



مطالعه پارامتری تولید کننده گاز پیروتکنیک کیسه هوای خودرو

کیومرث مظاهری^{۱*}، حسین شجاعی برجویی^۲

۱- استاد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، Kiumars@modares.ac.ir

چکیده- در بیشتر سیستم‌های کیسه هوا در وسایل نقلیه، مخلوط گازی که کیسه هوا را پر می‌کند، از احتراق سریع یک سوخت جامد در درون یک محفظه احتراق به نام تولیدکننده گاز تولید می‌شود. در این مقاله فرایند احتراق در درون تولیدکننده گاز پیروتکنیک بر اساس یک مدل فیزیکی "صفر بعدی چند منطقه‌ای" بررسی شده است. سپس با مطالعه پارامتریک نشان داده شده است که عملکرد تولیدکننده گاز بیشتر تحت تأثیر مشخصات سوخت جامد نظیر جرم، اندیس احتراق و ضریب دمای سوخت جامد است و به اجزای سخت افزاری تولیدکننده گاز در محدوده تغییرات مجاز اعمال شده وابستگی چندانی ندارد. همچنین برای شبیه‌سازی تولیدکننده گاز پیروتکنیک هیبرید فشار اولیه محفظه گاز به میزان ۲۵ و ۵۰ برابر افزایش داده شد. در نتیجه این فشار اولیه، دمای عملکرد هم در محفظه احتراق و هم در تانک تخلیه کاهش یافت. بنابراین با پایین آمدن دمای عملکرد، بازده گرمایی در تولیدکننده گاز افزایش می‌یابد. پایین بودن دمای عملکرد در تولیدکننده گاز پیروتکنیک هیبرید مزیت این نوع تولیدکننده گاز را نسبت به نوع معمولی آن نشان می‌دهد، چرا که دمای عملکرد پایین در تولیدکننده گاز کیسه هوا احتمال صدمات ناشی از سوختگی در هنگام باز شدن کیسه هوا را کاهش می‌دهد.

کلیدواژگان: کیسه‌هوا، سوخت جامد، تولیدکننده گاز، شبیه‌سازی عددی، احتراق.

Parametric study of automotive airbag pyrotechnic inflator

K. Mazaheri^{1*}, H. Shojaee²

1. Prof., Mech. Eng. Dept., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

2. MSc. Student, Mech. Eng. Dept., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

* P. O. B. 14115-143, Tehran, Iran. kiumars@modares.ac.ir

Abstract- In most airbag systems, the gaseous mixture that fills up the airbag is produced by the fast combustion of a propellant in a combustion chamber called inflator. In this paper, the numerical study of combustion process in a pyrotechnic inflator was carried out based on a zero-dimensional multi zones model. The parametric study shows that the performance of inflator is more affected by the propellant characteristics such as mass, combustion index, and propellant temperature coefficient and is not significantly influenced by hardware elements of inflator. In order to simulate hybrid pyrotechnic inflator, the initial pressure of gas plenum was increased by 25 to 50 times. As a result, the performance both in combustion chamber and in discharge tank decreased. This lower temperature leads to a higher thermal efficiency.

Keyword: Airbag, Propellant, Inflator, Numerical Simulation, Combustion.

۱- مقدمه

تخلیه ساده یک گاز در یک محفظه تحت فشار بالا در دمای محیط به داخل یک کیسه باد شونده عمل می‌کرد. اولین کیسه هوایی که محتوی گاز پر کننده آن از احتراق سریع سوخت

به لحاظ تاریخی اولین نسل کیسه هوای مورد استفاده در اتومبیل در دهه ۱۹۶۰ ساخته شد [۲، ۱]. این کیسه هوا با

جامد^۱ ناشی می‌شد، در سال ۱۹۸۹ ساخته شد [۳].

استفاده از احتراق سوخت جامد در فناوری کیسه هوا از آن زمان تاکنون رایج‌ترین روش به کار رفته برای تولید گاز کیسه هوا است. یکی از مشخصه‌های مهم عملکرد تولیدکننده گاز کیسه هوا این است که در شرایط دمای محیطی متفاوت (۴۰- تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد) کمترین تغییرات را در پارامترهای خروجی‌اش داشته باشد. این پارامترها شامل فشار و دمای ایجاد شده در تولیدکننده گاز و همچنین نرخ جریان جرم گاز تخلیه شده از تولیدکننده گاز به درون کیسه هوا است. کیسه هوای طرح اولیه در شرایط دمایی متفاوت عملکرد یکنواختی نداشت. با استفاده از احتراق سوخت جامد برای تولید گاز محتوی کیسه هوا عملکرد یکنواخت تری برای تولیدکننده گاز در پهنه وسیعی از شرایط عملکرد در دمای محیطی متفاوت مشاهده شد. این امر به دلیل وابستگی ضعیف دمای شعله سوخت جامد مورد استفاده در کیسه هوا به دمای محیط است [۲].

بیشتر تحقیقات در رابطه با مباحث سیستم حفاظتی کیسه هوای خودرو شامل مطالعات مربوط به فرایند پر شدن کیسه هوا و دینامیک برخورد کیسه هوا با سرنشین خودرو و کنش و واکنش آنها بوده است [۴-۷]. در این تحقیقات مولفان به طور دقیق به دنبال مدل کردن احتراق درون تولیدکننده گاز نبوده‌اند. از جمله فرض‌هایی که در این تحلیل‌ها استفاده شده‌اند عبارتند از: خواص یکنواخت تانک تخلیه، ظرفیت گرمایی ثابت، دمای ثابت تولیدکننده گاز و شرایط آدیاباتیک در تانک تخلیه. تولید گاز و فرایند تخلیه جرم از پدیده‌هایی بسیار غیرخطی بوده و لازم است که بر اساس حل کامل معادلات بقا و ظرفیت گرمایی متغیر مدل شوند [۶]. اولین مطالعات بر اساس یک مدل کامل‌تر با در نظر گرفتن خواص ترمودینامیکی وابسته به دما برای مخلوط گونه‌های فاز گاز و فاز جامد^۲ و حل معادله بقای جرم گونه و انرژی برای مخلوط فاز گاز و فاز جامد توسط باتلر و همکارانش با همکاری مهندسان شرکت TRW در آمریکا صورت گرفت. ایشان طی دو مقاله در سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ مدلی برای تولیدکننده گاز پیروتکنیک کیسه هوا ارائه دادند. در این مدل، معادلات حاکم برای تولیدکننده گاز کیسه هوا، معادلات بقا جرم و انرژی در محفظه احتراق داخلی، فیلتر، محفظه گاز و تانک تخلیه در نظر گرفته شد. مولفین دو

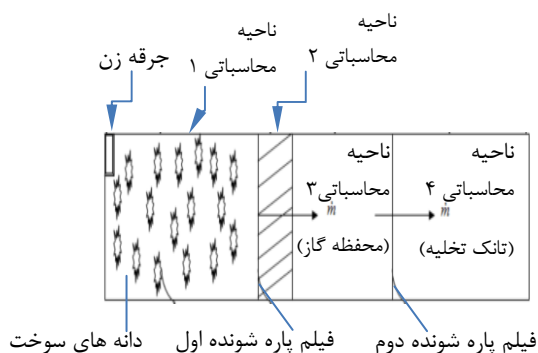
تولیدکننده گاز پیروتکنیک معمولی و تولیدکننده گاز پیروتکنیک هیبرید را که شامل یک محفظه گاز از پیش تحت فشار است با هم مقایسه کرده و مزایای استفاده از تولیدکننده گاز پیروتکنیک هیبرید نسبت به تولیدکننده گاز پیروتکنیک معمولی را نشان دادند. این مزایا عبارتند از: نیاز کمتر به سوخت جامد، دمای عملکرد پایین‌تر، یکنواختی بیشتر نسبت به شرایط محیطی گرم و سرد و بازدهی گرمایی بالاتر [۸، ۹].

پژوهش‌های بعدی که در زمینه تولیدکننده گاز پیروتکنیک صورت گرفت به مدل فیزیکی و ریاضی ذکر شده وفادار ماندند و بر جنبه‌های چالش بر انگیز دیگری مربوط به تولیدکننده گاز پیروتکنیک متمرکز شدند. اشمیت و باتلر در سال ۱۹۹۶ [۳] اثر در نظر گرفتن سینتیک شیمیایی محدود مربوط به تولید و مصرف گونه CO را در نتایج شبیه‌سازی خود برای تولیدکننده گاز پیروتکنیک هیبرید مورد بررسی قرار دادند. مدل فیزیکی و معادلات حاکم بر مسئله همان مدل فیزیکی و معادلات ریاضی است که در کارباتلر و همکارانش [۹] استفاده شده است با این تفاوت که جمله تولید جرم و انرژی مربوط به مدل سینتیک شیمیایی CO [۱۰] به معادلات بقای گونه و بقای انرژی اضافه شده است. آنها در پایان نتیجه گرفتند که برای سازگاری بیشتر نتایج شبیه‌سازی و داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های تجربی لازم است که سینتیک مربوط به گونه‌هایی که تغییر غلظت آنها در حین واکنش محسوس است در نظر گرفته شود [۹].

آلکام و باتلر در سال ۲۰۰۹ شبیه‌سازی عددی تولیدکننده گاز پیروتکنیک کیسه هوا را با تمرکز بر روی عملکرد گرمایی^۳ تولیدکننده گاز انجام دادند. در این تحقیق تأثیر اتلاف حرارتی به محیط، انتقال حرارت به اجزای سخت‌افزاری تولیدکننده گاز و محیط بررسی شدند. نتایج نشان داد که اتلاف حرارت به محیط ناچیز است. همچنین نشان داده شد هنگامی که دمای محیط افزایش می‌یابد مقدار بیشینه فشار همانند مقدار بیشینه نرخ افزایش فشار در تانک به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سوخت جامد در شرایط دمای محیط بالاتر سریع‌تر می‌سوزد [۱۱].

با توجه به قدمت تولیدکننده گاز پیروتکنیک، و همچنین استفاده از این نوع تولیدکننده‌های گاز در بیشتر خودروهای تولیدی در کشور، در کار حاضر شبیه‌سازی این نوع تولیدکننده گاز بررسی شده است. با توجه به کاربرد بیشتر سوخت آزید

1. Propellant
2. Condensed- Phase



شکل ۲ طرح وارهای از مدل فیزیکی ارائه شده برای چهار ناحیه محاسباتی در تولیدکننده گاز [۹]

در مجاورت صفحه نازک داخلی، صفحات فیلتر از جنس فولاد ضد زنگ وجود دارند. صفحات فیلتر به علت داشتن سطح مقطع زیاد به عنوان چاه حرارتی عمل می کنند. بین صفحات فیلتر و نازل های خروجی، محفظه گاز^۲ قرار دارد. کل واحد تولیدکننده گاز با یک صفحه نازک خارجی از محفظه تانک تخلیه جدا شده است. در بیشتر آزمایش های تجربی مربوط به ارزیابی عملکرد تولیدکننده گاز، محصولات گازی به درون یک تانک حجم ثابت تخلیه می شوند.

تولیدکننده گاز پیروتکنیک هیبرید، ساختمانی شبیه تولیدکننده گاز پیروتکنیک معمولی دارد با این تفاوت که محفظه گاز با گازهایی مثل نیتروژن، هوا یا آرگون در دمای محیط از پیش تحت فشارهای بالا قرار گرفته است. چندین فرض پایه ای و ساده شونده برای بدست آوردن معادلات حاکم بر فرایند ترموشیمیایی سیستم تولیدکننده گاز پیروتکنیک اعمال شده است. این فرض ها عبارتند از:

۱- در هر ناحیه محاسباتی، فاز گاز و فاز جامد به خوبی مخلوط شده اند.

۲- گونه های فاز گاز از معادله حالت گاز ایده آل پیروی می کنند و گونه های فاز جامد غیر قابل تراکم در نظر گرفته می شوند.

۳- صفحات فیلتر گونه های گازی شکل را در خود انباشته نمی کنند در حالی که می توانند ذرات جامد- مایع حاصل از احتراق سوخت جامد را در خود انباشته کنند.

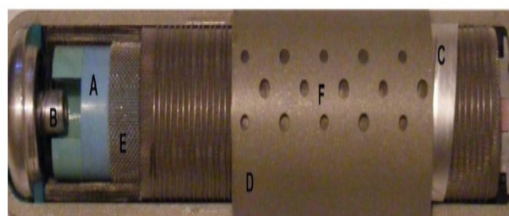
۴- فاز گاز و فاز جامد هر کدام از ترکیب چند گونه شیمیایی با گرمای ویژه وابسته به دما تشکیل شده اند.

سديم و همچنين در دسترس بودن داده های مورد نیاز برای اعتبارسنجی، در کار حاضر از این سوخت جامد استفاده شده است. با مطالعه پارامتریک، تأثیر بعضی از پارامترها بر بیشینه فشار و دما در تانک تخلیه و بیشینه فشار در محفظه احتراق بررسی شده است. همچنین در شبیه سازی انجام شده مزیت استفاده از تولیدکننده گاز هیبرید نسبت به نوع معمولی آن نشان داده شده است.

۲- مدل فیزیکی و معادلات حاکم

در شکل ۱ تصویر برش خورده ای از یک تولیدکننده گاز پیروتکنیک نشان داده شده است. قسمتی که در شکل با حرف A نشان داده شده است دانه های سوخت جامد است. قسمت B واحد جرقه زن است و در مجاورت دانه های سوخت جامد قرار دارد. در قسمت E فیلتر که از چندین صفحه سوراخ دار از جنس فولاد ضد زنگ تشکیل شده است قرار دارد. قسمت C یک صفحه نازک است^۱ که دانه های سوخت جامد، واحد جرقه زن و فیلتر را کاملاً از نازل های خروجی جدا می کند. در قسمت F نازل های قرار گرفته روی بدنه تولیدکننده گاز (که با حرف D نشان داده شده است) محل عبور گازهای ورودی به کیسه هوا هستند.

تولیدکننده گاز و کیسه هوا مطابق شکل ۲ به چهار ناحیه محاسباتی مجزا تقسیم می شوند. ناحیه محاسباتی ۱ مربوط به محفظه احتراق و محتوی دانه های سوخت جامد است. ناحیه محاسباتی ۲ مربوط به صفحات فیلتر در مجاورت محفظه احتراق است. ناحیه محاسباتی ۳ محفظه گاز را نشان می دهد و کیسه هوا (تانک تخلیه) با ناحیه محاسباتی ۴ مدل شده است. محفظه احتراق با یک صفحه نازک داخلی از بقیه اجزای تولیدکننده گاز جدا شده است.



شکل ۱ تصویر برش خورده تولیدکننده گاز پیروتکنیک [۴]

۵- واکنش‌های شیمیایی به محفظه احتراق (ناحیه محاسباتی ۱) محدود شده است [۹،۸].

۲-۱- معادلات حاکم

بر پایه فرض‌های در نظر گرفته شده برای سیستم تولیدکننده گاز، معادلات پایه‌ای بقای جرم گونه و بقای انرژی برای هر ناحیه محاسباتی در نظر گرفته می‌شوند. در نتیجه سیستمی از معادلات دیفرانسیل معمولی که مشتقات زمانی متغیرهای وابسته‌ای مانند دمای فاز گاز، دمای فاز جامد در هر ناحیه محاسباتی، دمای فیلتر و جرم گونه‌ها در هر ناحیه محاسباتی را بیان می‌کند، معادلات حاکم بر سیستم تولیدکننده گاز را تشکیل می‌دهند.

۲-۱-۱- معادله بقای جرم گونه‌ها

معادله بقای جرم گونه برای هر دو فاز گاز و فاز متراکم برای چهار ناحیه محاسباتی به شکل زیر است:

$$\frac{dm_{k,i,j}}{dt} = Y_{k,i,j-1} \dot{m}_{i,j-1} - Y_{k,i,j} \dot{m}_{i,j} + \psi_{k,i,j} \quad (1)$$

در معادله (۱) اندیس j شمارنده ناحیه محاسباتی است. اندیس i نشان‌دهنده فاز گونه‌های شیمیایی می‌باشد که $j = i$ نشان‌دهنده فاز گاز و $i = c$ نشان‌دهنده فاز جامد و اندیس k بیانگر نام گونه می‌باشد. سمت چپ معادله (۱) نرخ تغییرات جرم هر گونه با زمان در ناحیه محاسباتی مورد نظر، و سمت راست معادله به ترتیب نرخ جریان جرم گونه ورودی به هر ناحیه محاسباتی، نرخ جریان جرم گونه خروجی از هر ناحیه و نرخ تولید جرم گونه در ناحیه محاسباتی می‌باشد. جریان جرم فاز گاز خارج شده از محفظه احتراق آیزنتروپیک فرض می‌شود. با استفاده از روابط دینامیک گاز می‌توان نوشت [۱۲]:

$$\dot{m}_{g,1,out} = A_{filter} c_{\mu,2} \cdot \left\{ \frac{2k}{k-1} P_1 \rho_1 \left[\left(\frac{P_3}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_3}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

نرخ جریان جرم فاز جامد خروجی از فیلتر متناسب با نرخ جریان جرم فاز گاز فرض شده است:

$$\dot{m}_{c,1,out} = \dot{m}_{g,1,out} \frac{m_{c,1}}{m_{g,1}} \quad (3)$$

در معادله (۲) A_{filter} سطح فیلتر، $c_{\mu,2}$ ضریب اینرسی

فیلتر در مقابل جریان گاز، k نسبت گرمای مخصوص مخلوط گاز در فشار ثابت به گرمای مخصوص گاز در حجم ثابت، P_1 و ρ_1 فشار و دانسیته مخلوط گاز در ناحیه محاسباتی ۱ و P_3 فشار مخلوط گاز در محفظه گاز (ناحیه محاسباتی ۳) می‌باشند. نرخ جریان مخلوط گاز و همچنین مخلوط فاز جامد خارج شده از محفظه گاز و عبوری از نازل‌ها به شکل زیر است [۱۲]:

$$\dot{m}_{g,3,out} = \begin{cases} A_{Nozzle} c_{\mu,3} \left\{ \frac{2k}{k-1} P_3 \rho_3 \left[\left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} & \text{if } \frac{P_4}{P_3} > r \\ A_{Nozzle} c_{\mu,3} \sqrt{k P_3 \rho_3} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} & \text{if } \frac{P_4}{P_3} < r \end{cases}$$

$$\dot{m}_{c,3,out} = \dot{m}_{g,3,out} \frac{m_{c,3}}{m_{g,3}} \quad (4)$$

در این رابطه r نسبت فشار بحرانی نامیده می‌شود. در این نسبت فشار، نازل دچار خفگی^۱ شده و نرخ جریان عبوری از نازل بیشینه خواهد بود [۱۲]:

$$r = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (5)$$

در معادله ۱ جمله مربوط به نرخ تولید گونه بر حسب گرم بر ثانیه با $\psi_{k,i,j}$ نشان داده شده است که از واکنش‌های شیمیایی مربوط به احتراق سوخت جامد در محفظه احتراق (ناحیه محاسباتی ۱) بدست می‌آید. این جمله از حاصل ضرب کسر جرمی گونه k فاز گازی یا فاز جامد محصولات احتراق سوخت جامد در نرخ تولید جرم فاز i در ناحیه محاسباتی j به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\psi_{k,i,j} = Y_{k,i,p} \omega_{i,j} \quad (6)$$

با توجه به فرض محدود بودن واکنش‌های شیمیایی به ناحیه محاسباتی ۱، نرخ تولید جرم گونه برای دیگر ناحیه‌های محاسباتی صفر است [۹]:

$$\psi_{g,2} = \psi_{g,3} = \psi_{g,4} = \psi_{c,2} = \psi_{c,3} = \psi_{c,4} = 0 \quad (7)$$

1. Choked Flow

گونه‌ها	فاز	درصد جرم
واکنش دهنده‌ها	جامد	۷۰/۹۵
	جامد	۲۹/۰۵
محصولات	گاز	۴۵/۹
	جامد	۲۰/۳
	جامد	۳۳/۸
NaN ₃		
Fe ₂ O ₃		
N ₂		
Na ₂ O		
Fe		

هر دانه سوخت جامد با توجه به هندسه آن که می‌تواند استوانه‌ای، دیسکی، کره‌ای یا شکل دیگری باشد، تابع شکل منحصر به خود را دارد. شکل دانه سوخت جامد استفاده شده در کار حاضر استوانه‌ای توپر بوده که تمام سطح آن با نرخ یکسانی می‌سوزد و تابع شکل آن به صورت زیر می‌باشد [۱۴]:

$$A_r(t) = \pi(D - 2S)\left(\frac{D}{2} + H - 2S\right) \quad (12)$$

در معادله (۱۲)، D قطر دانه سوخت جامد و H ارتفاع دانه استوانه‌ای شکل است. دانسیته سوخت جامد a_t از ترکیب جرم حجمی آزید سدیم و اکسید آهن به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\rho_r = \frac{1}{\left(\frac{Y_{\text{NaN}_3}}{\rho_{\text{NaN}_3}} + \frac{Y_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}{\rho_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}\right)} \quad (13)$$

در معادله (۱۰)، برای محاسبه r_r نرخ مصرف سوخت جامد از رابطه تجربی سینت رابرت^۲ برای سوزش سوخت‌های جامد در حالت شبه پایا استفاده می‌شود. این رابطه کلاسیک برای مدل کردن نرخ سوزش وابسته به فشار محفظه احتراق بسیاری از سوخت‌های جامد معتبر است [۱۶، ۱۵]:

$$r_r = aP^n \quad (14)$$

در معادله (۱۴)، P فشار محفظه احتراق و n یک ثابت تجربی است که اندیس احتراق نامیده می‌شود. اندیس احتراق برای اکثر سوخت‌های جامد عددی بین ۰/۴ و ۰/۷ می‌باشد [۱۷]. در معادله (۱۴)، ضریب a نشان دهنده تأثیر دمای اولیه سوخت جامد بر نرخ سوزش آن می‌باشد و به شکل زیر مدل شده است:

$$a = \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq t_{\text{delay}} \\ a_0 \frac{t - t_{\text{delay}}}{\Delta t_{\text{rise}}} & \text{if } t_{\text{delay}} < t \leq t_{\text{delay}} + \Delta t_{\text{rise}} \\ a_0 & \text{if } t \geq t_{\text{delay}} + \Delta t_{\text{rise}} \end{cases} \quad (15)$$

در معادله (۶) جمله $Y_{k,i,p}$ کسر جرمی گونه k در فاز گاز یا فاز جامد محصولات احتراق سوخت جامد است. همچنین جمله $\omega_{i,j}$ نرخ تولید جرم فاز i در ناحیه محاسباتی j می‌باشد که برای ناحیه محاسباتی ۱ به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\omega_{g,l} = Y_{g,p} \frac{dm_r}{dt} \quad \omega_{c,l} = Y_{c,p} \frac{dm_r}{dt} \quad (8)$$

با جایگذاری رابطه (۸) در معادله (۶) داریم:

$$\begin{aligned} \psi_{k,c,j} &= Y_{k,c,p} \omega_{c,l} = Y_{k,c,p} Y_{c,p} \frac{dm_r}{dt} = Y_{k,p} \frac{dm_r}{dt} \\ \psi_{k,g,j} &= Y_{k,g,p} \omega_{g,l} = Y_{k,g,p} Y_{g,p} \frac{dm_r}{dt} = Y_{k,p} \frac{dm_r}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

جمله $Y_{k,p}$ در معادله (۹) کسر جرمی هر گونه در کل محصولات احتراق سوخت جامد می‌باشد که از محاسبات تعادلی مربوط به سوزش سوخت جامد بدست می‌آیند. برای بدست آوردن نرخ تولید جرم هر گونه در احتراق سوخت جامد از حاصل ضرب نرخ تولید جرم کل سوخت جامد (dm_r/dt) در کسر جرمی مربوط به هر گونه در حالت تعادل ($Y_{k,p}$) استفاده می‌شود [۹]. به این ترتیب فرض می‌شود تولید گونه‌های شیمیایی فقط در سطح سوزش سوخت جامد و در حالت تعادلی رخ می‌دهد [۳].

با استفاده از کد تعادلی PEP مربوط به احتراق سوخت جامد دمای شعله و کسر جرمی گونه‌های تولید شده مربوط به سوخت جامد در یک فشار معمول در تولیدکننده گاز محاسبه و نتایج در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. در معادله (۹)، (dm_r/dt) نرخ کل تولید جرم سوخت جامد می‌باشد که از رابطه تجربی (۱۰) بدست می‌آید [۱۲، ۱۱]:

$$\frac{dm_r}{dt} = N A_r(t) \rho_r r_r \quad (10)$$

در معادله (۱۰)، N تعداد دانه‌های سوخت جامد، $A_r(t)$ تابع شکل سوخت جامد، ρ_r جرم حجمی سوخت جامد و r_r نرخ مصرف حالت پایای سوخت جامد می‌باشد. عمق سوخته شده یا مصرف سطح^۱ از حاصل ضرب ثابت مصرف سطح (a_t) در مدت زمان سوزش سوخت جامد بدست می‌آید:

$$S = a_t t \quad (11)$$

ثابت مصرف سطح سوخت جامد (a_t) با انجام آزمایش‌های تجربی برای هر سوخت جامد با هندسه مشخص بدست می‌آید [۱۳].

جدول ۱ ترکیب شیمیایی واکنش دهنده‌ها و محصولات

مشتق زمانی آن نرخ تغییر حجم فاز جامد با زمان را نشان می‌دهد:

$$\varphi_j = \frac{1}{V_j} \sum_k \frac{m_{k,c,j}}{\rho_{k,c}} \quad \frac{d\varphi_j}{dt} = \frac{1}{V_j} \sum_k \frac{1}{\rho_{k,c}} \frac{dm_{k,c,j}}{dt} \quad (18)$$

با قرار دادن رابطه (۱۸) در معادله (۱۶)، رابطه (۱۹) بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} m_{g,j} c_{v,g,j} (T_{g,j}, Y_{k,g,j}) \frac{dT_{g,j}}{dt} = & \dot{m}_{g,j-1} \cdot h_{g,j-1} (T_{g,j-1}, Y_{k,g,j-1}) - \dot{m}_{g,j} \cdot h_{g,j} (T_{g,j}, Y_{k,g,j}) \\ & + P_j V_j \frac{d\phi_j}{dt} + \omega_{g,j} h_f (T_f, Y_{k,g,p}) + Q_{g,j} \\ & - \sum_k e_{k,g,j} (T_{g,j}) (Y_{k,g,j-1} \cdot \dot{m}_{g,j-1} - Y_{k,g,j} \cdot \dot{m}_{g,j} \\ & + \omega_{g,j} Y_{k,g,p}) \end{aligned} \quad (19)$$

در رابطه (۱۹) ظرفیت گرمایی حجم ثابت و آنتالپی مربوط به گونه‌ها، تابع دما می‌باشند [۱۹]. جمله $Q_{g,j}$ تبادل حرارت مخلوط گاز با فیلتر، دیواره‌های تولیدکننده گاز، دیواره‌های محفظه گاز و دیواره‌های تانک تخلیه می‌باشد. تغییرات دمایی اجزای سخت‌افزاری تولیدکننده گاز (بدنه تولیدکننده گاز) به صورت رابطه (۲۰) می‌باشد.

$$\begin{aligned} \frac{dT_{filter}}{dt} &= \frac{Q_{g,2} + Q_{c,2}}{m_{filter} c_{v,filter}} \\ \frac{dT_{body}}{dt} &= \frac{Q_{g,1} + Q_{c,1} + Q_{g,3} + Q_{4,g}}{m_{body} c_{v,body}} \end{aligned} \quad (20)$$

جنس فیلتر از فولاد کربن^۴ و جنس دیواره تولیدکننده گاز از آلومینیوم انتخاب شده است. معادله بقای انرژی برای فاز جامد به شکل رابطه (۲۱) است:

$$\begin{aligned} m_{c,j} c_{v,c,j} (T_{c,j}, Y_{k,c,j}) \frac{dT_{c,j}}{dt} = & \dot{m}_{c,j-1} \cdot h_{c,j-1} (T_{c,j-1}, Y_{k,c,j-1}) \\ & - \dot{m}_{c,j} \cdot h_{c,j} (T_{c,j}, Y_{k,c,j}) - P_j V_j \frac{d\phi_j}{dt} \\ & + \omega_{c,j} h_f (T_f, Y_{k,c,p}) \\ & + Q_{c,j} - \sum_k e_{k,c,j} (T_{c,j}) * \\ & (Y_{k,c,j-1} \cdot \dot{m}_{c,j-1} - Y_{k,c,j} \cdot \dot{m}_{c,j} \\ & + \omega_{c,j} Y_{k,c,p}) \end{aligned} \quad (21)$$

در ناحیه محاسباتی z رابطه فشار از معادله حالت گاز ایده‌آل بدست می‌آید:

ضریب a_0 که ضریب دما^۱ نامیده می‌شود با توجه به دمای اولیه سوخت جامد مقادیر مختلفی دارد. ضریب دما دارای بعد $m/s.pa^n$ می‌باشد که n همان اندیس احتراق است. زمان تأخیر جرقه t_{delay} به مدت زمانی اطلاق می‌شود که گاز درون محفظه احتراق به دمای اشتعال معین^۲ $T_{ignition}$ برسد. بازه زمانی پایا Δt_{rise} نیز مدت زمانی است که طول می‌کشد که ضریب دمای سوخت جامد به حالت پایا برسد. زمان تأخیر جرقه و بازه زمانی پایا برای هر سوخت جامد با انجام آزمایش‌های تجربی بدست می‌آیند [۱۸، ۹].

۲-۱-۲- معادله بقای انرژی و روابط کمکی

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک معادله بقای انرژی برای فاز گاز برای هر ناحیه محاسباتی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} m_{g,j} c_{v,g,j} (T_{g,j}, Y_{k,g,j}) \frac{dT_{g,j}}{dt} = & \dot{m}_{g,j-1} \cdot h_{g,j-1} (T_{g,j-1}, Y_{k,g,j-1}) \\ & - \dot{m}_{g,j} \cdot h_{g,j} (T_{g,j}, Y_{k,g,j}) \\ & + \dot{W} + \omega_{g,j} h_f (T_f, Y_{k,g,p}) + \dot{Q}_{g,j} \\ & - \sum_k u_{k,g,j} (T_{g,j}) (Y_{k,g,j-1} \cdot \dot{m}_{g,j-1} - Y_{k,g,j} \cdot \dot{m}_{g,j} \\ & + \omega_{g,j} Y_{k,g,p}) \end{aligned} \quad (16)$$

در سمت راست معادله (۱۶)، جمله‌های $\dot{m}_{g,j-1} \cdot h_{g,j-1}$ و $\dot{m}_{g,j} \cdot h_{g,j}$ به ترتیب شار آنتالپی مخصوص مخلوط گاز ورودی و خروجی از ناحیه محاسباتی j می‌باشند. جمله $\omega_{g,j} \cdot h_f (T_f, Y_{k,g,p})$ تولید انرژی حاصل از احتراق سوخت جامد است که به معادله بقای انرژی اضافه شده است. جمله h_f آنتالپی گونه‌های گازی محصول احتراق در دمای شعله آدیاباتیک (۱۳۰۰ کلوین) است. ذرات جامد تشکیل شده به همراه جریان گاز در سلول‌های محاسباتی حرکت می‌کنند که باعث اتلاف مقداری انرژی از فاز گاز می‌شوند. این انرژی گرفته شده از فاز گاز برای جابجایی ذرات متراکم در قالب جمله کار جریان^۳ به شکل زیر تعریف می‌شود [۱۰، ۹]:

$$\dot{W} = P_j V_j \frac{d\phi_j}{dt} \quad (17)$$

در معادله (۱۷)، φ_j کسر حجمی فاز جامد می‌باشد که

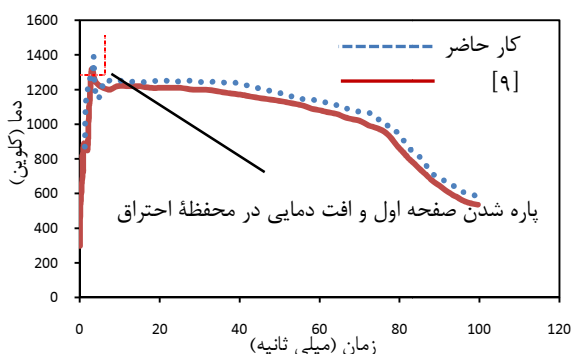
1. Temperature Coefficient
2. Specified Ignition Temperature
3. Flow Work

شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. همچنین نتایج کار حاضر با نتایج کار عددی باتلر و همکاران [۹] اعتبارسنجی شده است.

جدول ۲ مقادیر اولیه و پارامترهای ورودی لازم برای شبیه‌سازی [۹]

مقادیر	متغیرها	مقادیر	متغیرها
۳۰۰ k	T_0	۰/۰۰۴۵ m	H
۰/۱۰۱۳۲۵ MPa	P_0	۰/۰۶۱۲ m ²	A_{filter}
۵ MPa	$\Delta P_{ruptur1}$	۰/۰۰۰۷۸۵ m ²	A_{Nozzle}
۸ MPa	$\Delta P_{ruptur2}$	۰/۴۹	$C_{\mu,filter}$
۳/۷۶	X_{N_2}	۰/۸	$C_{\mu,Nozzle}$
۱	X_{O_2}	۰/۰۰۰۰۴۴۵ $\frac{m}{s \cdot pa^n}$	a_0
۰/۰۰۷۵ m	D	۰/۴۲ kg	m_b
۰/۶۴ g	$m_{N_2,ini,3}$	۶/۹۴ g	$m_{N_2,ini,4}$
۰/۰۶ kg	m_{filter}	۰/۱۸ kg	m_p
۰/۴	n	۰/۰۰۱ s	t_{delay}
۰/۰۰۳ s	Δt_{rise}	۱۲۷ cm ³	V_1
۵۵۶ cm ³	V_3	۰/۹۱	$C_{v,body}$
۶۰۰۰ cm ³	V_4	۰/۵۱ g	$m_{N_2,ini,1}$
.	$m_{Na_2O,ini,j}$	.	$m_{Fe,ini,j}$
۸۷۰ k	$T_{initial,1}$	۱ MPa	$P_{initial,1}$
۴۰۰	N	۰/۴۹	$C_{v,filter}$

با آغاز سوزش سوخت جامد در زمان ۱ میلی‌ثانیه حجم گاز و دما در محفظه احتراق بالا رفته و در نتیجه فشار محفظه بالا می‌رود. در زمان حدود ۲/۵ میلی‌ثانیه صفحه نازک اول بر اثر اختلاف فشار ایجاد شده بین محفظه احتراق و محفظه گاز (۵ مگا پاسکال) گسیخته می‌شود و محصولات (فاز گازی و فاز جامد) وارد فیلتر شده و با عبور از آن وارد محفظه گاز می‌شوند. با خارج شدن ناگهانی جرم از محفظه احتراق در زمان حدود ۲/۵ میلی‌ثانیه و انتقال حرارت از محصولات احتراق دما بالا به فیلتر، دمای محصولات کاهش شدید یافته و دمای فیلتر افزایش می‌یابد.



شکل ۳ نمودار دما در محفظه احتراق

$$P_j V_{gas,j} = m_{g,j} \frac{R}{MW_g} T_{g,j} \quad (22)$$

در معادله بالا R ثابت جهانی گازها و $V_{gas,j}$ حجم گاز در ناحیه محاسباتی j در هر لحظه می‌باشد.

معادله (۱)، مربوط به معادله بقای گونه در هر ناحیه محاسباتی، به همراه معادلات انرژی (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) که به ترتیب معادله بقای انرژی برای فاز گاز، اجزای سخت افزاری تولیدکننده گاز و فاز جامد هستند، تشکیل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی را می‌دهند. در کار حاضر، این دستگاه معادلات دیفرانسیل با اعمال شرایط اولیه مناسب، به کمک روش عددی رانج-کوتا با گام زمانی انطباق پذیر با استفاده از حلگر معادلات دیفرانسیل عادی [۲۰] حل شده‌اند.

۳- نتایج

شرایط اولیه محفظه احتراق در لحظه $t = 1ms$ آغاز می‌شود. در کار حاضر مدت زمان شروع فرایند جرقه^۱ در لحظه $t = 0$ تا آغاز سوزش سوخت جامد در ۱ میلی‌ثانیه مدل نشده است. به جای مدل کردن فرایند جرقه، از یک فشار و دمای اولیه در ۱ میلی‌ثانیه استفاده شده است. این فشار و دما با بررسی دما و فشار معمول در لحظات شروع فرایند در کارهای مطالعه شده انتخاب شده‌اند. در هر ناحیه محاسباتی هوا با فشار یک اتمسفر (۰/۱ مگاپاسکال) و دمای محیط (۳۰۰ کلوین) قرار گرفته است. شرایط اولیه در $t = 1ms$ و همچنین مقادیر مربوط به پارامترهای ورودی لازم جهت شبیه‌سازی در جدول ۲ نشان داده شده است. در جدول ۲، $T_{initial,1}$ و $P_{initial,1}$ دما و فشار اولیه محفظه احتراق (ناحیه محاسباتی ۱) در لحظه ۱ میلی‌ثانیه، T_0 و P_0 دما و فشار اولیه سه ناحیه محاسباتی دیگر برای تولیدکننده گاز پیروتکنیک می‌باشند. برای گسیخته شدن دو صفحه نازک دو شرط وجود دارد. به این ترتیب که صفحه نازک اول بین محفظه احتراق و محفظه گاز در اختلاف فشار ۵ مگاپاسکال و صفحه نازک دوم بین محفظه گاز و تانک تخلیه در اختلاف فشار ۸ مگاپاسکال از هم گسیخته می‌شوند.

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی برای تولیدکننده گاز پیروتکنیک

نمودار دما و فشار در محفظه احتراق از زمان شروع سوزش سوخت جامد در ۱ میلی‌ثانیه تا زمان حدود ۱۰۰ میلی‌ثانیه در

1. Ignition

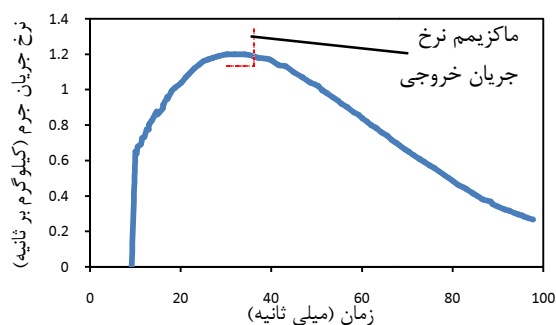
با ادامه فرایند سوزش سوخت جامد ادامه می‌یابد، سطح^۱ سوخت جامد با گذشت زمان کاهش می‌یابد. با کاهش سطح سوخت جامد و همچنین تبادل حرارت محصولات احتراق با فیلتر و بدنه تولیدکننده گاز، فشار در محفظه احتراق و محفظه گاز بعد از زمان حدود ۲۷ میلی‌ثانیه شروع به کاهش می‌کنند. نرخ جریان جرم تخلیه شده گاز از تولیدکننده گاز به تانک تخلیه در شکل ۷ نشان می‌دهد که در زمان تقریبی ۲۷ میلی‌ثانیه که فشار محفظه احتراق و محفظه گاز بیشینه مقدار خود را دارند، نرخ جریان جرم نیز بیشینه مقدار خود را دارد.

۳-۲- مطالعه پارامتریک

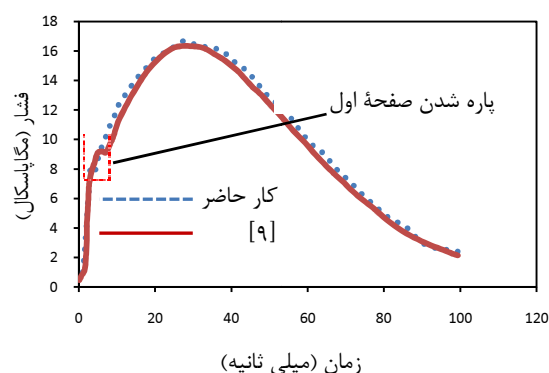
در این قسمت تأثیر پارامترهای ورودی لازم برای شبیه‌سازی تولیدکننده پیروتکنیک بررسی شده است. پارامترهای بررسی شده عبارتند از: اندیس احتراق سوخت جامد (m)، ضریب دمای سوخت جامد (a_0)، جرم سوخت جامد به کار رفته، طول دانه استوانه‌ای شکل سوخت جامد، جرم فیلتر و سطح مقطع نازل‌های خروجی.

۳-۲-۱- تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر بیشینه فشار در محفظه احتراق

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود اندیس احتراق که نشان دهنده تأثیرپذیری نرخ مصرف حالت پایای سوخت جامد از فشار محفظه می‌باشد بیشترین تأثیر را بر افزایش فشار در محفظه احتراق دارد. با افزایش ۵ و ۲۰ درصدی اندیس احتراق، بیشینه فشار در محفظه احتراق به ترتیب حدود ۳۵ درصد و ۸۷ درصد افزایش یافت. بعد از اندیس احتراق، جرم سوخت جامد بکار رفته (m_p) بیشترین تأثیر را در افزایش بیشینه فشار در محفظه احتراق دارد.

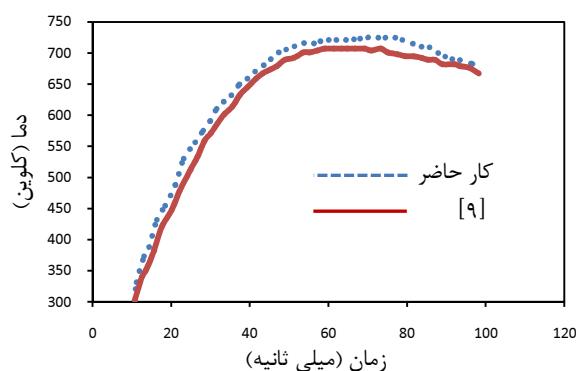


شکل ۷ نرخ جریان جرم تخلیه شده به تانک تخلیه

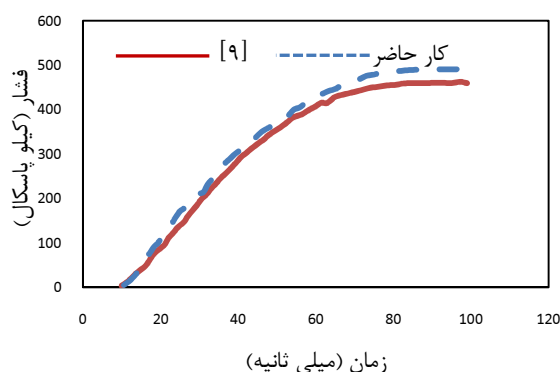


شکل ۴ نمودار فشار در محفظه احتراق

تغییرات دمای محصولات گازی بعد از گسیخته شدن صفحه نازک و وارد شدن محصولات به فیلتر بعد از زمان ۲/۵ میلی‌ثانیه در شکل ۳ نشان داده شده است. با گسیخته شدن صفحه نازک دوم و تخلیه محصولات احتراق از محفظه گاز به تانک تخلیه، فشار و دما در تانک تخلیه نیز شروع به افزایش می‌کند. چگونگی افزایش فشار و دما در تانک تخلیه در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند.

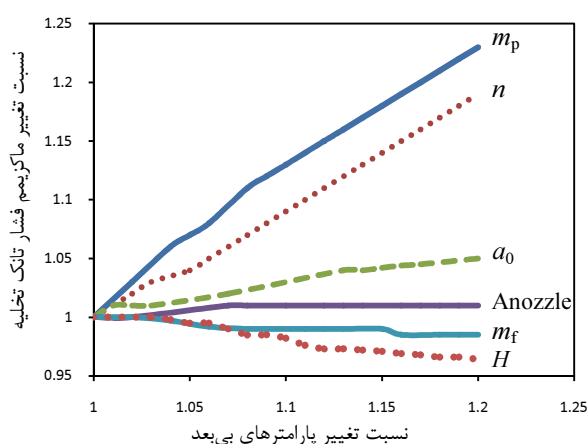


شکل ۵ نمودار دما در تانک تخلیه

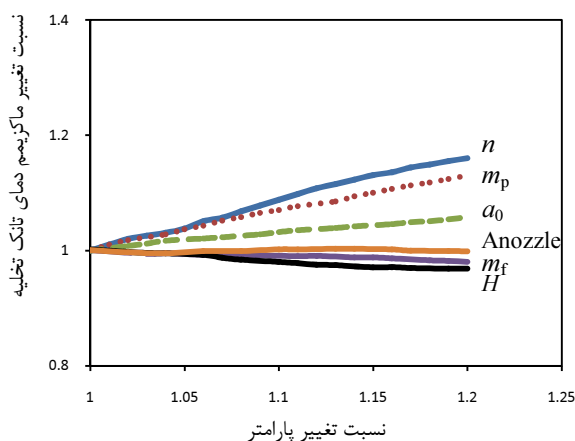


شکل ۶ نمودار فشار در تانک تخلیه

۲۰ درصد، بیشینه فشار در تانک تخلیه به ترتیب ۴ و ۱۹ درصد و بیشینه دما در تانک تخلیه به ترتیب ۸ و ۲۲ درصد افزایش داشته‌اند. با افزایش ۲۰ درصدی ضریب دمای سوخت جامد تنها ۵ درصد افزایش در بیشینه فشار و همچنین در بیشینه دمای تانک تخلیه مشاهده می‌شود. افزایش مقادیر سطح مقطع نازل‌های خروجی، جرم فیلتر، ارتفاع دانه سوخت جامد استوانه‌ای و ضریب دمای سوخت جامد تا ۲۰ درصد بر بیشینه فشار و دما در تانک تخلیه تأثیر محسوسی نداشت.



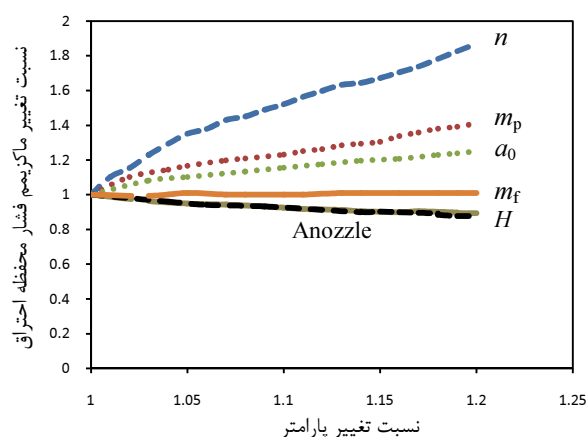
شکل ۸- تأثیر تغییر شش پارامتر طراحی بر بیشینه فشار در تانک تخلیه



شکل ۹- تأثیر تغییر شش پارامتر طراحی بر بیشینه دما در تانک تخلیه

۳-۲-۳- نتایج شبیه‌سازی برای تولیدکننده گاز پیروتکنیک هیبرید

برای شبیه‌سازی تولیدکننده گاز پیروتکنیک هیبرید فشار



شکل ۱۰- تأثیر تغییر شش پارامتر طراحی بر بیشینه فشار در محفظه احتراق

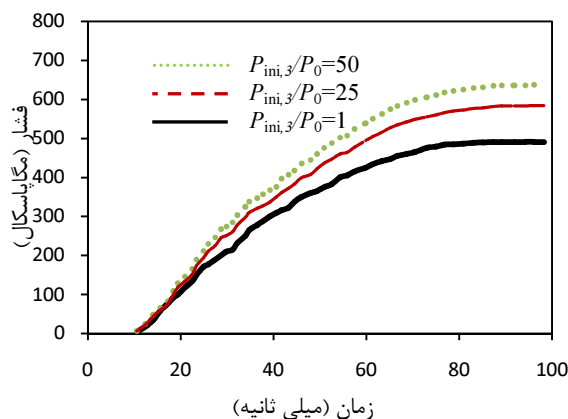
با افزایش ۵ و ۲۰ درصدی جرم سوخت جامد، بیشینه فشار در محفظه احتراق به ترتیب حدود ۱۶ و ۴۱ درصد افزایش یافت. نسبت تغییر پارامتر ۲۰ درصدی ضریب دما (a_0) افزایش حدود ۱۰ و ۲۵ درصد بیشینه فشار در محفظه احتراق را موجب می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که تأثیر افزایش جرم فیلتر (m_f)، افزایش طول دانه استوانه‌ای شکل سوخت جامد (H) و همچنین افزایش سطح نازل‌های خروجی (A_{nozzle}) تا ۲۰ درصد تغییر محسوسی در بیشینه فشار در محفظه احتراق ندارند.

افزایش اندیس احتراق، ضریب دما و جرم سوخت جامد به این دلیل که مستقیماً در نرخ تولید جرم کل سوخت جامد اثر دارند، تولید گاز بیشتر و در نتیجه افزایش فشار بیشتر در محفظه احتراق را به دنبال دارند. افزایش سطح مقطع نازل‌های خروجی، افزایش نرخ جریان خروجی از تولیدکننده گاز را به دنبال دارد، لذا با تخلیه بیشتر جرم از محفظه احتراق فشار آن کاهش می‌یابد.

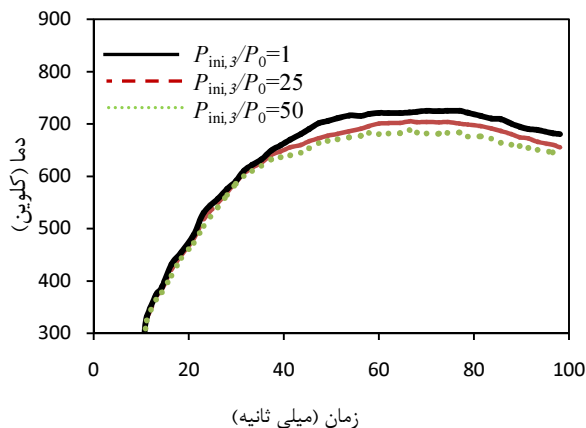
۳-۲-۳- تأثیر پارامترها بر بیشینه فشار و دما در تانک تخلیه

با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰، مشاهده می‌شود که افزایش جرم سوخت جامد بیشترین تأثیر را بر بیشینه فشار و دما در تانک تخلیه داشته است. به این ترتیب که افزایش ۵ و ۲۰ درصدی سوخت جامد به ترتیب افزایش ۷ و ۲۳ درصدی بیشینه فشار و افزایش ۴ و ۱۳ درصدی بیشینه دما در تانک تخلیه را موجب شده است. با افزایش اندیس احتراق سوخت جامد به میزان ۵ و

دمای محیط درون محفظه گاز، محصولات داغ احتراق سوخت جامد خروجی از محفظه احتراق با این جرم زیاد نیتروژن در محفظه گاز مخلوط شده و در نتیجه دمای محصولات وارد شده به تانک تخلیه مطابق شکل ۱۳ کاهش می‌یابد. اختلاط محصولات احتراق دما بالا با گاز نیتروژن دما پایین در محفظه گاز باعث کاهش دمای عملکرد در محفظه گاز و تانک تخلیه می‌شود، دمای پایین‌تر گازهای خروجی از تولیدکننده گاز، دلخواه طراح است چرا که امکان صدمات ناشی از سوختگی سرنشین خودرو بر اثر تماس با محصولات داغ را کاهش می‌دهد. دمای عملکرد پایین‌تر باعث بالا بردن بازده گرمایی نیز می‌شود چرا که در این حالت اتلاف انرژی کمتری به واسطه انتقال حرارت محصولات با اجزای سخت افزاری صورت می‌گیرد. بازده گرمایی بالاتر به این معناست که مقدار سوخت جامد کمتری برای رسیدن به عملکرد دلخواه تولیدکننده گاز مورد نیاز است.

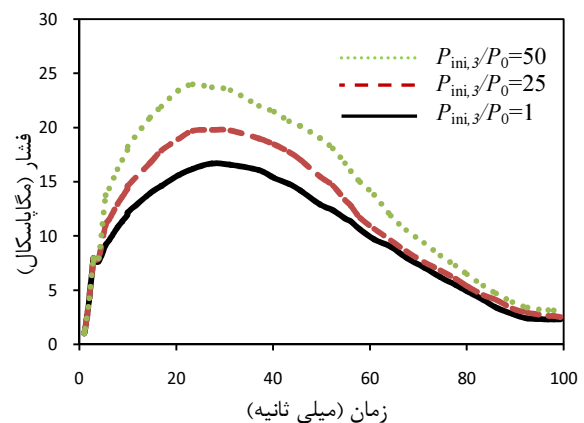


شکل ۱۲ تأثیر فشار اولیه محفظه گاز بر نمودار فشار در تانک تخلیه



شکل ۱۳ تأثیر فشار اولیه محفظه گاز بر نمودار دما در تانک تخلیه

اولیه‌ای ۲۵ و ۵۰ برابر فشار اتمسفر در محفظه گاز اعمال شده است. گاز از پیش تحت فشار، نیتروژن خالص می‌باشد. شرایط اولیه اعمال شده در اینجا مانند شرایط اولیه اعمال شده برای شبیه‌سازی تولیدکننده گاز پیروتکنیک در جدول ۲ است با این تفاوت که فشار اولیه و جرم اولیه گونه نیتروژن در محفظه گاز (ناحیه محاسباتی ۳) با بکار بردن معادله حالت گاز ایده‌آل برای حالت اول به ترتیب ۲/۵ مگاپاسکال و ۱۵/۶ گرم و برای حالت دوم به ترتیب ۵ مگاپاسکال و ۳۱/۲ گرم می‌باشند. در تولیدکننده گاز پیروتکنیک هیبرید به علت فشار بالای محفظه گاز، صفحه نازک دوم عملاً هم‌زمان با صفحه نازک اول گسیخته می‌شود. تأثیر فشار اولیه محفظه گاز (ناحیه محاسباتی ۳) بر فشار در محفظه احتراق و تانک تخلیه در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. در هر سه شکل، P_0 فشار اولیه در محفظه احتراق و تانک تخلیه می‌باشد و $P_{ini,3}$ فشار اولیه محفظه گاز می‌باشد. به این ترتیب نمودار مربوط به $P_{ini,3}/P_0$ مربوط به تولیدکننده گاز پیروتکنیک معمولی می‌باشد. همانطور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود فشار محفظه احتراق و تانک تخلیه با افزایش فشار اولیه محفظه گاز افزایش می‌یابد. دلیل این امر کاهش نرخ خارج شدن جرم از محفظه احتراق به جهت بالا بودن فشار محفظه گاز تولیدکننده گاز پیروتکنیک هیبرید به نسبت نوع معمولی آن است. تانک تخلیه به دلیل داشتن حجم بسیار بیشتر نسبت به محفظه احتراق افزایش فشار کمتری را تجربه می‌کند.



شکل ۱۱ تأثیر فشار اولیه محفظه گاز بر نمودار فشار در محفظه احتراق

همچنین به علت جرم اولیه گاز نیتروژن ذخیره شده در

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر شبیه‌سازی عددی فرایند احتراق تولیدکننده گاز پیروتکنیک بر اساس یک مدل فیزیکی "صفر بعدی چند منطقه‌ای" انجام شد. نتایج شبیه‌سازی در قالب نمودار فشار و دما در نواحی محاسباتی و همچنین نرخ جریان خارج شده از تولیدکننده گاز ارائه شد. همچنین تأثیر شش پارامتر طراحی بر عملکرد تولیدکننده گاز بررسی شد و نتیجه گرفته شد که سه پارامتر افزایش اندیس احتراق، جرم و ضریب دمای سوخت جامد در افزایش بیشینه فشار در محفظه احتراق و بیشینه فشار و دما در تانک تخلیه تأثیر کاملاً محسوسی دارند. به طور مثال با افزایش ۵ و ۲۰ درصدی اندیس احتراق، بیشینه فشار در محفظه احتراق به ترتیب حدود ۳۵ درصد و ۸۷ درصد افزایش یافت. همچنین با همین افزایش ۵ و ۲۰ درصدی اندیس احتراق بیشینه فشار در تانک تخلیه به ترتیب ۴ و ۱۹ درصد و بیشینه دما در تانک تخلیه به ترتیب ۸ و ۲۲ درصد افزایش داشته‌اند. با افزایش ۵ و ۲۰ درصدی جرم سوخت جامد، بیشینه فشار در محفظه احتراق به ترتیب حدود ۱۶ و ۴۱ درصد افزایش یافت. همچنین افزایش ۵ و ۲۰ درصدی سوخت جامد به ترتیب افزایش ۷ و ۲۳ درصدی بیشینه فشار و افزایش ۴ و ۱۳ درصدی بیشینه دما در تانک تخلیه را موجب شده است. افزایش ۵ و ۲۰ درصدی ضریب دما افزایش حدود ۱۰ و ۲۵ درصد بیشینه فشار در محفظه احتراق را موجب می‌شود. با افزایش ۲۰ درصدی ضریب دمای سوخت جامد تنها ۵ درصد افزایش در بیشینه فشار و همچنین در بیشینه دمای تانک تخلیه مشاهده می‌شود. با تغییر سه پارامتر دیگر مربوط به اجزای ساخت‌افزاری تولیدکننده گاز تغییر محسوسی در محفظه احتراق و تانک تخلیه رخ نداد.

همچنین شبیه‌سازی تولیدکننده گاز پیروتکنیک هیبرید با اعمال فشار اولیه ۲۵ و ۵۰ برابر فشار اتمسفریک در محفظه گاز محتوی نیتروژن خالص انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که فشار محفظه احتراق و تانک تخلیه با افزایش فشار اولیه محفظه گاز افزایش می‌یابد. تانک تخلیه به دلیل داشتن حجم بسیار بیشتر نسبت به محفظه احتراق افزایش فشار کمتری را تجربه می‌کند. اختلاط محصولات احتراق دما بالا با گاز نیتروژن دما پایین در محفظه گاز باعث کاهش دمای عملکرد در محفظه گاز و تانک تخلیه می‌شود، که مطلوب طراحان کیسه‌های هوا می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] Vos T.H. and Goetz G.W., "Inflatable Restraint Systems: Helping Save Lives on the Road", *TRW Space and Defense Quest*, Winter Issue, 1989, pp. 1-6.
- [2] Berger, J.M. and Butler, P.B., "Equilibrium Analysis of Three Classes of Automotive Airbag Inflator Propellants", *Combustion Science and Technology*, Vol. 104, issue 1-3, 1995, pp. 93-114.
- [3] Schmitt R.G., Butler P.B. and Freesmeier J.J., "Performance and CO Production of a Nonazide Airbag Propellant in a Pre-pressurized Gas Generator", *Combustion Science and Technology*, Vol. 122, issues 1-6, 1997, pp. 305-330.
- [4] Lasry D., Hoffmann R. and Protard J. B., "Numerical Simulation of Fully Folded Airbags and Their Interaction with Occupants with PAM-SAFE", *SAE paper No. 910150*, 1991.
- [5] Khalil T.B., Wasko R. J., Hallquist J. O. and Stillman D. W., "Development of a 3-Dimensional Finite Element Model of Airbag Development and Interactions with an Occupant using DYNA3D", *SAE Trans.*, Vol. 10, 1991, pp. 251-267.
- [6] Wang J. T. and Nefske N. J., "A New CAL3D Airbag Inflation Model", *SAE paper No. 880654*, 1988.
- [7] Avanesian H., Ridella S. A., Mani A. and Krishnaswamy, "An Analytical Model to Study the Infant Seat/Airbag Interaction", *SAE paper*, No. 920126, 1992.
- [8] Butler P.B., Krier H., Fraigle E.M., Semchena J.H., Thompson R., and Isermann R., "Numerical Simulation of Passenger-Side Automotive Inflators", *SAE paper No. 920848*, 1992.
- [9] Butler P. B., Kang J. and Krier H., "Modeling and Numerical Simulation of the Internal Thermochemistry of an Automotive Airbag Inflator", *Progress in Energy and Combustion Science*, 19, 1993, pp. 365-382.
- [10] Alkam M.K., Pai V.M., Pitz W.J. and Butler P.B., "Methanol and Hydrogen Oxidation Kinetics in Water at Supercritical States", *Combustion and Flame*, 106, 1996, pp. 100-130.
- [11] Alkam M.K. and Butler P.B., "Thermal Simulation of a Pyrotechnic Solid Propellant Gas Generator", *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 3, No. 3, 2009, pp. 198-205.
- [12] Zucrow M.J., and Hoffman J.D., *Gas Dynamics*, Vol. 1, John Wiley and Sons, 1976.
- [13] <http://www.nakka-rocketry.net/ptburn.html>
- [14] Seo Y.D., Chung S.H. and Yoh J.J., "Automotive Airbag Inflator Analysis using the Measured Properties Of Modern Propellants", *Fuel*, Vol. 90, No. 4, 2011, pp. 1395-1401.
- [15] Willcox M.A. and Brewster M.Q., "Solid Rocket

- [18] Kang J. and Wang J.T., "H-ISP - A Hybrid Inflator Simulation Program", *SAE Technical Paper*, No. 1999-01-1069, 1999.
- [19] Malcolm W. and Chase J.r., NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition, American Institute of Physics, 1998.
- [20] Press W.H., *Numerical Recipes in Fortran 77, The Art of Scientific Computing*, Second Edition, Cambridge University Press, 1992.
- Motor Internal Ballistics Simulation using Three-Dimensional Grain Burnback", *Journal of Production and Power*, Vol. 23, No. 3, 2007, pp. 575-584.
- [16] Acik S., *Internal Ballistic Design Optimization of a Solid Rocket Motor*, Master Thesis, Mechanical Engineering, Middle East Technical University, Turkey, 2010.
- [17] Kubota N., *Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion*, John Wiley and Sons, 2002.