرکت کننده در واکنش طبق رابطه (۱۳) به دست می آید:

$$\frac{dF_i}{dz} = \pm r_i A_c \quad (13)$$

A_c سطح ورودی به راکتور است. هیدرازین با سرعت بالا تجزیه می شود؛ بنابراین علامت ترم سرعت واکنش منفی خواهد بود:

$$\frac{dF_{N_2 H_4}}{dz} = -A_c k_1 C_{N_2 H_4} \quad (14)$$

از آنجایی که ضرایب استوکیومتری آمونیاک و هیدرازین در واکنش اول یکسان است، بنابراین سرعت واکنش تولید آمونیاک با سرعت تجزیه هیدرازین برابر خواهد بود. اما از طرفی، آمونیاک در واکنش دوم تجزیه می شود. بنابراین ترم سرعت در معادله موازنه مولی به صورت معادله های (۱۷-۱۵) خواهد بود:

$$\frac{dF_{NH_3}}{dz} = \left(k_1 C_{N_2 H_4} - k_2 \frac{C_{NH_3}}{C_{H_2}^{1.6}}\right) A_c \quad (15)$$

$$\frac{dF_{H_2}}{dz} = \left(\frac{1}{2} \times k_1 C_{N_2 H_4} + \frac{3}{2} \times k_2 \frac{C_{NH_3}}{C_{H_2}^{1.6}}\right) A_c \quad (16)$$

$$\frac{dF_{N_2}}{dz} = \left(\frac{1}{2} \times k_1 C_{N_2 H_4} + \frac{1}{2} \times k_2 \frac{C_{NH_3}}{C_{H_2}^{1.6}}\right) A_c \quad (17)$$

همان طور که در روابط (۱۷-۱۵) مشخص است، ترم های غلظت در معادلات وجود دارند که باید این ترم ها به صورت مولی تبدیل شوند. از طرف دیگر، چون در طول راکتور تولید و مصرف گاز وجود دارد، باید در معادلات از تأثیرات فشار راکتور بهره برد. بنابراین با استفاده از این فرض که گازهای موجود در واکنش ایده آل هستند، می توان روابط بالا را به صورت معادله های (۱۸ و ۱۹) بازنویسی نمود:

$$C_i = \frac{F_i}{V} = \frac{P_T}{F_T RT} F_i \quad (18)$$

$$F_T = F_{N_2 H_4} + F_{NH_3} + F_{H_2} + F_{N_2} \quad (19)$$

در روابط (۱۸ و ۱۹)، P_T فشار راکتور و F_T مول کلی موجود است که از مجموع جمع مول های هیدرازین، آمونیاک، هیدروژن و نیتروژن به دست می آید. همچنین T دمای راکتور و R نیز ثابت گازها است.

بنابراین روابط نهایی مربوط به موازنه مولی به صورت روابط (۲۰-۲۳) نوشته می شوند:

$$\frac{dF_{N_2 H_4}}{dz} = -k_{O_1} e^{-\left(\frac{E_1}{RT}\right)} \frac{P_T}{F_T RT} F_{N_2 H_4} A_c \quad (20)$$

$$\frac{dF_{NH_3}}{dz} = \left(k_{O_1} e^{-\left(\frac{E_1}{RT}\right)} \frac{P_T}{F_T RT} F_{N_2 H_4} - k_{O_2} e^{-\left(\frac{E_2}{RT}\right)} \left(\frac{P_T}{F_T RT}\right)^{-0.6} \frac{F_{NH_3}}{F_{H_2}^{1.6}} A_c\right) \quad (21)$$

$$\frac{dF_{H_2}}{dz} = \left(\frac{1}{2} \times k_{O_1} e^{-\left(\frac{E_1}{RT}\right)} \frac{P_T}{F_T RT} F_{N_2 H_4} + \frac{3}{2} \times k_{O_2} e^{-\left(\frac{E_2}{RT}\right)} \left(\frac{P_T}{F_T RT}\right)^{-0.6} \frac{F_{NH_3}}{F_{H_2}^{1.6}} A_c\right)$$

1- Ergun Equation
 2- Void Fraction
 3- Superficial Mass Velocity
 4- Wilk's Method

جدول ۴- شرایط عملیاتی و مقادیر در آزمایش های راکتور پیشرانه.

پارامتر	تعریف پارامتر	واحد	مقدار در نظر گرفته شده
ρ	چگالی کاتالیست	Kg/m ³	۲۰۰۰
L	طول راکتور	m	۰/۰۷۶
D _i	قطر راکتور	m	۰/۰۱۲۷
D _p	قطر ذرات کاتالیستی	m	۰/۰۱۸
ϵ	کسر خالی راکتور	--	۰/۳
G _{N₂H₄}	شار جرمی ورودی هیدرازین	Kg.m ³ sec	۱۴/۶۴۷
F _{NH₃O}	دبی مولی ورودی آمونیاک	gmol.sec ⁻¹	صفر
F _{H₂O}	دبی مولی ورودی هیدروژن	gmol.sec ⁻¹	صفر
F _{N₂O}	دبی مولی ورودی نیتروژن	gmol.sec ⁻¹	صفر
T ₀	دما خوراک ورودی در راکتور	K	۵۰۰
P ₀	فشار ورودی راکتور	Pa	۷۴۰۰۰۰

۵- نتایج و بحث

شکل (۲) نتایج مدل ارائه شده برای تغییرات دمایی را نمایش می دهد. همان طور که مشخص است، دمای گازهای خروجی ابتدا تا حدود ۷۹۰°C بالا رفته و سپس در ادامه راکتور، دما تا حدود ۶۹۰°C افت می کند. همان طور که در شکل (۲) مشخص است، دما ابتدا به سرعت در ابتدای راکتور بالا می رود. دلیل این امر، سرعت بالای واکنش اول است. واکنش اول (تجزیه هیدرازین) یک واکنش گرماده بوده که با سرعت، تولید گرمای بسیار زیادی می کند. از طرف دیگر، واکنش دوم یک واکنش گرماگیر است که گرمای ایجاد شده در ابتدای راکتور (در طی واکنش اول)، باعث افزایش سرعت پیشرفت آن می شود. در حقیقت علاوه بر کاتالیست، گرمای ایجادی در واکنش اول در سرعت واکنش دوم مؤثر بوده است. در شکل (۲) مشخص است که در همان ابتدای راکتور به دلیل اینکه واکنش اول بسیار سریع انجام می شود آمونیاک به سرعت تولید شده و مواد اولیه واکنش دوم به سرعت تولید می شوند. بدین ترتیب واکنش دوم شروع می شود و چون این واکنش گرماگیر است، از گرمای راکتور می کاهد و بدین ترتیب همان گونه که در شکل (۲) مشخص است، دما به مرور کم می شود. با شروع واکنش دوم، حجم گاز هیدروژن و نیتروژن تولیدی به سرعت افزایش می یابد. نتایج حاصل از شکل (۲) نشان می دهد که در طول حدود ۵۰ میلی متر راکتور، دمای گاز به مقدار ثابت و مشخص ۶۹۰°C رسیده است. پیش بینی بالاترین دمای راکتور می تواند در انتخاب جنس فلز جهت ساخت راکتور نیز مؤثر باشد.

η_{im} گرانیوی مخلوط گازی، η_i گرانیوی ماده خالص i ، γ_i جزء مولی ماده خالص i و M_i جرم مولکولی ماده خالص i است. گرانیوی ماده خالص از رابطه (۲۸) محاسبه شده است:

$$\eta_i = \frac{(26.69MT)^{0.5}}{\sigma^2 \Omega} \quad (28)$$

در رابطه (۲۸)، σ قطر سخت اسپهر^۱ و Ω انتگرال تصادم^۲ است. مقادیر σ در جدول (۲) ارائه شده اند [۳۳] و مقدار Ω از رابطه (۲۹) محاسبه شده است:

$$\Omega = \frac{a}{T_b} + \frac{c}{eT_d} + \frac{e}{eT_f} \quad (29)$$

در رابطه (۲۹)، \bar{T} ، دمای بی بعد شده به دست آمده از (T/E_k) است. E_k نیز حداقل زوج انرژی پتانسیل^۳ است که از ثابت بولتزمن^۴ مشتق شده است. حداقل انرژی پتانسیل از رابطه پولینگ^۵ و همکاران دست آمده است که در جدول (۲) مشخص شده است. a ، b ، c ، d و e ثوابت انتگرال تصادم هستند که در جدول (۳) مشخص شده اند.

جدول ۲- مقادیر σ و E_k [۳۳].

ماده	σ (Å)	E_k (k)
آمونیاک	۲/۹	۵۵۸/۳
هیدروژن	۲/۹۲	۳۸
نیتروژن	۳/۶۲۱	۹۷/۵۳
هیدرازین	۱/۱	۱۰۰

۳- مقادیر اولیه

مقادیر اولیه جهت استفاده در روابط مدل سازی در جدول (۴) ارائه شده است. این اطلاعات، با استفاده از داده های موجود در مراجع مختلف استخراج شده اند.

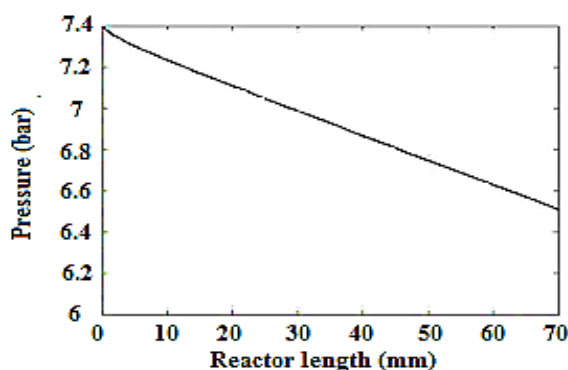
۴- حل معادلات

به دلیل پیچیده بودن حل معادلات، از روش عددی استفاده شده است. در این حل، لازم است تا پنج معادله دیفرانسیل به صورت عددی حل شدند. روش حل عددی رانج - کاتا برای حل معادلات دیفرانسیل برنامه نویسی و مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۳- ثوابت Ω [۳۳].

مقدار	ثابت ها
۱/۱۶۱۴۵	a
۰/۱۴۸۷۴	b
۰/۵۲۴۸۷	c
۰/۷۷۳۲۰	d
۲/۱۶۱۷۸	e
۲/۴۳۷۸۷	f

- 1- Hard Sphere Diameter
- 2- The Collision Integral
- 3- Minimum of Pair Potential Energy
- 4- Boltzmann Constant
- 5- Poling



شکل ۴- تغییرات فشار بستر در طول راکتور بستر ثابت تجزیه کاتالیستی هیدرازین.

۶- الگوریتم طراحی محفظه واکنش تراستر

اطلاعات به دست آمده از مدل سازی ریاضی از جمله تغییرات دما، ترکیب درصد اجزاء و فشار در طول راکتور می تواند به عنوان داده های اولیه و کمکی در طراحی محفظه واکنش تراستر به حساب آید. در ادامه لازم است تا طراحی نهایی مورد نظر با توجه به پارامترهای اصلی انجام پذیرد.

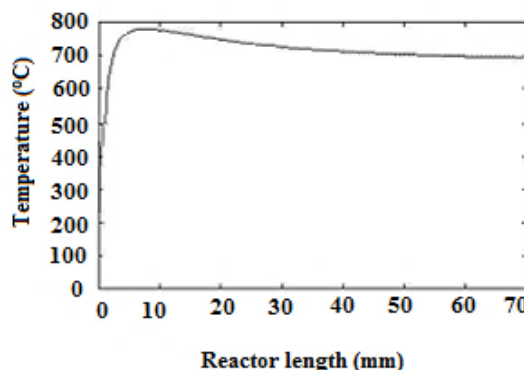
برای شروع طراحی، ابتدا باید الزامات طراحی مورد نظر را مشخص کرد. بدین منظور، دو پارامتر تراست (T) و ضربه ویژه (ISP) به عنوان دو پارامتر اصلی طراحی راکتور انتخاب می شوند. اولین پارامتری که بعد از تعیین پارامترهای مستقل مشخص می شود، دبی جرمی پیشرانده خواهد بود. دبی جرمی پیشرانده را می توان با استفاده از رابطه (۳۰) محاسبه کرد:

$$\dot{w} = \frac{F}{0.95 I_{sp}} \quad (30)$$

که در رابطه (۳۰)، F تراست و I_{sp} ضربه ویژه است. دبی پیشرانده یکی از دو پارامتری است که در تعیین قطر بستر استفاده خواهد شد. برای تعیین قطر بستر، باید میزان بارگذاری بستر و یا همان فلاکس جرمی (G) را نیز به دست آورد. این پارامتر در اصل کلیدی ترین پارامتر طراحی است که با تغییر آن، میزان بهینه پارامتر هدف (طول بستر) به دست خواهد آمد. با در نظر گرفتن مقدار اولیه این پارامتر برابر با $0.45 \text{ lbm/in}^2 \cdot \text{sec}$ و یا $0.31 \text{ gr/mm}^2 \cdot \text{sec}$ محاسبات ادامه پیدا کرده و می توان قطر بستر را با استفاده از رابطه (۳۱) محاسبه کرد:

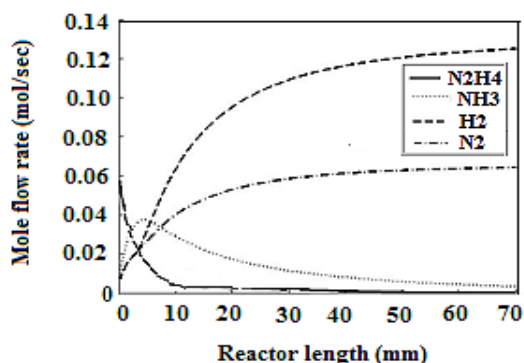
$$D_b = \sqrt{\frac{4 \dot{w}}{\pi G}} \quad (31)$$

پس از تعیین قطر بستر باید اقدام به محاسبه طول بستر نمود. از آنجا که محاسبه طول بستر نیازمند استفاده از روابط تجربی متناسب با شرایط سامانه است، بنابراین می توان با تقریب مناسبی از داده های حاصل از مدل سازی استفاده کرد. در انتخاب طول بستر با استفاده از داده های مدل سازی باید به میزان تفکیک آمونیاک، دما و فشار در انتهای این طول دقت کرد.



شکل ۲- نتایج مدل ارائه شده برای تغییرات دمایی در طول راکتور.

شکل (۳) تغییرات دبی مولی را برای مدل ارائه شده نشان می دهد. همان طور که در نمودار شکل (۳) مشخص است، دبی مولی آمونیاک در طول راکتور ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. با شروع واکنش تجزیه هیدرازین، آمونیاک درون راکتور تولید می شود؛ بنابراین دبی مولی آن افزایش می یابد. بلافاصله پس از تولید آمونیاک، واکنش تفکیک آن شروع شده و آمونیاک مصرف می شود. بنابراین دبی مولی آن کاهش می یابد. دبی مولی هیدروژن و نیتروژن هم به دلیل تولید مداوم آن ها در طی واکنش، به طور پیوسته افزایش پیدا می کند.



شکل ۳- نتایج مدل ارائه شده تغییرات دبی مولی برای مواد واکنش در طول راکتور.

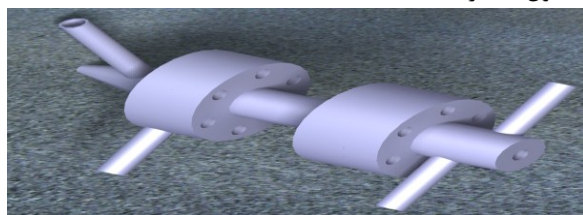
نکته دیگری که از شکل (۳) می توان برداشت کرد آن است که دبی مولی هیدرازین قبل از ۲۰ میلی متر ابتدایی راکتور به کم ترین مقدار خود می رسد. بنابراین در طولی بیش از این مقدار، هیدرازین در خروجی راکتور مشاهده نخواهد شد.

نمودار تغییرات فشار در طول بستر در شکل (۴) نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است، فشار در طول راکتور کاهش می یابد. با توجه به بستر کاتالیستی که در داخل راکتور وجود دارد، انتظار می رود که فشار کاهش بیشتری داشته باشد؛ اما با توجه به این موضوع که گازهای هیدروژن و نیتروژن تولیدی به سرعت و با حجم زیاد تولید می شوند، بدین ترتیب فشار را در داخل راکتور بالا می برند. تقابل این دو عامل فشاری (افت فشار بستر کاتالیستی و گاز پرفشار تولیدی) منجر به نمودار شکل (۴) می شود.

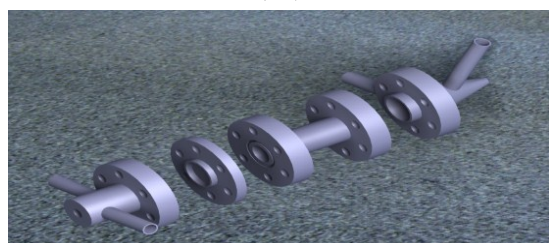
بر مبنای داده‌های نهایی حاصل از محاسبات، طراحی سه‌بعدی راکتور در نرم‌افزار سالیدورکز^۱ انجام گرفت. تصویر نمای کامل، نمای انفجاری و برش مقطعی راکتور طراحی شده در نرم‌افزار در شکل (۶) ارائه شده است. در نهایت، راکتور تراستر طراحی شده ساخته شد (شکل ۷). ساخت این راکتور، از جنس مناسب جهت مقاومت در برابر تنش‌های حرارتی، تحمل فشار محفظه و مقاوم در برابر خوردگی استفاده شد.

۷- آزمایش‌های راکتوری

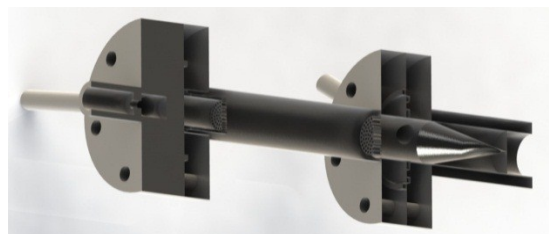
پس از ساخت راکتور مورد نظر، آزمایش‌های راکتوری به منظور ارزیابی عملکرد و اعتبارسنجی داده‌های حاصل از مدل‌سازی انجام شد. این آزمایش‌ها با استفاده از کاتالیست ایریدیوم بر پایه گاما - آلومینا با درصد وزنی ۳۶٪ فلز فعال، خوراک هیدرازین با خلوص ۹۹/۹۵٪ وزنی و گاز حامل آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۵ انجام پذیرفت. بر طبق داده‌های حاصل از سامانه داده‌برداری، حداکثر دمای راکتور در طی واکنش برابر با ۶۴۷ سلسیوس به دست آمد. این دما با دمای حاصل از مدل‌سازی (۶۹۰ سلسیوس) کمی اختلاف دارد. این اختلاف به دلیل اتلاف‌های حرارتی موجود در سامانه است. داده‌های حاصل از آنالیز گازهای خروجی از راکتور (آنالیز GC) طی واکنش تجزیه کاتالیستی هیدرازین در جدول (۶) ارائه شده است.



(الف)



(ب)



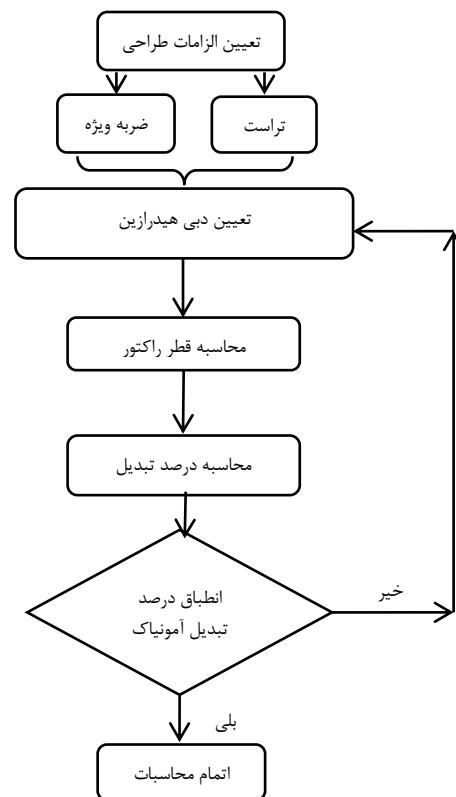
(ج)

شکل ۶- (الف) نمای کامل، (ب) نمای طراحی انفجاری و (ج) برش مقطعی راکتور تراستر طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکز.

طبق توضیحات بالا، مقدار ۵۰ میلی‌متر به عنوان طول بستر انتخاب می‌شود. با داشتن طول بستر می‌توان درصد تفکیک آمونیاک را محاسبه کرد. اگر میزان تفکیک آمونیاک برابر با مقدار به دست آمده از داده‌های مدل‌سازی باشد، محاسبات صحیح است؛ اما در صورت مشاهده مغایرت، لازم است تا پارامتر فلاکس جرمی (G) را تغییر داده و مجدد محاسبات را تکرار کرد. در نهایت، جرم مولکولی متوسط و دمای گاز خروجی از راکتور هم قابل محاسبه خواهد بود. الگوریتم پیشنهادی جهت طراحی بستر تجزیه کاتالیستی مورد استفاده در تراستر هیدرازینی در شکل (۵) ارائه شده است. بر مبنای توضیحات ارائه شده و الگوریتم موجود در شکل (۵)، طراحی لازم صورت گرفت. داده‌های نهایی به دست آمده از طراحی در جدول (۵) ذکر شده است.

جدول ۵- داده‌های نهایی حاصل از طراحی راکتور تراستر.

تراست	۱۰ N
ضربه ویژه	۲۲۰ sec
فشار محفظه	۱۵ bar
دبی هیدرازین	۴/۸۷ gr/sec
قطر بستر	۱۲/۳ mm
تخلخل	۰/۴۲
طول بستر	۴۹ mm
فلاکس جرمی	۰/۰۴۱۴ gr/mm ² .sec
تفکیک آمونیاک	۵۵٪

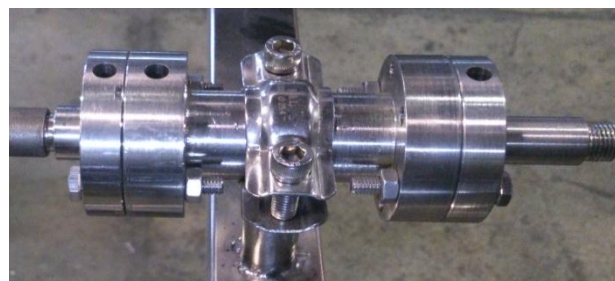


شکل ۵- الگوریتم پیشنهادی جهت طراحی بستر تجزیه کاتالیستی مورد استفاده در تراستر هیدرازینی.

آمونیاک در طول راکتور کاسته شود. همچنین گرمازا بودن واکنش تجزیه هیدرازین باعث شد که دما در ابتدای راکتور به شدت بالا برود؛ اما در ادامه با انجام واکنش دوم که واکنشی گرماگیر است به تدریج در طول راکتور دما کاهش می‌یابد. نمودار تغییرات افت فشار نیز در طول راکتور مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل داده‌های حاصل از مدل‌سازی این امکان را می‌دهد که بتوان میزان تفکیک آمونیاک، دما و فشار را در هر طولی از بستر به دست آورد. با توجه به این داده‌ها و همچنین میزان تراست و ضربه ویژه، الگوریتم طراحی یک راکتور بستر ثابت تجزیه هیدرازین ارائه و راکتور مورد نظر طراحی شد. پس از آن، راکتور طراحی شده ساخته و تحت شرایط عملیاتی آزمایش گردید. نتایج حاصل از داده‌های دما، ترکیب درصد و فشار، تطابق مناسبی را با داده‌های حاصل از مدل‌سازی (و همین‌طور طراحی) نشان داد.

مراجع

- [1] Sasse, R. "Catalysts for the Decomposition of Hydrazine, Hydrazine Derivatives and Mixtures of Both"; NASA Technical Memorandum, Washington DC, 1986.
- [2] Sutton, G. P.; Biblarz, O. "Rocket Propulsion Elements"; 7th, John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [3] Schmidt, E. W. "Hydrazine and its Derivatives. Preparation, Properties, Applications"; 2nd, John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [4] Krishnamachary, S.; Mohan, S. K.; Kulkarni, S.; Jayaraman, D.; Rao, M. R.; Singh, L. D.; Prasad, S. K. "Propellant Grade Hydrazine in Mono/Bi-propellant Thrusters: Preparation and Performance Evaluation"; Defence Sci. J. 2015, 65, 31-38.
- [5] Pelegrini, M.; Parreira, R. L.; Ferrão, L. F.; Caramori, G. F.; Ortolan, A. O.; Da Silva, E. H.; Roberto-Neto, O.; Rocco, J. A.; Machado, F. B. "Hydrazine Decomposition on a Small Platinum Cluster: the Role of N₂H₅ Intermediate"; Theor. Chem. Acc. 2016, 135, 58.
- [6] Mueller, J. "Thruster Options for Microspacecraft: A Review and Evaluation of Existing Hardware and Emerging Technologies"; 33rd Joint Propulsion Conf. and Exhibit, 1997.
- [7] Nada, T. R.; Hashem, A. A. "Geometrical Characterization and Performance Optimization of Monopropellant Thruster Injector"; Egypt. J. Remote Sensing Space Sci. 2012, 15, 161-169.
- [8] Wang, H.; Fu, Q.; Zhang, G.; Sun, Y. "The Synthesis of Ni-Cu Alloy Nanofibers via Vacuum Thermal Co-Reduction Toward Hydrogen Generation from Hydrazine Decomposition"; Catal. Letters 2019, 149, 77-83.
- [9] Zheng, F.; Dong, H.; Ji, Y.; Li, Y. "Adsorption and Catalytic Decomposition of Hydrazine on Metal-Free SiC₃ Siligraphene"; App. Surf. Sci. 2019, 469, 316-324.
- [10] Cheng, Y.; Wu, X.; Xu, H. "Catalytic Decomposition of Hydrous Hydrazine for Hydrogen Production"; Sustain. Energ. Fuels 2019, 3, 343-365.
- [11] Oliiae, S. N.; Zhang, C.; Hwang, S. Y.; Cheung, H. M.; Peng, Z. "Hydrogen Production via Hydrazine Decomposition on Model Platinum-Nickel Nanocatalyst with a Single (111) Facet"; J. Phys. Chem. C. 2016, 120, 9764-9772.
- [12] Tafreshi, S. S.; Roldan, A.; De Leeuw, N. H. "Micro-Kinetic Simulations of the Catalytic Decomposition of Hydrazine on the Cu (111) Surface"; Faraday Discuss. 2017, 197, 41-57.
- [13] Oliiae, S. N.; Zhang, C.; Hwang, S. Y.; Cheung, H. M.; Peng, Z. "Synthesis and Property of a Helwingia-Structured Nickel Nitride /



شکل ۷- راکتور تراستر ساخته شده.

جدول ۶- ترکیب درصد اجزای خروجی از راکتور طراحی شده طی واکنش تجزیه کاتالیستی هیدرازین.

جزء	مقدار
هیدروژن	۵۳/۸٪
نیتروژن	۳۰/۷٪
آمونیاک	۱۵/۳٪
هیدرازین	صفر
درصد تفکیک آمونیاک	۵۹٪

همان‌گونه که از داده‌های حاصل از جدول (۶) مشخص است، درصد تفکیک آمونیاک در راکتور طراحی شده برابر با ۵۹٪ است. این عدد نزدیک به مقدار طراحی شده (۵۵٪) است. دلیل این اختلاف، اعمال حرارت در حین آنالیز کروماتوگرافی گازی به جریان خروجی از راکتور به منظور تفکیک و شناسایی مناسب‌تر اجزاء است. همچنین داده‌های حاصل از اندازه‌گیری فشار در ابتدا و انتهای راکتور، میزان افت فشار را برابر با ۱/۳ bar نشان می‌دهد. اختلاف افت فشار اندازه‌گیری شده با مقداری که از داده‌های مدل‌سازی به دست آمد به دلیل تغییر تخلخل کاتالیست‌های موجود در راکتور در لحظه ورود خوراک به راکتور است. هنگامی که هیدرازین به درون بستر تزریق می‌شود، به دلیل تولید یک‌بارہ حجم زیاد گاز، آرایش کاتالیست‌های درون بستر دچار تغییر جزئی می‌شود. این تغییر در آرایش می‌تواند به سرعت بر رژیم جریان درون راکتور تأثیر گذاشته و بلافاصله اثر خود را در تغییرات فشار درون راکتور نشان دهد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل یک‌بعدی پایا برای بررسی و پیش‌بینی رفتار راکتور بستر ثابت تجزیه کاتالیستی هیدرازین ارائه و معادلات به‌دست آمده با روش عددی رانج - کاتا حل شد. هدف از انجام این مدل‌سازی، به‌دست آوردن داده‌هایی بود که بتوان از آن‌ها به‌عنوان داده‌های اولیه در طراحی راکتور بستر ثابت یک تراستر استفاده کرد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که هیدرازین به سرعت در ابتدای راکتور به آمونیاک، هیدروژن و نیتروژن تجزیه می‌شود. غلظت آمونیاک تولیدی به یک‌بارہ در ابتدای راکتور بالا می‌رود؛ اما پیشرفت واکنش دوم باعث می‌شود که در ادامه طول راکتور، گاز هیدروژن و نیتروژن تولید شده و از غلظت

- [23] Sayer, C. F. "The Heterogeneous Decomposition of Hydrazine: Part 5. The Kinetics of the Decomposition of Liquid Hydrazine on a Supported Ruthenium Catalyst"; Rocket Propulsion Establishment Wescott, 1972.
- [24] Kesten, A. S. "Analytical Study of Catalytic Reactors for Hydrazine Decomposition"; Annual Progress Report No. F910461-12, NASA: United Aircraft Research Laboratories, East Hartford, CT., 1967
- [25] Crespo, A. "Steady State Analysis of Hydrazine Catalytic Thrusters for Different Types of Catalysts"; Technical report in Instituto Nacional de Tecnica Aeroespacial, Spain, 1976.
- [26] Schulz-Ekloff, G.; Deppner, H. G. "Modelling and Simulation of Monopropellant Hydrazine Thrusters for Spacecraft Position Control"; Chem. Eng. Tech. 1989, 12, 426-432.
- [27] Gulati, N.; Barth, E. J. "Dynamic Modeling of a Monopropellant-Based Chemofluidic Actuation System"; J. Dyn Syst-T ASME. 2007, 129, 435-445.
- [28] Fogler, H. S. "Essentials of Chemical Reaction Engineering: Essenti Chemica Reactio Engi. Pearson Education"; 4^{ed}, Prentice Hall, 2005.
- [29] Sackheim, R.; Fritz, D.; Mackli, H. "Performance Trends in Spacecraft Auxiliary Propulsion Systems"; J. Spacecraft Rockets. 1980, 17, 390-395.
- [30] Alagharu, V.; Palanki, S.; West, K. N. "Analysis of Ammonia Decomposition Reactor to Generate Hydrogen for Fuel Cell Applications"; J. Power Sources. 2010, 195, 829-833.
- [31] Himmelblau, D. M.; Riggs, J. B. "Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering"; FT Press, 2012.
- [32] Schmidt, L. D. "The Engineering of Chemical Reactions (Topics in Chemical Engineering)"; Vol. 2, Oxford University Press, 1998.
- [33] Poling, B. E.; Prausnitz, J. M.; O'connell, J. P. "The Properties of Gases and Liquids"; Vol. 5, Mcgraw-hill, 2001.
- Nickel Hydroxide Nanocatalyst in Hydrazine Decomposition"; RSC Adv. 2016, 6, 38494-38498.
- [14] Vieira, R.; Bastos-Netto, D. T.; Ledoux, M. J.; Pham Huu, C. "Hydrazine Decomposition over Iridium Supported on Carbon Nanofibers Composite for Space Applications: Near Actual Flight Conditions Tests"; App. Catal. A. 2005, 279, 35-40.
- [15] Papapolymerou, G.; Bontozoglou, V. "Decomposition of NH₃ on Pd and Ir Comparison with Pt and Rh"; J. Mol. Catal. A-Chem. 1997, 120, 165-171.
- [16] Zheng, M.; Chen, X.; Cheng, R.; Li, N.; Sun, J.; Wang, X.; Zhang, T. "Catalytic Decomposition of Hydrazine on Iron Nitride Catalysts"; Catal. Commun. 2006, 7, 187-191.
- [17] Makled, A. E.; Belal, H. "Modeling of Hydrazine Decomposition for Monopropellant Thrusters"; 13th Int. Conf. on Aerospace Sci. & Avition Tech., Egypt, 2009.
- [18] Smith, O. I.; Solomon, W. C. "Kinetics of Hydrazine Decomposition on Iridium and Alumina Supported Iridium Catalysts"; Technical Report in Air Force Rocket Propulsion Lab, 1973.
- [19] Santos, J. B. O.; Valenca, G. P.; Rodrigues, J. A. J. "Catalytic Decomposition of Hydrazine on Tungsten Carbide: The Influence of Adsorbed Oxygen"; J. Catal. 2002, 210, 1-6.
- [20] Ledoux, M. J.; Pham-Huu, C. "Carbon Nanostructures with Macroscopic Shaping for Catalytic Application"; Catal. Today 2005, 102-103, 2-14.
- [21] Michalko, E. "Manufacture of High Surface Area Spheroidal Alumina Particles Having a High Average Bulk Density"; US Patent 4,216,122, 1980.
- [22] Neto, T. G. S.; Cobo, A. J. G.; Cruz, G. M. "Textural Properties Evolution of Ir and Ru Supported on Alumina Catalysts During Hydrazine Decomposition in Satellite Thruster"; Appl. Catal., A. 2003, 250, 331-340.