

## مدلسازی سیستم پیشرانش کاتالیستی در حالت احتراق ناقص

شهرام قنبری پاکدهی\*، مهدی مظفری نوشری\*\* و علی اکبر هاشمی پور رفسنجانی\*\*\*

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

(دریافت: ۱۳۸۸/۸/۲۲، پذیرش: ۱۳۸۹/۲/۲۲)

امروزه سیستم پیشرانش کاتالیستی برای تصحیح مدار ماهواره استفاده می‌شود. پیشرانه مورد استفاده در این نوع سیستم‌ها عموماً هیدرازین است که در حضور کاتالیست  $Ir/\gamma-Alumina$  تجزیه و خروج محصولات با دمای بالا و جرم مولکولی پایین منجر به ایجاد نیروی پیشرانش برای تصحیح و تنظیم مدار ماهواره می‌شود. واکنش تجزیه هیدرازین که واکنش احتراق کاتالیستی است از دو بخش تولید و تجزیه آمونیاک تشکیل شده است. میزان ضربه ویژه که نماینده عملکرد سیستم است، در حدود ۱۸۰ تا ۲۴۰ ثانیه است. در صورتی که به دلیل ایجاد هر گونه مشکل در کاتالیست، واکنش تجزیه هیدرازین فقط شامل تجزیه هیدرازین و ایجاد آمونیاک باشد، احتراق ناقص است و در این صورت عملکرد سیستم مطلوب نخواهد بود. در این پژوهش، عملکرد سیستم در حالت احتراق ناقص کاتالیستی مدل می‌شود. نتایج این مدل نشان می‌دهند که میزان ضربه ویژه در این حالت در حدود ۱۵۰ ثانیه است. این مدل درک درستی از معادلات عملکرد حاکم بر سیستم ارائه خواهد داد. نتایج تجربی نیز صحت داده‌های حاصل از مدل را تایید می‌کنند.

**واژگان کلیدی:** سیستم پیشرانش کاتالیستی، احتراق ناقص، عملکرد، هیدرازین، مدلسازی

### مقدمه

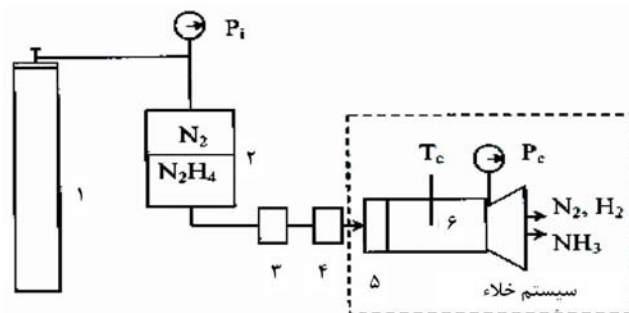
نوع خاصی از واکنش‌های احتراق که در آن از اکسیدکننده استفاده نمی‌شود احتراق کاتالیستی است که در این حالت ماده اولیه (خوراک) جذب سطح کاتالیست شده و پیوندهای موجود در ماده اولیه شکسته و محصولات با دمای نسبتاً بالا و جرم مولکولی پایین ایجاد می‌شوند. انرژی حاصل از این واکنش را می‌توان در مواردی نظیر سیستم پیشرانش برای تصحیح مدار ماهواره‌ها به کار گرفت. این ماهواره‌ها که توسط موشک‌های ماهواره‌بر در مدار زمین قرار داده می‌شوند، پس از مدتی به مرور زمان از مدار خود منحرف شده و در نهایت به سطح زمین سقوط می‌کنند. برای تنظیم و تصحیح مدار ماهواره، از سیستم پیشرانش کاتالیستی استفاده می‌شود. این سیستم به طور کلی از مخزن گاز بی‌اثر و پیشرانه، شیرهای کنترل، افشانه (Injector)، محفظه احتراق کاتالیستی و نازل تشکیل شده است. طرحواره کلی سیستم مذکور در شکل (۱) آورده شده است [۱].

به طوری که در شکل دیده می‌شود، تماس پیشرانه اسپری شده با بستر کاتالیستی منجر به تجزیه آن شده و گازهایی با دما و فشار بالا ایجاد می‌شوند. این گازها پس از عبور از نازل با ایجاد نیرویی سبب می‌شوند که سیستم به جلو حرکت کند. به عبارتی سرعت گازهای خروجی از بستر بسیار زیاد می‌شود به طوری که با قرار دادن یک نازل در انتهای بستر، نیروی جلو برنده زیادی در جهت عکس خروج گازها به سیستم وارد می‌شود. درون ماهواره چنین سیستمی تعبیه شده است تا در صورت انحراف مسیر بتواند به موقع عمل نموده و موجبات تنظیم و تصحیح مدار ماهواره را فراهم کند.

\* استادیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: sh\_ghanbari73@yahoo.com)

\*\* کارشناس ارشد (ایمیل: mozaafari.7@gmail.com)

\*\*\* کارشناس ارشد، مربی (ایمیل: hash\_rafsanjani@yahoo.com)



شکل ۱- طرحواره‌ای از سیستم پیشرانش کاتالیستی تجزیه هیدرازین. (۱) مخزن گاز فشرده  $N_2$ ، (۲) تانک هیدرازین، (۳) وسیله اندازه‌گیری دبی خوراک، (۴) شیر الکترومغناطیسی، (۵) افشانه، (۶) محفظه احتراق کاتالیستی [۱]

پیشران‌های متنوعی برای این منظور پیشنهاد و عرضه شده‌اند، نظیر نیترو متان، اتیلن اکسید، آب اکسیژنه و هیدرازین که هیدرازین به عنوان پیشران متداول استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که به این نوع پیشران، تک‌پیشران (Monopropellant) گفته می‌شود که بدون حضور یک ماده اکسیدکننده و تنها در حضور کاتالیست تجزیه می‌شود. کاتالیست‌های مختلفی برای تجزیه هیدرازین پیشنهاد شده‌اند، نظیر  $Pd$ ،  $Pt$ ،  $Ru$ ،  $Ni$ ،  $Ir$  و ... . فعالیت فلزات فعال در واکنش تجزیه کاتالیستی هیدرازین، هنگامی که بر پایه  $\gamma$ -Alumina قرار می‌گیرند به صورت زیر است [۲]:



از این رو کاتالیست  $Ir$  بر پایه گاما آلومینا ( $Ir/\gamma$ -Alumina) برای این منظور مناسب است که علت آن فعالیت بالای این کاتالیست و نیز هدایت گرمایی بالای آن است [۳]. محفظه احتراق کاتالیستی درحقیقت مانند یک راکتور کاتالیستی (Catalytic Reactor) است که در آن واکنش تجزیه کاتالیستی هیدرازین انجام می‌شود. به طوری که اشاره شد هیدرازین به صورت قطرات بسیار ریز ضمن عبور از درون این بستر مطابق واکنش کلی (۱) تجزیه می‌شود [۳].



از آنجایی که گرمای واکنش بسیار زیادی ایجاد می‌شود، قطراتی که وارد راکتور می‌شوند در همان ابتدا به صورت بخار در می‌آیند. واکنش مذکور از دو واکنش جزئی زیر تشکیل شده است:



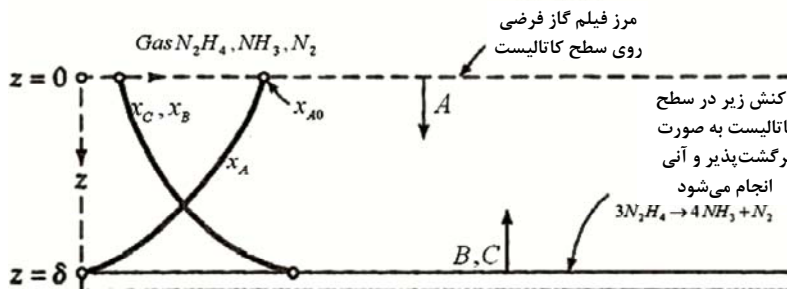
مقدار انبساط گازها در معادله (۲)، ۲ مول (یا ۲ حجم) و در معادله (۳)، ۴ مول (یا ۴ حجم) است در حالی که این مقدار برای واکنش کلی (۱) برابر ۶ مول (یا ۶ حجم) است. اگر معادله (۲) بر سیستم حاکم باشد در این صورت احتراق ناقص کاتالیستی بر سیستم حکم‌فرما خواهد بود و بدترین وضعیت عملکرد سیستم تنظیم مدار ماهواره پیش خواهد آمد. این وضعیت، ممکن است ناشی از غیر فعال شدن کاتالیست در تجزیه آمونیاک باشد. با مدلسازی محفظه احتراق کاتالیستی می‌توان بدترین وضعیت عملکرد سیستم پیشرانش را پیش‌بینی کرد. این امر در این مقاله پیگیری می‌شود. با انجام این مهم درک درستی از معادلات عملکرد حاکم بر سیستم به دست خواهد آمد. نتایج مدل با نتایج تجربی مقایسه خواهند شد. امید می‌رود که این پژوهش آغازی برای تحقیقات آتی در زمینه سیستم‌های احتراق کاتالیستی ماهواره‌ها در کشور باشد.

## بخش نظری

همان‌طور که اشاره شد در واکنش (۲)، به ازای سه مول هیدرازین که به سطح کاتالیست نفوذ می‌کند چهار مول آمونیاک و یک مول نیتروژن به توده گاز نفوذ می‌کند. برای آنکه بتوان مدل عملکرد مناسبی برای این سیستم ارائه کرد باید فرضیات

ساده‌کننده معقولی به کار برده شود. برای انجام مدل‌سازی عملکرد محفظه احتراق کاتالیستی هیدرازین فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- ۱- هر ذره کاتالیست، توسط فیلمی از هیدرازین گازی محیط شده است که این گاز به سطح کاتالیست نفوذ می‌کند.
- ۲- در سطح کاتالیست، واکنش (۲) به صورت آنی اتفاق می‌افتد به طوری که فشار جزئی هیدرازین در سطح فلز عملاً برابر صفر است. محصولات این واکنش (گازهای نیتروژن و آمونیاک) با همان سرعتی که تولید می‌شوند به درون توده گاز نفوذ می‌کنند. به عبارتی سرعت واکنش توسط شدت انتقال مولکول‌های هیدرازین از توده گاز به سطح فلز و نیز نفوذ گازهای نیتروژن و آمونیاک به داخل توده گاز کنترل می‌شود.
- ۳- قطر ذرات کاتالیستی ثابت باقی می‌ماند.
- ۴- محفظه احتراق کاتالیستی به صورت بستر استوانه‌ای در نظر گرفته می‌شود که از ذرات کاتالیستی پر شده است. گرادیان غلظت در فیلم فرضی در شکل (۲) نشان داده شده است. در این شکل A، B و C به ترتیب مربوط به هیدرازین، آمونیاک و نیتروژن هستند. غلظت هیدرازین در سطح کاتالیست صفر بوده به طوری که هیدرازین از توده گازی به سمت سطح کاتالیست و در جهت محور Z نفوذ می‌کند. غلظت نیتروژن و آمونیاک تولید شده در سطح کاتالیست زیاد و در توده گازی کم است. بنابراین نیتروژن و آمونیاک در جهت منفی محور Z به سمت توده گازی نفوذ می‌کنند.



شکل ۲- مدلی از نحوه نفوذ در سطح کاتالیست

مولکول‌های هیدرازین از توده گازی عبور می‌کنند و به سطح هر دانه کاتالیست می‌رسند و در آنجا واکنش می‌دهند. محصولات خروجی از توده گاز احاطه کننده کاتالیست خارج می‌شوند. با اعمال فرض ۲ و نظر به این که کسر مولی هر جزء در طول بستر تغییر می‌کند، ابتدا با در نظر گرفتن یک المان در طول بستر به میزان  $dz$  و ارتباط آن با دبی مولی گاز ورودی ( $G_0$ ) و نیز سطح فعال کاتالیست ( $a_p$ )، معادلات شار انتقال جرم برای هر جزء نوشته می‌شوند (معادلات (۴) تا (۷)). لازم به ذکر است که معادلات شار انتقال جرم بر اساس سطح فلز کاتالیست هستند.

برای حل این معادلات باید رژیم جریان معلوم باشد. در این نوع سیستم‌های پیش‌رانش، محدوده عدد اشمیت ( $Sc$ ) در این سیستم بین ۰/۰۵ تا ۰/۴ و محدوده رینولدز بالاتر از ۳۰۰ است [۲]. با علم بر این موضوع می‌توان ضریب انتقال جرم (از معادله (۴) را با استفاده از معادله (۱۲) محاسبه کرد [۴]. روابط انتقال جرم حاکم بر این مجموعه به شرح زیر است:

$$N_{N_2H_4} = -\frac{3}{2} F \ln \left( \frac{3}{3 + 2y_{N_2H_4}} \right) \quad (4)$$

$$N_{N_2H_4} = \frac{-3G_0 dy_{N_2H_4}}{(2y_{N_2H_4} + 1)^2 a dz} \quad (5)$$

$$N_{NH_3} = -\left( \frac{4}{3} \right) N_{N_2H_4} \quad (6)$$

$$N_{N_2} = -\left(\frac{1}{3}\right)N_{N_2H_4} \quad (7)$$

$$Re'' = \frac{d_p G'}{\mu} \quad (8)$$

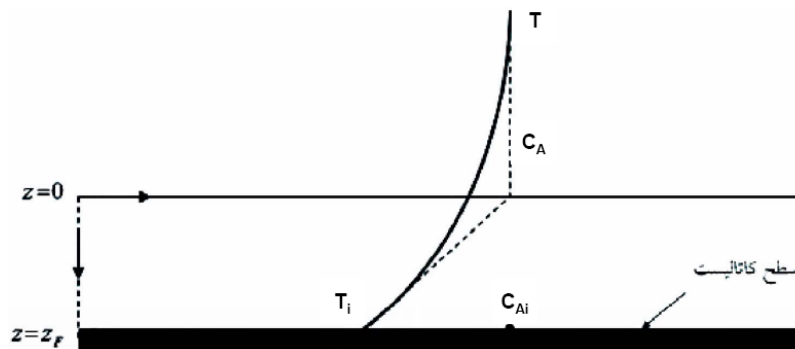
$$G' = 32G = \frac{64 G_0}{2y_{N_2H_4} + 1} \quad (9)$$

$$a = 6(1-\varepsilon)/d_p \quad (10)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D} \quad (11)$$

$$J_D = \frac{F}{G} Sc^{\frac{2}{3}} = \frac{2.06}{\varepsilon} Re''^{-0.575} \quad (12)$$

از آنجا که واکنش تجزیه کاتالیستی هیدرازین و تبدیل به آمونیاک گرم‌زا است، لذا پدیده‌های انتقال جرم و انتقال گرما همزمان وجود خواهند داشت. گرما در اثر وجود دو عامل مختلف منتقل می‌شود: یکی اختلاف دما بین دو نقطه و دیگری گرمایی که به همراه انتقال یک جزء از یک فاز به فاز دیگر آزاد می‌شود [۴]. شکل (۳) گرادیان دما را نشان می‌دهد. در این شکل  $C_A$  و  $C_{Ai}$  به ترتیب غلظت هیدرازین در توده گاز و در سطح بستر کاتالیستی‌اند.



شکل ۳- اثر انتقال جرم بر انتقال گرما [۴]

با توجه به شکل (۳) علاوه بر گرادیان غلظت، گرادیان دما نیز بین فصل مشترک دو فاز و توده سیال موجود است. گرما نیز بین این دو نقطه انتقال می‌یابد که مقدار آن با استفاده از ضریب انتقال گرما  $h$  قابل محاسبه است. روابط انتقال گرمای حاکم بر این مجموعه به صورت زیر خواهد بود [۴]:

$$q_s = \frac{N_{N_2H_4} M_{N_2H_4} C_{p,N_2H_4} + N_{NH_3} M_{NH_3} C_{p,NH_3} + N_{N_2} M_{N_2} C_{p,N_2}}{1 - \exp(-(N_{N_2H_4} M_{N_2H_4} C_{p,N_2H_4} + N_{NH_3} M_{NH_3} C_{p,NH_3} + N_{N_2} M_{N_2} C_{p,N_2}) / h)} (T_i - T) \quad (13)$$

$$q_t = q_s + \lambda_{N_2H_4} N_{N_2H_4} \quad (14)$$

$$q_t = U \times (T - T_i) \quad (15)$$

در نبود انتقال جرم، ضریب انتقال گرما را می‌توان با استفاده از تشابه  $j_D = j_H$  تعیین کرد [۴]:

$$J_H = \frac{h}{C_{p,N_2H_4} G} Pr^{\frac{2}{3}} = \frac{2.06}{\varepsilon} Re''^{-0.575} \quad (16)$$

ویژگی‌های فیزیکی کلیه اجزا در جدول (۱) آورده شده‌اند.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی اجزای موجود در سیستم محفظه احتراق کاتالیستی

$C_{P,N_2H_4} = (79815 + 50.929T + 433.79T^2) \times 10^3$	[۲]
$C_{P,NH_3} = \left( 33430 + 48980 \left( \frac{2036/T}{(\sinh(2036/T))^2} \right) + 22560 \left( \frac{882/T}{(\cosh(882/T))^2} \right) \right) \times 10^{-3}$	[۵]
$C_{P,N_2} = \left( 29110 + 8610 \left( \frac{1701.6/T}{(\sinh(1701.6/T))^2} \right) + 100 \left( \frac{909.79/T}{(\cosh(909.79/T))^2} \right) \right) \times 10^{-3}$	[۵]
$\mu_{N_2H_4} = 10^{\left( \frac{536}{T} - 3.844 \right) - 1}$	[۲]
$*\mu = 4.6 \times 10^{-4} \frac{NM^{1/2} P_c^{2/3}}{T_c^{1/6}}, N = 0.00034 T_r^{0.94}$	[۵]
$**k = 10^{-7} (14.52 T_r - 5.14)^{2/3} \left( \frac{C_P}{T_c^{1/6} M^{1/2} (101.325/P_c)} \right)^{2/3}$	[۵]
$D_{12}' = \frac{0.1013 T^{1.75} \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{0.5}}{P \left[ (\sum \nu_1)^{1/3} + (\sum \nu_2)^{1/3} \right]^2}$	[۵]
$D_{12} = 1.013 \times 10^5 \frac{D_{12}'}{P} (D_{12} P)_R (1 - A T_r^{-B}) (1 - C T_r^{-E})$	[۵]
$\rho_{N_2H_4} = 1.23078 - 6.2668 \times 10^{-4} T - 4.5284 \times 10^{-7} T^2$	[۲]
$\rho_{NH_3} = \frac{3.5383}{0.25443 \left( 1 + \left( 1 - \frac{T}{405.65} \right)^{0.2888} \right)}$	[۵]
$\rho_{N_2} = \frac{3.2091}{0.2861 \left( 1 + \left( 1 - \frac{T}{126.2} \right)^{0.2966} \right)}$	[۵]

\* برای به دست آوردن گرانشی آمونیاک و نیتروژن از این رابطه استفاده می‌شود.

\*\* برای به دست آوردن ضریب هدایت گرمایی هر یک از اجزا از این رابطه استفاده می‌شود.

برای نزدیکی هرچه بیشتر داده‌های مدل با داده‌های واقعی مقدار گاز ورودی به راکتور کاتالیستی ( $G_0$ )،  $0.2$  کیلو مول بر ثانیه بر مترمربع [۲] و اندازه گلوله‌های کاتالیستی ( $d_p$ )  $2/5$  میلی‌متر [۲] در نظر گرفته می‌شوند. دمای بحرانی نیتروژن، هیدرازین، و آمونیاک به ترتیب  $126/2$ ،  $653/15$ ، و  $405/65$  درجه کلوین است [۵]. برای به دست آوردن ویژگی‌های توده فاز گاز از قوانین اختلاط مناسب استفاده می‌شود. این قوانین در جدول (۲) آورده شده‌اند. متغیر بیان کننده عملکرد محفظه احتراق، ضربه ویژه است. رابطه بین ضربه ویژه و مشخصات فیزیکی در رابطه (۱۷) آورده شده است [۷].

$$I_{sp} = \frac{\sqrt{2 \times k' \times R'}}{g_0} \times \sqrt{\frac{T_c}{M_t}} \quad (17)$$

در این رابطه  $T_c$  دمای توده گاز در محفظه احتراق کاتالیستی است.

یکی از متغیرهای مهم در محفظه احتراق کاتالیستی افت فشار است که باید در نظر گرفته شود. برای محاسبه افت فشار جریان در بستر کاتالیستی از رابطه ارگان (Ergun Equation) (رابطه (۱۸)) استفاده می‌شود [۸]. این رابطه برای فاز گاز که از یک بستر جامد عبور می‌کند تعریف شده است و رابطه مناسبی است.

$$\frac{\Delta P}{z} \frac{g_c \varepsilon^3 d_p \rho_g}{(1 - \varepsilon) G'^2} = \frac{150 (1 - \varepsilon)}{Re^n} + 1.75 \quad (18)$$

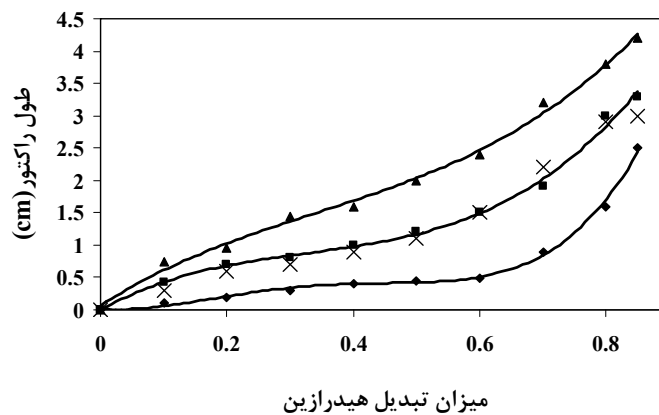
جدول ۲- قوانین اختلاط برای مشخصات فیزیکی توده گاز

$\mu_{mix} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{x_{\alpha} \mu_{\alpha}}{\sum_{\beta} x_{\beta} \phi_{\alpha\beta}} \quad \text{that; } \phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left( 1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[ 1 + \left( \frac{\mu_{\alpha}}{\mu_{\beta}} \right)^{1/2} \left( \frac{M_{\beta}}{M_{\alpha}} \right)^{1/4} \right]^2$	[۶]
$k_{mix} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{x_{\alpha} k_{\alpha}}{\sum_{\beta} x_{\beta} \phi_{\alpha\beta}} \quad \text{that; } \phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left( 1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[ 1 + \left( \frac{\mu_{\alpha}}{\mu_{\beta}} \right)^{1/2} \left( \frac{M_{\beta}}{M_{\alpha}} \right)^{1/4} \right]^2$	[۶]
$D_{im} = \frac{1 - y_i}{\sum_{j, j \neq i} y_j / D_{ij}}$	[۵]
$M_t = \sum_i x_i M_i$	[۵]
$\rho_t = \sum_i x_i \rho_i$	[۵]
$C_{p,t} = \sum_i x_i C_{p,i}$	[۵]

## نتایج و بحث

بر اساس نتایج حاصل از این مدل می‌توان عملکرد ناقص احتراق کاتالیستی را در سیستم پیش‌رانش پیش‌بینی کرد. داده‌های خروجی از این مدل عبارت‌اند از: طول محفظه احتراق کاتالیستی، دمای توده گاز به ازای هر میزان تبدیل هیدرازین، ترکیب درصد توده گاز و جرم مولکولی آن و در انتها مقدار ضربه ویژه. نیروی پیش‌رانش ماهواره تابعی از میزان ضربه ویژه است. محاسبات برای سه درصد تخلخل بستر کاتالیستی ( $\varepsilon$ ) مختلف (۰/۳، ۰/۴، ۰/۵) انجام شده است. برای انجام محاسبات از نرم‌افزار MATLAB 2007-b استفاده شده است.

از حل همزمان معادلات فوق نتایج مدل به دست می‌آیند. نتایج این مدل با نتایج تجربی سیستم پیش‌رانش کاتالیستی که در طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۷ توسط محققان مختلف به دست آمده است، مقایسه شده است [۹-۱۱]. لازم به ذکر است که این محققان درصد کاتالیستی ۰/۴ را در کارهای تجربی خویش در نظر گرفته‌اند. در ابتدا نمودار طول محفظه احتراق بر حسب درصد تبدیل هیدرازین به صورت شکل (۴) آمده است.

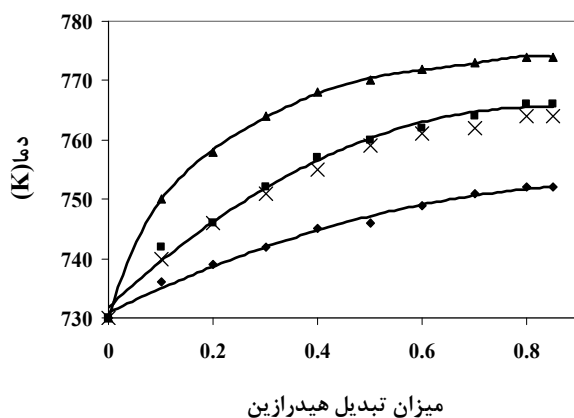


شکل ۴- نمودار طول محفظه احتراق کاتالیستی بر حسب میزان تبدیل هیدرازین برای سه درصد تخلخل مختلف (نتایج تجربی-×، -♦-  $\varepsilon=0/3$ ، -■-  $\varepsilon=0/4$ ، -▲-  $\varepsilon=0/5$ )

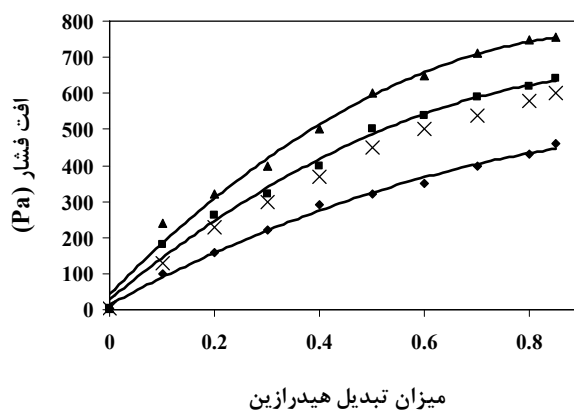
همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود افزایش درصد تبدیل هیدرازین متناسب با افزایش طول محفظه است. در واقع برای آنکه درصد بیشتری از هیدرازین به محصول تبدیل شود باید میزان ماندگاری توده گاز در داخل محفظه بیشتر باشد. در تبدیل‌های بالاتر از ۰/۷۵، چون بخش اعظم واکنش انجام شده است، برای افزایش اندک در درصد تبدیل، طول بزرگ‌تری مورد نیاز است. اگر واکنش تجزیه آمونیاک (رابطه (۳)) در این مدلسازی در نظر گرفته شود در این صورت شیب نمودار در میزان تبدیل بیش از ۰/۷۵، به شدت کاهش خواهد یافت که به تبع آن طول محفظه احتراق کاهش خواهد یافت، زیرا به محض تجزیه آمونیاک، مقدار بیشتری از هیدرازین تجزیه خواهد شد.

همچنین در این شکل دیده می‌شود که به ازای میزان تبدیل مشخص، هر چه میزان تخلخل بستر بیشتر باشد طول بیشتری مورد نیاز است. به عبارتی برای رسیدن به درصد تبدیل مشخص، با تغییر در میزان تخلخل، طول‌های متفاوتی مورد نیاز است. لذا به نظر می‌رسد که میزان تبدیل هیدرازین به جای طول محفظه احتراق، معیار مناسب‌تری برای تحلیل نمودارهای دما، افت فشار، و ... خواهد بود. نتایج تجربی در میزان درصد تخلخل برابر ۰/۴ آورده شده است که حکایت از همخوانی مدل با داده‌های تجربی دارد.

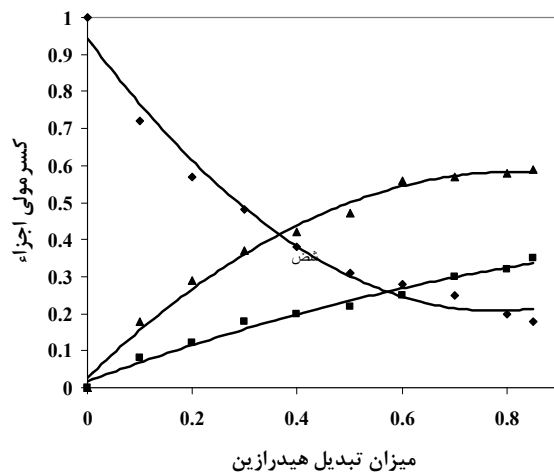
نمودارهای دما، افت فشار، درصد مولی اجزا، جرم مولکولی توده گاز و میزان ضربه ویژه بر حسب میزان تبدیل هیدرازین به ترتیب در شکل‌های (۵) تا (۹) نشان داده شده‌اند.



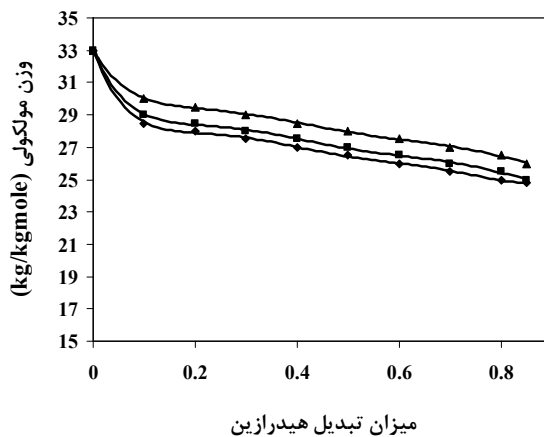
شکل ۵- نمودار دما بر حسب میزان تبدیل هیدرازین  
(نتایج تجربی -x-،  $\epsilon=0/5$  -♦-،  $\epsilon=0/4$  -■-،  $\epsilon=0/3$  -▲-)



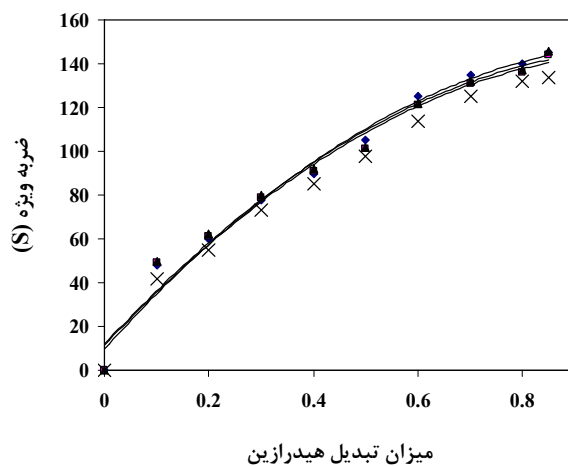
شکل ۶- نمودار افت فشار بر حسب میزان تبدیل هیدرازین  
(نتایج تجربی -x-،  $\epsilon=0/5$  -♦-،  $\epsilon=0/4$  -■-،  $\epsilon=0/3$  -▲-)



شکل ۷- درصد مولی اجزا بر حسب میزان تبدیل هیدرازین  
(-▲-  $\text{NH}_3$ ، -■-  $\text{N}_2$ ، -◆-  $\text{N}_2\text{H}_4$ )



شکل ۸- نمودار جرم مولکولی توده گاز بر حسب میزان تبدیل هیدرازین  
(-▲-  $\varepsilon=0.5$ ، -■-  $\varepsilon=0.4$ ، -◆-  $\varepsilon=0.3$ ، -x- نتایج تجربی)



شکل ۹- نمودار ضربه ویژه بر حسب میزان تبدیل هیدرازین  
(-▲-  $\varepsilon=0.5$ ، -■-  $\varepsilon=0.4$ ، -◆-  $\varepsilon=0.3$ ، -x- نتایج تجربی)



در شکل (۵) دیده می‌شود که هر چه میزان تبدیل هیدرازین افزایش یابد یا به عبارتی طول راکتور بیشتر شود دما زیاد می‌شود. علت این امر در گرمازا بودن واکنش است. هر چه به انتهای بستر نزدیک می‌شویم، دما به مقدار ثابتی میل می‌کند که نشان می‌دهد به انتهای واکنش نزدیک می‌شویم. همچنین در میزان تبدیل مشخصی از هیدرازین هر چه میزان تخلخل در محفظه احتراق کاتالیستی کمتر باشد دمای توده گاز به علت افزایش سطح کاتالیست، بیشتر خواهد بود. به علاوه دیده می‌شود که بیشترین تفاوت دما در حدود  $50^{\circ}\text{C}$  است که نشان از سرعت بالای واکنش دارد.

با توجه به آنچه در شکل (۴) دیده شد، بیشترین طول بستر در حدود  $4/5$  سانتی‌متر است. نظر به طول اندک بستر و واکنش سریع و گرمازای تجزیه هیدرازین می‌توان راکتور را بی‌دررو (Adiabatic) فرض کرد. نتایج تجربی در میزان درصد تخلخل برابر  $0/4$  آورده شده است که حکایت از همخوانی مدل با داده‌های تجربی دارد. به طوری که در شکل (۵) دیده می‌شود، نتایج تجربی نیز نشان می‌دهند که دما در انتهای بستر به مقدار ثابتی میل می‌کند.

در شکل (۶) دیده می‌شود که هر چه میزان تبدیل هیدرازین بیشتر باشد میزان افت فشار بیشتر می‌شود. میزان تبدیل بیشتر در طول بیشتری از بستر به دست می‌آید. این امر دلیل واضحی است که طول بستر باعث افزایش افت فشار می‌شود. همچنین هر چه میزان تخلخل بستر بیشتر شود افت فشار کمتر خواهد بود. در یک نگاه کلی می‌توان دید که محدوده افت فشار از میزان تبدیل صفر تا میزان تبدیل  $0/8$  به خاطر کوتاه بودن طول بستر، کم است. به طوری که این افت فشار به یک کیلو پاسکال یا  $0/1$  اتمسفر نمی‌رسد. نتایج تجربی نیز همخوانی خوبی با نتایج مدل دارد که نشان از اعتبار بالای معادله ارگان دارد. اگر افت فشار در راکتور کاتالیستی مذکور زیاد باشد، در نهایت سرعت گازهای خروجی از بستر کم شده و از این رو نیروی پیشرانش کاهش می‌یابد.

در شکل (۷) وضعیت تبدیل مولی اجزا بر حسب میزان تبدیل هیدرازین نشان داده شده است. میزان تبدیل مولی نیتروژن در تمام طول راکتور همیشه کمتر از آمونیاک است. به طوری که اشاره شد علت این امر احتراق ناقص هیدرازین است که البته این موضوع از استوکیومتری واکنش (۱) پیداست. البته نتایج تجربی در این مورد وجود ندارد. این شکل به منظور صحت‌گذاری بر معادلات مورد استفاده است که به خوبی موید این امر است.

در شکل (۸) دیده می‌شود که با افزایش میزان تبدیل هیدرازین به نیتروژن و آمونیاک، جرم مولکولی توده گاز کاهش می‌یابد که حاکی از تبدیل مولکول بزرگ هیدرازین به مولکول‌های سبک‌تر آمونیاک و نیتروژن است. در میزان تبدیل مشخصی از هیدرازین، هر چه مقدار تخلخل کمتر باشد میزان تبدیل هیدرازین به نیتروژن و آمونیاک بیشتر خواهد بود و میزان جرم مولکولی توده گاز کمتر می‌شود. البته این نکته حائز اهمیت است که تفاوت بین نمودارها در میزان تبدیل‌های مختلف، خیلی زیاد نیست. این امر تایید می‌کند که واکنش تجزیه هیدرازین و تولید آمونیاک چندان به میزان سطح حساس نیست که نتیجه بسیار جالب و مهمی است که با نتایج تجربی به دست آمده [۳] همخوانی دارد. مانند شکل (۷) نتایج تجربی در این خصوص وجود نداشته و این شکل نیز جهت صحت‌گذاری بر معادلات مورد استفاده است.

با توجه به نتایج اخذ شده قبلی و نیز تعریف ضربه ویژه، در شکل (۹) مقدار عددی ضربه ویژه بر حسب میزان تبدیل هیدرازین آورده شده است. به طوری که دیده می‌شود هر چه میزان تبدیل هیدرازین بیشتر می‌شود میزان ضربه ویژه افزایش می‌یابد. علت این امر به خاطر پیشرفت بیشتر واکنش و بالا رفتن دما و نیز ایجاد مولکول‌هایی با جرم مولکولی کمتر است. چنان که دیده می‌شود افزایش در میزان ضربه ویژه در ابتدا شیب تندتری دارد که به خاطر سریع بودن واکنش است. مقدار عددی ضربه ویژه برای درصدهای تخلخل متفاوت تقریباً با هم برابر است و از این رو نمودارها بر هم منطبق شده‌اند. در تفسیر این مطلب می‌توان بیان نمود که با توجه به شکل (۵)، تغییر میزان تخلخل تغییر چندان در اختلاف دما به وجود نمی‌آورد (حداکثر حدود  $50$  درجه سانتی‌گراد)، زیرا واکنش سریع است. به علاوه با توجه به شکل (۸) تغییر میزان تخلخل و از این رو تغییر سطح، تغییر چندان در میزان جرم مولکولی بوجود نمی‌آورد زیرا واکنش به میزان سطح حساس نیست. لذا انتظار می‌رود که در رابطه (۱۷) و در محدوده میزان تخلخل صفر تا  $0/5$ ،  $I_{sp}$  تغییر چندان با تغییرات میزان تخلخل نکند. نتایج تجربی نیز مقادیری نزدیک به مقادیر مدل را نشان می‌دهند.

همان‌طور که اشاره شد کمیت بیان‌کننده عملکرد موتور احتراق کاتالیستی،  $I_{sp}$  است و مقدار  $I_{sp}$  به دست آمده در این مدلسازی که تنها واکنش تجزیه هیدرازین و تولید آمونیاک را در نظر می‌گیرد، در حدود ۱۵۰ ثانیه پیش‌بینی شده است. به این ترتیب نتایج مدل مذکور مربوط به عملکرد احتراق ناقص کاتالیستی در سیستم پیش‌رانش کاتالیستی است. محدوده عملی  $I_{sp}$  گزارش شده برای هیدرازین در سیستم‌های پیش‌رانش با احتراق کامل کاتالیستی در حدود ۱۸۰ تا ۲۴۰ ثانیه است [۱] که واکنش تجزیه آمونیاک را هم در نظر می‌گیرد.

## نتیجه‌گیری

در سیستم احتراق کاتالیستی که برای پیش‌رانش ماهواره‌ها به منظور تصحیح و تنظیم مدار آن‌ها، به کار می‌رود، عموماً از تک‌پیش‌رانه هیدرازین و کاتالیست Ir/ $\gamma$ -Alumina استفاده می‌شود. در صورت احتراق کامل کاتالیستی ابتدا هیدرازین تجزیه شده و آمونیاک تولید می‌شود. سپس آمونیاک تجزیه و محصولات سبک نیتروژن و هیدروژن ایجاد می‌شوند. اگر به هر دلیلی، واکنش احتراق کاتالیستی ناقص باشد فقط هیدرازین تجزیه شده و آمونیاک تولید می‌شود. این امر بر میزان  $I_{sp}$  که شاخصه عملکرد سیستم پیش‌رانش ماهواره است، بسیار مؤثر است. در این پژوهش، عملکرد سیستم مذکور در حالت احتراق ناقص مدلسازی شد و با نتایج تجربی موجود مقایسه شد.

مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این مدلسازی عبارت‌اند از:

- در مقادیر تبدیل بالاتر از ۰/۷۵ از هیدرازین، چون بخش اعظم واکنش انجام گرفته است برای افزایش اندک در درصد تبدیل، طول بزرگ‌تری از بستر کاتالیستی مورد نیاز است. در صورتی که کاتالیست فعال بماند و واکنش تجزیه آمونیاک انجام شود، میزان تبدیل هیدرازین زیاد شده و طول بستر کاتالیستی به شدت کاهش می‌یابد. این امر به منزله کاهش وزن راکتور کاتالیستی و در نهایت سبک‌تر شدن ماهواره خواهد بود.

- هر چه میزان تبدیل هیدرازین افزایش یابد دما زیادتر می‌شود و در انتهای بستر به مقدار ثابتی میل می‌کند. در میزان تبدیل مشخصی از هیدرازین، هر چه میزان تخلخل در محفظه احتراق کمتر باشد، دمای توده گاز بیشتر خواهد بود. همچنین بیشترین تفاوت دمای ابتدا و انتهای محفظه احتراق حدود  $50^{\circ}\text{C}$  است. این امر نشان می‌دهد که با توجه به گرمای ایجاد شده، تفاوت دمای چندانی در طول محفظه احتراق وجود ندارد و از این رو اتلاف گرمایی تقریباً ناچیز است. این امر باعث عملکرد مناسب و مؤثر سیستم خواهد شد.

- با توجه به داده تجربی شار مولی بخار هیدرازین ورودی به بستر کاتالیستی (۰/۰۲ کیلومول بر ثانیه بر مترمربع) و واکنش سریع هیدرازین، بیشترین طول بستر کاتالیستی در حدود ۴/۵ سانتی‌متر محاسبه می‌شود. محدوده افت فشار از میزان تبدیل صفر تا میزان تبدیل یک، به خاطر کوتاه بودن طول بستر، کم است. از نظر عملی هرچه افت فشار در بستر کاتالیستی کمتر باشد، نیروی پیش‌رانش بیشتری تولید می‌شود.

- با افزایش میزان تبدیل هیدرازین به نیتروژن و آمونیاک، جرم مولکولی توده گاز کاهش می‌یابد. در میزان تبدیل مشخصی از هیدرازین، هر چه میزان تخلخل بستر کمتر باشد میزان جرم مولکولی توده گاز کمتر می‌شود. البته این نکته حائز اهمیت است که تفاوت بین نمودارها در میزان تبدیل‌های مختلف خیلی زیاد نیست. بنابراین واکنش تجزیه هیدرازین و تولید آمونیاک چندان به میزان سطح حساس نیست که نتیجه بسیار جالب و مهمی است که نتایج تجربی به دست آمده را تایید می‌کند.

-  $I_{sp}$  به دست آمده در این مدلسازی در حالت عملکرد احتراقی ناقص حدود ۱۵۰ ثانیه است. در حالی که محدوده عملی  $I_{sp}$  گزارش شده برای هیدرازین در سیستم‌های پیش‌رانش کاتالیستی ماهواره‌ها در حالت احتراق کامل کاتالیستی حدود ۱۸۰ تا ۲۴۰ ثانیه است. طبق تعریف ضربه مؤثر و با داشتن دبی وزنی مصرف هیدرازین می‌توان نیروی پیش‌رانش حاصل را حساب کرد و ماهواره را به راحتی کنترل کرد.

## فهرست علائم

سطح مخصوص کاتالیست، متر مربع به ازای هر متر مکعب از حجم بستر	$a$
متغیر رابطه $D_{12}$ در جدول (۲) که از جدول ۲ تا ۴۰۱ مرجع [۵] استخراج شده است.	$A$
متغیر رابطه $D_{12}$ در جدول (۲) که از جدول ۲ تا ۴۰۱ مرجع [۵] استخراج شده است.	$B$
متغیر رابطه $D_{12}$ در جدول (۲) که از جدول ۲ تا ۴۰۱ مرجع [۵] استخراج شده است.	$C$
ظرفیت گرمایی ویژه جزء $i$ ، $J/mol.K$	$C_{p,i}$
ضریب نفوذ مولکولی جزء $i$ در جزء $j$ ، $m^2/s$	$D_{i,j}$
ضریب نفوذ مولکولی مخلوط گازهای غیر هیدروکربنی در فشار بالا، $m^2/s$	$D_{12}$
ضریب نفوذ مولکولی مخلوط گازهای غیر هیدروکربنی در فشار پایین، $m^2/s$	$D'_{12}$
متغیر رابطه $D_{12}$ در جدول (۲) که از جدول ۲ تا ۴۰۱ مرجع [۵] استخراج شده است.	$(D_{12} P)_R$
قطر کاتالیست، $m$	$d_p$
متغیر رابطه $D_{12}$ در جدول (۲) که از جدول ۲ تا ۴۰۱ مرجع [۵] استخراج شده است.	$E$
تخلخل بستر کاتالیستی، عددی بین صفر و یک است.	$\varepsilon$
ضریب کلی انتقال جرم، $kmol/h \cdot m^2$	$F$
دبی مولی ابتدای بستر، $kmol/h \cdot m^2$	$G_0$
دبی مولی گاز در هر عمق $z$ از بستر، $kmol/h \cdot m^2$	$G$
دبی جرمی گاز در هر عمق $z$ از بستر، $kg/h \cdot m^2$	$G'$
جهت تطبیق واحدها به کار برده می‌شود. در سیستم واحدهای مورد نظر مقدار آن عدد یک است، $m^2/s$	$g_c$
شتاب جاذبه، $m^2/s$	$g_0$
ضریب جابه‌جایی انتقال گرما، $kJ/m^2 \cdot s \cdot K$	$h$
ضربه یا ضربه ویژه، $s$	$I_{sp}$
گروه بی بعد انتقال جرم، $J_D = (F/G) Sc^{2/3}$	$J_D$
گروه بی بعد انتقال گرما، $J_H = (h/C_{p,N_2H_4} G) Pr^{2/3}$	$J_H$
ضریب هدایت گرمایی، $W/m \cdot K$	$k$
نسبت ظرفیت‌های گرمایی ویژه، $C_p/C_v$ که $C_v = C_p - R'$ است.	$k'$
گرمای نهان تبخیر جزء $i$ ، $kJ/kmol$	$\lambda_i$
جرم مولکولی جزء $i$ ، $kg/kmol$	$M_i$
ویسکوزیته جزء $i$ ، $kg/m \cdot s$	$\mu_i$
شار مولی جزء $i$ ، $kmol/h \cdot m^2$	$N_i$
افت فشار، $Pa$	$\Delta P$
عدد بدون بعد پراتل	$Pr$
فشار بحرانی، $Pa$	$P_c$
کل گرمای منتقل شده در انتقال اجزا بین دو فاز منتقل شده، $kJ/h \cdot m^2$	$q_t$
حرارت محسوس منتقل شده، $kJ/h \cdot m^2$	$q_s$
ثابت جهانی گازها، $8.314 J/mol.K$	$R'$
عدد بدون بعد رینولدز	$Re''$
چگالی جزء $i$ ، $gr/cm^3$	$\rho_i$

عدد بدون بعد اشمیت	$Sc$
دمای توده گاز، $K$	$T$
دمای سطح کاتالیست، $K$	$T_i$
دمای کاهشی، $T/T_c$	$T_r$
دمای بحرانی و نیز دمای محفظه احتراق، $K$	$T_c$
ضریب کلی انتقال گرما، $kJ/K \cdot m^2 \cdot h$	$U$
کسر مولی جزء $i$ در توده گاز	$y_i$
طول بستر کاتالیستی یا طول محفظه احتراق، $cm$	$z$

## مراجع

1. Chen, X., Zhang, T., Xia, L., Li, T., Zheng, M., Wu, Z., Wang, X., Wei, Z., and Xin, Q., "Catalytic Decomposition of Hydrazine Over Supported Molybdenum Nitride Catalysts in a Monopropellant Thruster," Catalysis Letter, 79, No.1-4, pp. 21-25, 2002.
2. Schmidt, E. W., Hydrazine and its Derivatives, 2nd edn., John Wiley & Sons, 2001.
3. Vieira, R., Bastos-Netto, D., Ledoux, M. J., and Pham-Huu, C., "Hydrazine Decomposition Over iridium Supported on Carbon Nanofibers Composite for Space Applications: Near Actual Flight Conditions Tests," Applied Catalysis A: General, 279, pp. 35-40, 2005.
4. Treybal, E. R., Mass Transfer Operations, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw- Hill, 1981.
5. Perry, H. R., Perry's chemical engineers' handbook, 7<sup>th</sup> edition, McGraw- Hill, 1997.
6. Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N., Transport Phenomena, 2nd edn., John Wiley & Sons, 2002.
7. Sutton, G. P. and Biblarz, O., Rocket Propulsion Elements, 7<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons, 2001.
8. Ergun, S., and Orning, A. A., "Fluid Flow Through Packed Columns," Chemical Engineering Progress, 48, pp. 89-94, 1952.
9. Breves, E. O., "Assembly and Testing of a Catalytic Hydrazine Gas Generator," Final Rept., ESA-CR (P)-1322, 1980.
10. Shankar, V., Ram, K. A. and Bhaskaran, K. A., "Experimental Investigation of the 10-N Catalytic Hydrazine Thruster," Acta Astronaut. 12, pp. 237-249, 1985.
11. Gill, W., and Elizidepaula, F. C., "Catalytic Decomposition of Hydrazine for Micropropulsion," 4<sup>th</sup> Braz. Congr. Of Energy, 1987.

## English Abstract

# Modeling of Catalytic Propulsion System at Incomplete Combustion State

**Sh. Ghanbari Pakdehi, M. Mozaffari Noshari and A. A. Hashemipour Rafsanjani**  
Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology

*Catalytic propulsion system is used in adjustment of satellite orbits. Hydrazine is conventionally used as propellant of the system, whose decomposition in the presence of Ir/ $\gamma$ -Alumina catalyst causes hot gases, which leads to the propulsion force for the above purpose. This decomposition process, which is a catalytic combustion, comprises production and subsequent decomposition of ammonia. The specific impulse of such a system is 180-240 seconds. If there is any problem in the catalyst which causes hydrazine decomposition to result only in ammonia, the combustion is incomplete, in which case system performance will be below optimum. In this paper, the performance of the system is modeled in the incomplete combustion state, whereby the results show that the specific impulse in the condition is 150 seconds. This model is expected to provide proper insight into the relationships governing the system. Existing experimental data are also in line with those of the present model.*

**Keywords:** Catalytic propulsion system, Incomplete combustion, Performance, Hydrazine, Modeling