

کد محاسبه تغییرات دمای آدیاباتیک و ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب نرخ تجزیه هیدرازین و آمونیاک در محفظه واکنش تراسترهای تک پیشراانه هیدرازینی

سید رشاد روح الامینی*

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی
پژوهشگاه فضایی ایران
rashad.rohoulamini@gmail.com

محمد علی امیری فر

کارشناس ارشد مهندسی هوافضا
پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی
پژوهشگاه فضایی ایران
amiryfar@gmail.com

پوریا میکانیکی

کارشناس ارشد مهندسی هوافضا
پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی
پژوهشگاه فضایی ایران
pouria.mikaniki70@gmail.com

چکیده

جهت و راستای خود قادر به انجام مأموریت‌های فضایی محوله برای مدت زمان طولانی

نخواهد بود؛ بنابراین تأمین سامانه پیشرانش به منظور انجام مأموریت‌های فضایی اجتناب ناپذیر می‌باشد. از سوی دیگر، با توجه به حیاتی بودن سامانه‌های پیشرانش فضایی و عدم تمایل صاحبان این فناوری به در اختیار قرار دادن آن‌ها، تأمین این سامانه‌ها به طور حتم با دشواری‌ها و هزینه‌های بسیار زیاد و گزاف همراه خواهد بود [۱].

تراسترهای تک پیشراانه

در میان پیشران‌های فضایی متعارف و متداول، تراسترهای شیمیایی مایع از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. این نوع از پیشران‌های فضایی در عملیات انتقال به مدارهای بالاتر از جمله انتقال به مدار زمین آهنگ و یا کنترل وضعیت و موقعیت مداری فضاپیماها و ماهواره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. تراسترهای شیمیایی مایع در دامنه گسترده‌ای از نیروی تراست (جلوبرندگی) و ضربه ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرند. تراسترهای تک پیشراانه^۲، شاخه‌ای از تراسترهای شیمیایی مایع می‌باشند که با توجه به سطح نیروی تراست، ضربه ویژه و همچنین رژیم عملکردی منحصر به فردشان غالباً بیشترین کاربری را در مأموریت‌های فضایی دارا می‌باشند. اگرچه تراسترهای تک پیشراانه از مقدار ضربه ویژه نسبتاً پایینی برخوردار می‌باشند؛ اما سادگی، ایمنی، عدم نیاز به توان‌های الکتریکی بالا و قابلیت اطمینان بالای این نوع از تراسترهای شیمیایی مایع موجب مقبولیت استفاده گسترده از آن‌ها گردیده است. همچنین، امکان روشن و خاموش کردن به دفعات، کنترل پذیری مناسب و سابقه طولانی مدت استفاده موفقیت آمیز از تراسترهای تک پیشراانه سبب گشته است که این تراسترها به عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین پیشران‌های مورد استفاده در حوزه پیشرانش فضایی شناخته شوند.

پیشراانه

هیدرازین مایعی بی رنگ، روغنی و قابل اشتعال با بویی شبیه به آمونیاک است که بسیار سمی، خطرناک و ناپایدار می‌باشد. به طور کلی، خواص فیزیکی هیدرازین بسته به میزان غلظت آن در محلول آبی تغییر می‌کند. به عنوان مثال، چگالی هیدرازین خالص تقریباً ۱۰۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب و چگالی محلول آبی آن بسته به میزان غلظت از ۱۰۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب

در میان پیشران‌های فضایی متداول، تراسترهای شیمیایی مایع از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. تراسترهای تک پیشراانه هیدرازینی، شاخه‌ای از تراسترهای شیمیایی مایع می‌باشند که غالباً بیشترین کاربری را در حوزه پیشرانش مأموریت‌های فضایی دارا می‌باشند. با توجه به سطح نیروی تراست، ضربه ویژه و همچنین رژیم عملکردی منحصر به فرد تراسترهای تک پیشراانه هیدرازینی، معمولاً این نوع از پیشران‌های فضایی در عملیات انتقال به مدارهای بالاتر از جمله انتقال به مدار زمین آهنگ و یا کنترل وضعیت و موقعیت مداری فضاپیماها و ماهواره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله پژوهشی، با ایجاد و توسعه یک کد مبتنی بر روابط ترمودینامیکی، تغییرات دمای آدیاباتیک و ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب نرخ تجزیه هیدرازین و آمونیاک در محفظه واکنش تراسترهای تک پیشراانه هیدرازینی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش نرخ تجزیه هیدرازین توأم با کاهش نرخ تجزیه آمونیاک در تراسترهای تک پیشراانه موجب افزایش دمای آدیاباتیک محفظه واکنش از حدود ۸۷۰ کلوین (تجزیه کامل آمونیاک) تا حدود ۱۶۵۰ کلوین (عدم تجزیه آمونیاک) می‌گردد. با افزایش دمای آدیاباتیک محفظه واکنش، ظرفیت گرمایی ویژه محصولات گازی ناشی از تجزیه هیدرازین نیز افزایش می‌یابد. همچنین، نشان داده شده است که افزایش فشار محفظه واکنش سبب کاهش تدریجی نرخ تجزیه آمونیاک و به تبع آن افزایش جزئی دمای آدیاباتیک می‌گردد.

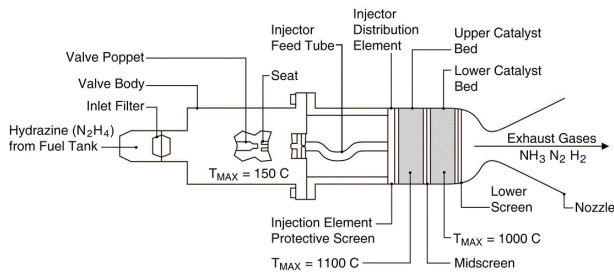
کلمات کلیدی: تراستر تک پیشراانه، هیدرازین، آمونیاک، فشار محفظه واکنش، دمای آدیاباتیک، ظرفیت گرمایی ویژه.

مقدمه

یکی از نیازها و چالش‌های اصلی پیش رو در مسیر تسخیر فضا و استفاده از ظرفیت‌های بالقوه این حوزه، پیشرانش فضایی^۱ می‌باشد. پیشرانش فضایی، هر روشی است که به منظور شتاب دادن فضاپیماها و ماهواره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و به طور کلی، حوزه فعال بسیاری از تحقیقات فضایی حال حاضر مراکز پژوهشی مهم دنیا را به خود اختصاص داده است که نتیجه این تحقیقات، بهبود روش‌های پیشرانش موجود و توسعه روش‌های جدید پیشرانش فضایی می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که هیچ ماهواره و یا وسیله نقلیه فضایی بدون وجود سامانه‌ای برای به حرکت درآوردن یا تغییر

² Monopropellant thruster

¹ Space propulsion



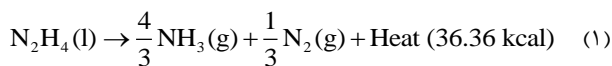
شکل ۱: شماتیک یک تراستر تک پیشرانه هیدرازینی [۳].

همان طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌گردد، جریان پیشرانه مایع (هیدرازین) پس از عبور از فیلتر به وسیله یک شیر سلونوئیدی که جزء جدایی ناپذیر یک تراستر تک پیشرانه می‌باشد، کنترل می‌گردد. به منظور آزاد سازی انرژی شیمیایی پیشرانه، از مکانیسم تجزیه استفاده می‌شود. رایج ترین روش تجزیه پیشرانه، استفاده از بسترهای کاتالیستی می‌باشد. شل ۴۰۵ (شامل ۳۲ درصد فلز فعال ایریدیوم بر پایه گرانول‌های گاما آلومینا) یکی از متداول ترین کاتالیست‌های مورد استفاده در تراسترهای تک پیشرانه هیدرازینی می‌باشد. هیدرازین با عبور از بستر کاتالیستی و طی یک واکنش به شدت گرمازا به محصولات داغ گازی شکل تجزیه می‌شود. در نهایت، گازهای داغ حاصل از تجزیه هیدرازین با عبور از یک نازل همگرا - واگرا تولید نیروی تراست می‌کنند.

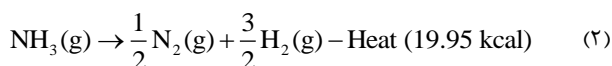
نتایج

تجزیه هیدرازین در تراستر تک پیشرانه

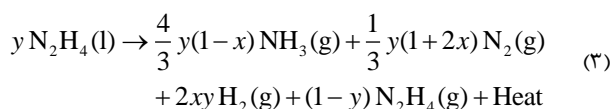
فرآیند تجزیه کاتالیستی هیدرازین در یک تراستر تک پیشرانه را می‌توان به صورت ایده آل شامل دو مرحله اصلی در نظر گرفت و از واکنش‌های میانی صرف نظر نمود. در مرحله اول، هیدرازین مایع طی یک واکنش به شدت گرماده^۴ مطابق رابطه (۱) به گازهای آمونیاک و نیتروژن تجزیه می‌گردد.



در مرحله دوم، گاز آمونیاک حاصل از تجزیه هیدرازین مایع طی یک واکنش گرماگیر^۳ مطابق رابطه (۲) به گازهای نیتروژن و هیدروژن تجزیه می‌گردد. سرعت واکنش مرحله دوم بسیار کمتر از سرعت واکنش مرحله اول می‌باشد.



فرآیند کلی تجزیه کاتالیستی هیدرازین در تراستر تک پیشرانه به صورت یک واکنش گرماده مطابق رابطه (۳) می‌باشد که شامل محصولات گازی آمونیاک، نیتروژن، هیدروژن و احتمالاً مقدار کمی هیدرازین تجزیه نشده می‌باشد.



در رابطه (۳)، y به عنوان نرخ تجزیه هیدرازین بر حسب درصد و x به عنوان نرخ تجزیه آمونیاک بر حسب درصد شناخته می‌شوند. لازم به ذکر است، نرخ تجزیه آمونیاک به عوامل متعددی نظیر فشار محفظه واکنش، نوع کاتالیست، اندازه و هندسه محفظه واکنش و زمان ماند آمونیاک در بستر

(۱۵ درصد هیدرازین) تا ۱۰۳۲ کیلوگرم بر مترمکعب (۶۴ درصد هیدرازین) تغییر می‌کند. نقطه ذوب هیدرازین خالص در فشار اتمسفر تقریباً ۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که برای محلول آبی ۳۵/۲ درصد هیدرازین آن تقریباً به مقدار ۶۴/۶- درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. همچنین، نقطه جوش هیدرازین خالص در حدود ۱۱۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که در محلول ۱۵/۴ درصد هیدرازین آن، این مقدار به ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. به طور کلی، محدوده دمایی نقطه جوش محلول‌های آبی هیدرازین بسیار نزدیک به آب می‌باشد [۲]. برخی از خواص فیزیکی و ترموشیمیایی هیدرازین خالص در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: برخی از خواص فیزیکی و ترموشیمیایی هیدرازین خالص [۲].

N ₂ H ₄	فرمول شیمیایی
خواص فیزیکی	
۳۲/۰۴۵۲	جرم مولکولی (گرم بر مول)
۱۰۲۱	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲	نقطه ذوب در فشار اتمسفر (درجه سانتی‌گراد)
۱۱۴	نقطه جوش در فشار اتمسفر (درجه سانتی‌گراد)
۰/۰۱	فشار بخار در دمای ۳۰/۷ درجه سانتی‌گراد (بار)
۰/۸۷۶	لزجت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (سانتی‌پويز)
خواص ترموشیمی	
۱۲۱/۵۲	آنتروپی استاندارد (ژول بر مول بر کلون)
۵۰/۶۳	آنتالپی استاندارد تشکیل (کیلوژول بر مول)

استاندارد استفاده از هیدرازین در تراسترهای تک پیشرانه شامل هیدرازین (حداقل ۹۸/۵ درصد)، آب (حداکثر ۱ درصد)، ذرات ریز (حداکثر ۱ میلی گرم بر لیتر)، کلرید (حداکثر ۰/۰۰۵ درصد)، آنیلین (حداکثر ۰/۵ درصد)، آهن (حداکثر ۰/۰۰۲ درصد)، دی‌اکسید کربن (حداکثر ۰/۰۰۳ درصد) و دیگر مواد کربن دار (حداکثر ۰/۰۲ درصد) می‌باشد. اگرچه تاکنون هیدرازین به دلیل برخورداری از انرژی فعال سازی کم و همچنین واکنش تجزیه خود به خودی به شدت گرمازا به عنوان پرکاربردترین پیشرانه مایع در تراسترهای تک پیشرانه فضایی مورد استفاده قرار گرفته است؛ اما سعی بودن هیدرازین و محصولات گازی ناشی از تجزیه آن، توجه بسیاری از شرکت‌های فضایی را به سمت استفاده از پیشرانه‌های سبز نظیر هیدروژن پر اکسید^۱ معطوف نموده است. پیشرانه دیگری تحت عنوان هیدروکسیل آمونیم نیترات^۲ علاوه بر آلودگی زیست محیطی کم، از مقدار ضربه ویژه بیشتری نسبت به هیدرازین برخوردار می‌باشد؛ اما کاربری آن در تراسترهای تک پیشرانه فضایی صرفاً در مرحله آزمایشگاهی گزارش گردیده است.

تراسترهای تک پیشرانه هیدرازینی

در شکل ۱، نمونه‌ای از یک تراستر تک پیشرانه هیدرازینی به همراه اجزای اصلی آن شامل فیلتر، شیر سلونوئیدی، انژکتور، بسترهای کاتالیست و نازل همگرا - واگرا به صورت شماتیک نشان داده شده است [۳].

³ Exothermic

⁴ Endothermic

¹ Hydrogen peroxide

² Hydroxyl Ammonium Nitrate (HAN)

جرم مولی مخلوط محصولات گازی حاصل از تجزیه هیدرازین و آمونیاک با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد.

$$M_{\text{mix}} = \frac{\sum m}{\sum n} = \frac{96}{4xy + 2y + 3} \left[\frac{\text{gr}}{\text{mol}} \right] \quad (13)$$

ثابت گاز مخلوط محصولات گازی حاصل از تجزیه هیدرازین و آمونیاک با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$R_{\text{mix}} = \frac{\bar{R}}{M_{\text{mix}}} = \frac{8314.51(4xy + 2y + 3)}{96} \left[\frac{\text{J}}{\text{gr.K}} \right] \quad (14)$$

دمای آدیاباتیک در تراستر تک پیشرانه

با فرض آدیاباتیک بودن (عدم تولید و اتلاف حرارت) واکنش تجزیه هیدرازین و آمونیاک، معادله تعادل انرژی به صورت رابطه (۱۵) بیان می‌شود.

$$3y h_{\text{N}_2\text{H}_4(\text{l})} \rightarrow 4y(1-x) h_{\text{NH}_3(\text{g})} + y(1+2x) h_{\text{N}_2(\text{g})} + 6xy h_{\text{H}_2(\text{g})} + 3(1-y) h_{\text{N}_2\text{H}_4(\text{g})} \quad (15)$$

انتالپی‌های مولی به صورت روابط (۱۶) الی (۲۰) بیان می‌گردند.

$$h_{\text{N}_2\text{H}_4(\text{l})} = 50.62 \text{ (kJ/mol)} \quad (16)$$

$$h_{\text{NH}_3(\text{g})} = 11\theta^2 + 33.43\theta - 57.52 \text{ (kJ/mol)} \quad (17)$$

$$h_{\text{N}_2(\text{g})} = 2.35\theta^2 + 27.72\theta - 8.56 \text{ (kJ/mol)} \quad (18)$$

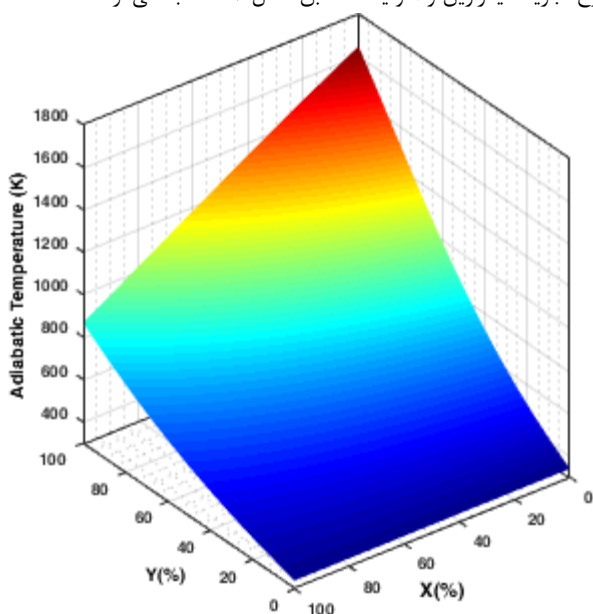
$$h_{\text{H}_2(\text{g})} = 1.75\theta^2 + 26.96\theta - 8.05 \text{ (kJ/mol)} \quad (19)$$

$$h_{\text{N}_2\text{H}_4(\text{g})} = -19.85\theta^2 + 169.64\theta - 4.67 \text{ (kJ/mol)} \quad (20)$$

در روابط (۱۶) الی (۲۰)، نسبت دما به صورت رابطه (۲۱) تعریف می‌گردد.

$$\theta = \frac{T_{\text{adiabatic}}(\text{K})}{1000} \quad \& \quad 0.3 < \theta < 2 \quad (21)$$

با جایگذاری روابط (۱۶) الی (۲۰) در معادله تعادل انرژی و حل معادله درجه دوم حاصل شده، تغییرات دمای آدیاباتیک محفظه واکنش بر حسب نرخ تجزیه هیدرازین و آمونیاک مطابق شکل ۳ محاسبه می‌گردد.



شکل ۳: تغییرات دمای آدیاباتیک بر حسب نرخ تجزیه هیدرازین و آمونیاک.

کاتالیست وابسته می‌باشد. حرارت حاصل از واکنش تجزیه هیدرازین مایع و گاز آمونیاک طبق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد.

$$\text{Heat} = \Delta h = 36.36 - 19.95 = 16.41 \text{ kcal/mol} \quad (4)$$

کسر مولی محصولات گازی حاصل از تجزیه هیدرازین و آمونیاک با استفاده از روابط (۵) الی (۸) محاسبه می‌گردند.

$$\text{Mole fraction of NH}_3(\text{g}) = \frac{4y(1-x)}{4xy + 2y + 3} \quad (5)$$

$$\text{Mole fraction of N}_2(\text{g}) = \frac{y(1+2x)}{4xy + 2y + 3} \quad (6)$$

$$\text{Mole fraction of H}_2(\text{g}) = \frac{6xy}{4xy + 2y + 3} \quad (7)$$

$$\text{Mole fraction of N}_2\text{H}_4(\text{g}) = \frac{3(1-y)}{4xy + 2y + 3} \quad (8)$$

کسر جرمی محصولات گازی حاصل از تجزیه هیدرازین و آمونیاک نیز با استفاده از روابط (۹) الی (۱۲) به دست می‌آیند.

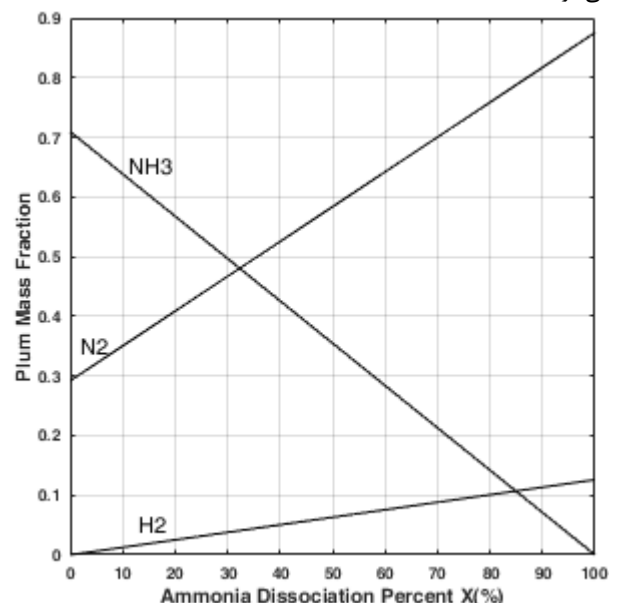
$$\text{Mass fraction of NH}_3(\text{g}) = \frac{68.12y(1-x)}{96} \quad (9)$$

$$\text{Mass fraction of N}_2(\text{g}) = \frac{28.01y(1+2x)}{96} \quad (10)$$

$$\text{Mass fraction of H}_2(\text{g}) = \frac{12.09xy}{96} \quad (11)$$

$$\text{Mass fraction of N}_2\text{H}_4(\text{g}) = \frac{96.13(1-y)}{96} \quad (12)$$

با فرض تجزیه کامل هیدرازین در تراستر تک پیشرانه، تغییرات کسر جرمی محصولات گازی حاصل از تجزیه هیدرازین شامل آمونیاک، نیتروژن و هیدروژن بر حسب نرخ تجزیه آمونیاک به صورت نمودار شکل ۲ نشان داده می‌شود.



شکل ۲: تغییرات کسر جرمی محصولات گازی حاصل از تجزیه هیدرازین بر حسب نرخ تجزیه آمونیاک.

ظرفیت گرمایی ویژه در تراستر تک پیشراانه

ظرفیت گرمایی ویژه به صورت رابطه (۲۲) تعریف می‌گردد.

$$c_p = \frac{dh}{d\theta} \left[\frac{J}{mol.K} \right] \quad (22)$$

ظرفیت گرمایی ویژه محصولات حاصل از تجزیه با استفاده از روابط (۲۳) الی (۲۶) بیان می‌گردند.

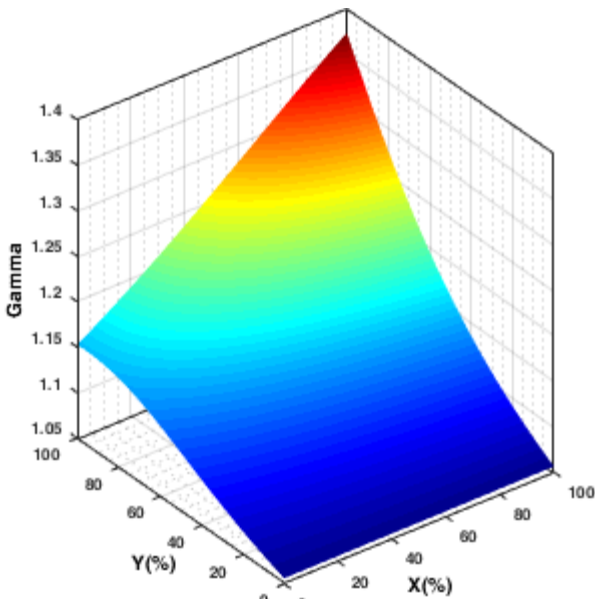
$$c_{pNH_3(g)} = 22\theta + 33.43 \text{ (J/mol.K)} \quad (23)$$

$$c_{pN_2(g)} = 4.7\theta + 27.72 \text{ (J/mol.K)} \quad (24)$$

$$c_{pH_2(g)} = 3.5\theta + 26.96 \text{ (J/mol.K)} \quad (25)$$

$$c_{pN_2H_4(g)} = -39.7\theta + 169.64 \text{ (J/mol.K)} \quad (26)$$

حال با استفاده از توزیع دمای آدیباتیک به دست آمده، می‌توان تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه محصولات را مطابق شکل ۴ بر حسب نرخ تجزیه هیدرازین و آمونیاک محاسبه نمود.



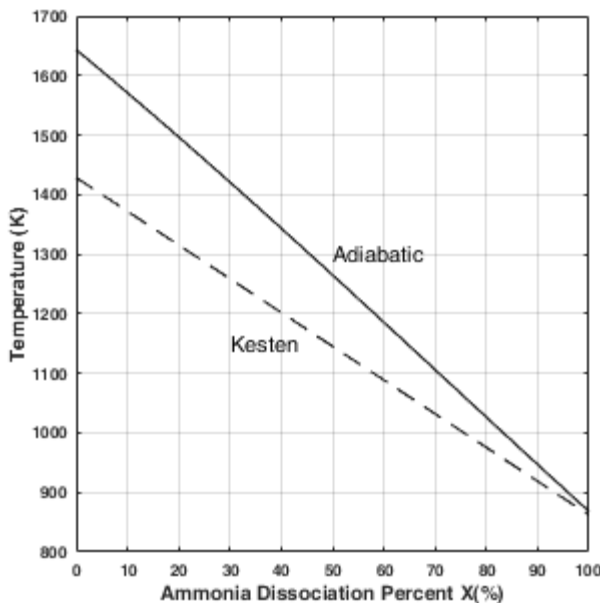
شکل ۵: تغییرات گاما بر حسب نرخ تجزیه هیدرازین و آمونیاک.

بحث بر روی نتایج

رابطه تجربی کستن به منظور تخمین دمای آدیباتیک محفظه واکنش به صورت رابطه (۲۹) بیان می‌گردد.

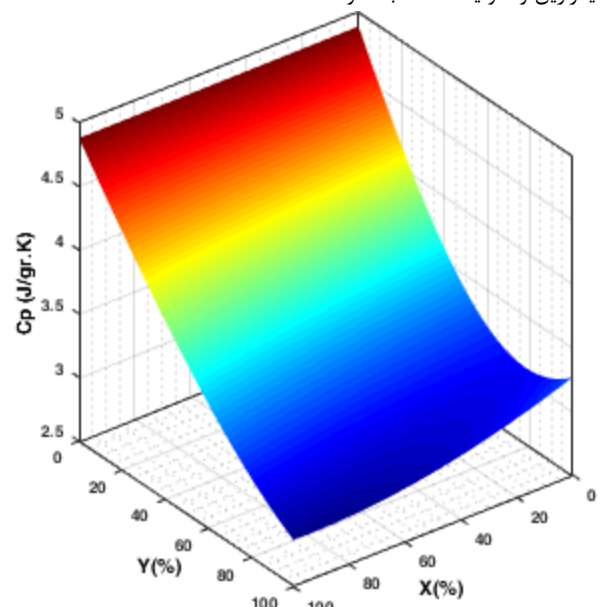
$$T_{Kesten} (K) = 566.66(1-x) + 0.616(P_{ch}) + 852.77 \quad (29)$$

نمودار تغییرات دمای آدیباتیک محفظه واکنش با فرض تجزیه کامل هیدرازین در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین نمودار تجربی دمای کستن نیز جهت مقایسه در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۶: تغییرات دمای آدیباتیک و دمای کستن محفظه واکنش بر حسب نرخ تجزیه آمونیاک.

منحنی تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب نرخ تجزیه آمونیاک و با فرض تجزیه کامل هیدرازین در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۴: تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب نرخ تجزیه هیدرازین و آمونیاک.

ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت و نسبت ظرفیت گرمایی ویژه (گاما) به ترتیب با استفاده از روابط (۲۷) و (۲۸) محاسبه می‌گردند.

$$c_v = c_p - R_{mix} \left[\frac{J}{mol.K} \right] \quad (27)$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (28)$$

نمودار تغییرات نسبت ظرفیت گرمایی ویژه (گاما) محصولات بر حسب نرخ تجزیه هیدرازین و آمونیاک در شکل ۵ نشان داده شده است.

$$\frac{P_{NH_3}}{P_{N_2}^{1/2} P_{H_2}^{3/2}} = K_p(T) \quad (30)$$

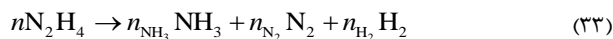
ثابت تعادل در رابطه (۳۰) با استفاده از رابطه (۳۱) محاسبه می‌شود که در آن دما بر حسب کلونین می‌باشد.

$$K_p(T) \approx 1.089 \times 10^{-6} \times e^{\frac{6289}{T(K)}} \quad (31)$$

فشار محفظه واکنش بر حسب فشارهای جزئی محصولات تجزیه به صورت رابطه (۳۲) بیان می‌گردد.

$$p = P_{NH_3} + P_{N_2} + P_{H_2} \quad (32)$$

معادله واکنش را بر حسب چگالی مولی به صورت رابطه (۳۳) بازنویسی می‌شود.



با به کارگیری قانون بقای اجزا، رابطه (۳۴) حاصل می‌گردد.

$$\text{for H} \rightarrow 4n = 3n_{NH_3} + 2n_{H_2} \quad (34)$$

$$\text{for N} \rightarrow 2n = n_{NH_3} + 2n_{N_2}$$

با استفاده از رابطه $p = nRT$ رابطه (۳۵) بر حسب فشارهای جزئی به دست می‌آید.

$$2 = \frac{3P_{NH_3} + 2P_{H_2}}{P_{NH_3} + 2P_{N_2}} \quad (35)$$

روابط (۳۰) الی (۳۲) و (۳۵) یک دستگاه ۴ معادله و ۴ مجهول شامل فشارهای جزئی و دما را تشکیل می‌دهند. این دستگاه معادلات با تعریف نسبت فشار آمونیاک به صورت رابطه (۳۶) حل می‌گردد.

$$z = \frac{P_{NH_3}}{p} \quad (36)$$

پس از انجام برخی محاسبات ساده، معادلات به صورت رابطه (۳۷) نشان داده می‌شوند.

$$\frac{P_{N_2}}{p} = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{z}{2} \right)$$

$$\frac{P_{H_2}}{p} = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{5z}{4} \right) \quad (37)$$

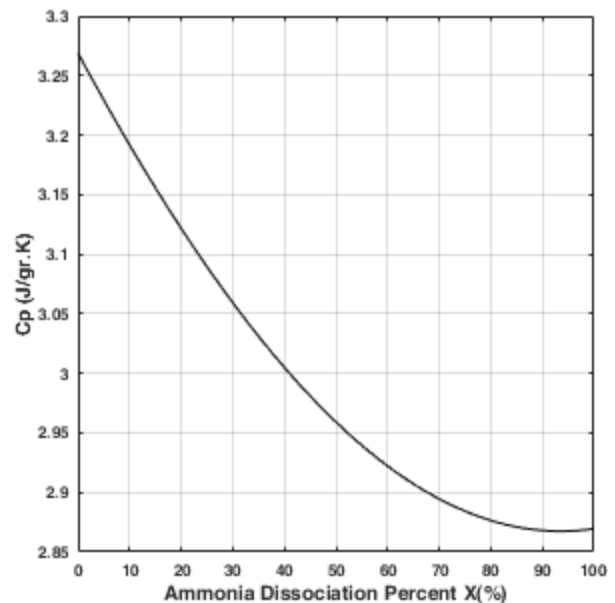
$$K_p(T) = \frac{z/p}{(P_{N_2}/p)^{1/2} (P_{H_2}/p)^{3/2}}$$

رابطه نسبت فشار جزئی آمونیاک بر حسب نرخ تجزیه آمونیاک (x) به صورت رابطه (۳۸) بیان می‌شود.

$$z = \frac{\frac{4}{3}(1-x)}{\frac{4}{3}(1-x) + \frac{1}{3}(1+2x) + 2x} = \frac{4(1-x)}{5+4x} \quad (38)$$

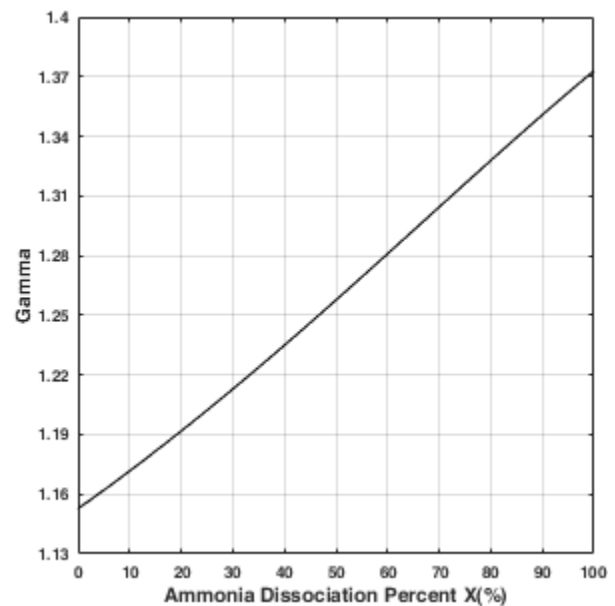
با استفاده از رابطه (۳۸)، نرخ تجزیه آمونیاک بر حسب نسبت فشار جزئی آمونیاک به صورت رابطه (۳۹) حاصل می‌شود.

$$x = \frac{1-5z/4}{1+z} \quad (39)$$



شکل ۷: تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه محصولات بر حسب نرخ تجزیه آمونیاک.

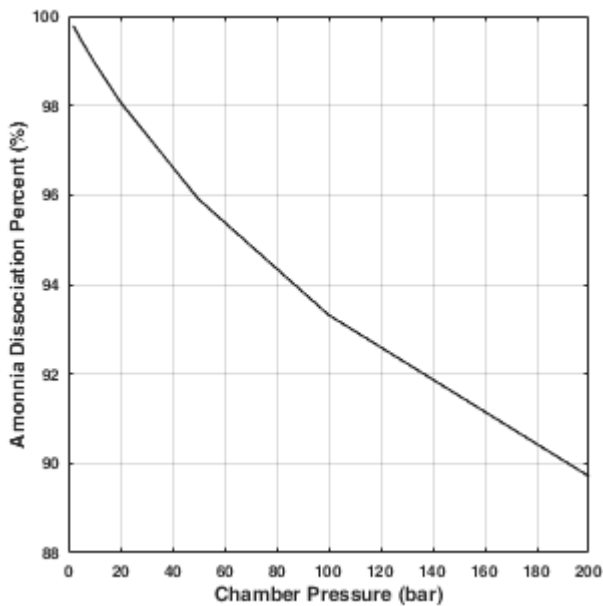
همچنین نمودار تغییرات نسبت ظرفیت گرمایی ویژه (گاما) بر حسب نرخ تجزیه آمونیاک و با فرض تجزیه کامل هیدرازین در شکل ۸ ارائه گردیده است.



شکل ۸: تغییرات گامای محصولات بر حسب نرخ تجزیه آمونیاک.

تا این بخش، نرخ تجزیه تئوری آمونیاک به صورت یک متغیر مستقل در محاسبات تراسترهای تک پیشران هیدرازینی در نظر گرفته شده است؛ اما در مباحث تجربی، این پارامتر به زمان ماند آمونیاک در بستر کاتالیست و شرایط عملکردی به خصوص فشار محفظه واکنش وابسته می‌باشد. چنانچه زمان ماند جهت تجزیه کامل آمونیاک به صورت نامحدود فرض گردد، محصولات گازی ناشی از تجزیه هیدرازین به همراه آمونیاک باقی مانده متناسب با فشار محفظه واکنش به تعادل خواهند رسید. در این شرایط تعادلی، مطابق با قانون اثر جرم^۱ در شیمی، محصولات تجزیه از رابطه (۳۰) تبعیت می‌کنند.

¹ Law of mass action



شکل ۱۰: تغییرات نرخ تجزیه آمونیاک بر حسب فشار محفظه

همان‌طور که در شکل ۹ و ۱۰ مشاهده می‌گردد، چنانچه در تراسترهای تک پیش‌راشه هیدرازینی شرایط تعادلی برقرار گردد، در تمامی حالات آمونیاک تقریباً به طور کامل تجزیه می‌گردد. از آنجایی که این شرایط برای تراسترهای تک پیش‌راشه هیدرازینی مطلوب و مساعد نمی‌باشد، تنها پارامتر کنترل میزان تجزیه آمونیاک زمان استقرار (مانند) در محفظه واکنش می‌باشد؛ بنابراین هندسه محفظه واکنش تراسترهای تک پیش‌راشه هیدرازینی به عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای طراحی به منظور تشخیص عملکرد و کارایی تراستر در نظر گرفته می‌شود.

نتیجه‌گیری

تراسترهای تک پیش‌راشه هیدرازینی، شاخه‌ای از تراسترهای شیمیایی مایع می‌باشند که با توجه به سطح نیروی تراست، ضربه ویژه و همچنین رژیم عملکردی منحصر به فردشان غالباً بیشترین کاربری را در عملیات انتقال به مدارهای بالاتر از جمله انتقال به مدار زمین آهنگ و یا کنترل وضعیت و موقعیت مداری فضاپیماها و ماهواره‌ها دارا می‌باشند. با استفاده از کد توسعه داده شده مبتنی بر روابط ترمودینامیکی در این مقاله پژوهشی می‌توان نتیجه گرفت که با فرض تجزیه کامل هیدرازین در تراسترهای تک پیش‌راشه، دمای آدیباتیک محفظه واکنش بر حسب نرخ تجزیه آمونیاک از حدود ۱۶۵۰ کلوین (صفر درصد تجزیه آمونیاک) تا حدود ۸۷۰ کلوین (صد درصد تجزیه آمونیاک) کاهش می‌یابد. کاهش دمای آدیباتیک محفظه واکنش موجب کاهش ظرفیت گرمایی ویژه و همچنین نسبت ظرفیت گرمایی ویژه (گاما) محصولات گازی حاصل از تجزیه می‌گردد. همچنین نشان داده شده است، با فرض برقراری شرایط تعادلی در تراسترهای تک پیش‌راشه هیدرازینی، آمونیاک تقریباً به طور کامل تجزیه می‌گردد و افزایش فشار محفظه واکنش موجب کاهش نامحسوس نرخ تجزیه آمونیاک و به تبع آن افزایش تدریجی دمای آدیباتیک محصولات می‌گردد.

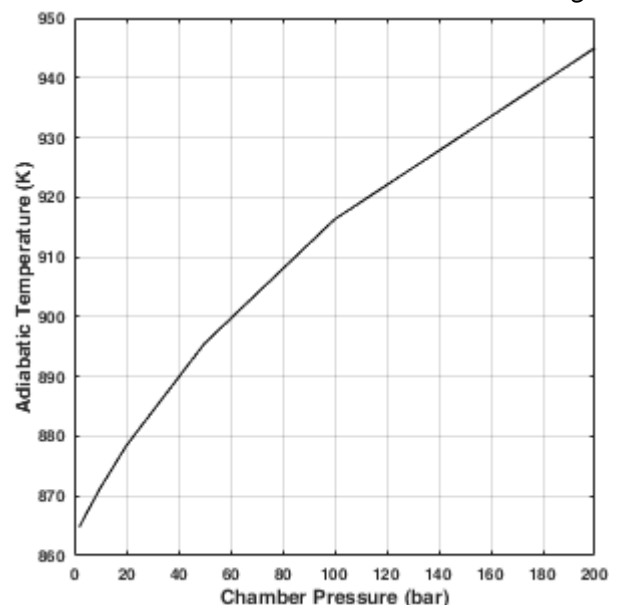
فهرست علائم

با مقداردهی چند فشار معلوم و استفاده از یک حدس اولیه برای دما در دستگاه معادلات اشاره شده، مقدار نسبت فشار جزئی آمونیاک (Z) و پس از آن مقدار نرخ تجزیه آمونیاک (X) محاسبه می‌شود. حال با انجام چند محاسبه تکراری از این فرآیند، دمای به دست آمده از این محاسبات می‌بایست با دمای حاصل شده از رابطه تعادل انرژی یکسان گردد. در عمل، انتخاب دمای آدیباتیک به دست آمده از رابطه تعادل انرژی به عنوان حدس اولیه برای هر تکرار، همگرایی سریع محاسبات را تضمین خواهد نمود. جدول ۲ برخی از نتایج این محاسبات را به عنوان تابعی از فشار بیان می‌کند.

جدول ۲: تغییرات دمای آدیباتیک بر حسب فشار محفظه واکنش

فشار (بار)	نسبت فشار جزئی آمونیاک	نرخ تجزیه آمونیاک	دما (کلوین)
۲	۰/۰۰۰۹۸	۰/۹۹۷۸	۸۶۴/۸
۵	۰/۰۰۲۴	۰/۹۹۴۶	۸۶۷/۳
۱۰	۰/۰۰۴۶	۰/۹۸۹۷	۸۷۱/۳
۲۰	۰/۰۰۸۶	۰/۹۸۰۸	۸۷۸/۴
۵۰	۰/۰۱۸۵	۰/۹۵۹۱	۸۹۵/۵
۱۰۰	۰/۰۳۰۶	۰/۹۳۳۲	۹۱۶/۳
۲۰۰	۰/۰۴۷۹	۰/۸۹۷۱	۹۴۵

نمودار تغییرات دمای آدیباتیک بر حسب فشار محفظه واکنش در شکل ۹ نشان داده شده است



شکل ۹: تغییرات دمای آدیباتیک بر حسب فشار محفظه

نمودار تغییرات نرخ تجزیه آمونیاک بر حسب فشار محفظه واکنش در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

مراجع

۱- عبدالرحیم رضایی‌ها، "طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی رانشگر پالس پلاسمایی"، (۱۳۸۸)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا، دی ماه ۱۳۸۸.

۲- Chase, M.W., Jr., NIST-JANAF., (1998), "Thermochemical Tables", Fourth Edition, J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph 9, 1998, 1951-1.

۳- Schmucki J., "Typical Hydrazine (N₂H₄) Rocket Engine", Retrieved December 13, (2017), from joshuajschmucki on the World Wide Web: <https://joshuajschmucki.weebly.com/monopropellant.html>

۴- Sanchez, M.M., Paulo Lozano, P., "Session12: Monopropellant Thrusters", Retrieved December 1۵, (2017), from on the World Wide Web: https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics_and_astronautics/16.522_space_propulsion_spring_2015/index.htm

گرمای ویژه در فشار ثابت، $\frac{J}{mol.K}$
 c_p

گرمای ویژه در حجم ثابت، $\frac{J}{mol.K}$
 c_v

آنتالپی، $\frac{kJ}{mol}$

ثابت تعادل واکنش در فشار ثابت
 K_p

جرم، gr
 m

جرم مولکولی، $\frac{gr}{mol}$
 M

مول، mol
 n

فشار، bar
 p

ثابت جهش‌گانی گاز، $\frac{J}{mol.K}$
 \bar{R}

ثابت گسخت‌گاز، $\frac{J}{gr.K}$
 R

دمای آدیاباتیک، K
 T

نرخ تجزیه آمونیاک (٪)
 x

نرخ تجزیه هیدروژن (٪)
 y

نسبت فشار جزئی آمونیاک

z

فهرست علائم یونانی

نسبت ظرفیت گرمایی ویژه (گاما)
 γ

چگالی، $\frac{Kg}{m^3}$
 ρ

زیرنویس‌ها

محفظه واکنش
 ch

گاز
 g

میع
 l

مخلوط
 mix