

بررسی پدیده دود در پیشراندهای جامد و روش‌های اندازه‌گیری آن

اکبر جعفری^{۱*}، محمودرضا محمودی نژاد^۲، رضا تیموری مفرد^۳
akbar.djafari@gmail.com

چکیده

یکی از عوامل مهم که در انتخاب یک پیشرانه برای طراحی موتور مؤثر است، وضعیت دودزائی و میزان دود ایجاد شده طی احتراق پیشرانه می‌باشد. بر پایه چنین عاملی، پیشراندها براساس دانسیته دود حاصل از محصولات احتراق به دسته‌های دودزاد، دود کاهش یافته، کم دود و در نهایت بدون دود تقسیم‌بندی می‌شوند. در این مقاله تلاش شده تا با بررسی جامعی روی پدیده دود در پیشراندهای جامد، ضمن معرفی انواع دود و پارامترهای مؤثر در تولید آن به بررسی پدیده پس‌سوزی که شعله‌های حاصل از احتراق دوباره گازهای خروجی نازل در اثر اختلاط با اکسیژن هوا در عقبه موشک می‌باشد و باعث ردیابی مسیر حرکت و محل شلیک موشک می‌گردد، پرداخته شود و ضمناً عوامل مؤثر در این پدیده نیز معرفی و معایب آن مورد بررسی قرار گرفته شود و روش‌های مختلف جلوگیری از ای پدیده نیز ارائه گردد. روش‌های اندازه‌گیری دود در پیشراندها نیز در این مقاله بررسی و ارائه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: پیشرانه جامد- پدیده دود- روش اندازه‌گیری - پس‌سوزی

۱- مقدمه

یکی از عواملی که بر انتخاب یک پیشرانه برای طراحی موتور مؤثر است، میزان دودزایی و میزان دود ایجاد شده توسط احتراق پیشرانه می‌باشد. بر پایه این دسته‌بندی پیشراندها بر اساس دانسیته دود حاصل از محصولات احتراق، به دسته‌های دودزاد، دود کاهش یافته، کم دود و در نهایت بدون دود تقسیم‌بندی می‌شوند. برای اینکه برداشت صحیحی از پدیده دود داشته باشیم لازم است واژه‌های دود مرئی^۴ و تشعشع دود مانند^۵ بدرستی تعریف شوند.

دود مرئی: به ذرات جامد یا مایع مثل اکسیدهای فلزی و مه یا ذرات منجمد شده مثل H_2O و HCl که معمولاً همراه محصولات احتراق از سطح خروجی نازل خارج می‌شوند را می‌گویند.

تشعشع دود مانند: به جریان داغ خروجی از انتهای نازل گفته می‌شود که در آن پدیده‌های توربولانس، تحریک الکترونی، یونیزاسیون و از همه مهمتر پدیده پس‌سوزی اتفاق می‌افتد. بعبارت دیگر به دود همراه با تشعشع، کاتیون‌های فلزی و الکترون‌های آزاد، گفته می‌شود.

حضور تشعشع دود مانند در انتهای موشک، ممکن است باعث توقف^۶ ماموریت موشک بشود. تشعشع دود مانند یا دود مرئی ممکن است محل شلیک موشک و یا مسیر پرواز آن را آشکار و مشخص سازد. در موشک‌هایی که به صورت اپتیکی (مرئی یا با طول موج‌های مادون قرمز^۷) هدایت می‌شوند، ارسال و دریافت فرامین با وجود انباشت تشعشع دود مانند یا دود در عقبه موشک شدیداً ضعیف می‌شود و در نهایت هدایت موشک غیر ممکن می‌شود.

۱- کارشناس ارشد مهندسی پیشرانه

۲- کارشناس ارشد مهندسی پلیمر

۳- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

4- smoke

5- plume

6- Fail

7- IR

شعله‌های حاصل از پس‌سوزی در عقبه موشک، که از احتراق دوباره گازهای خروجی نازل (در اثر مخلوط شدن با اکسیژن هوا) بوجود می‌آیند، باعث ردیابی مسیر حرکت و محل شلیک موشک می‌شوند. گازها ممکن است موجب مرطوب شدن ادوات دقیق ردگیری اپتیکی موشک، بشوند. شعله‌ها، دمای تشعشع دود مانند را افزایش می‌دهند که این پدیده باعث انتشار بیشتر امواج مادون قرمز می‌شود بعلاوه، امواج الکترومغناطیسی رادار توسط شعله‌های (که توام با نمونه‌های یونیزه شده هستند)، جذب شده و بطور کلی ارسال این امواج ضعیف می‌شود.

۲- محصولات احتراق

قسمت اصلی محصولات گازی را معمولاً CO، CO₂، H₂، H₂O و N₂ تشکیل می‌دهند. در پیشران‌هایی که شامل پرکلرات آمونیوم باشد، HCl (اسید هیدروکلریک) نیز تولید می‌شود که در جدول (۱) ترکیب گازهای حاصل از احتراق بعضی از پیشران‌ها، نشان داده شده است.

جدول ۱ ترکیب گازهای حاصل از احتراق بعضی از پیشران‌ها [۱]

Composition	N% ^a						Condensed products ^c	T ^b (K)
	HCl	CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	N ₂		
EDB	0	38	13	10	23	12	1.5	2630
Smokeless EMCB (NC, NgI, RDX)	0	34	12	10	23	19		2775
Butalite (HTPB + AP)	17	18	8	12	36	9	0.2	2798
Butalane	16	22	1.3	31	11	8	10	3620

^a Molar fractions inside the chamber.

^b Combustion temperature inside the chamber.

^c Total fraction of the condensed particles at the exit plane of the nozzle after equilibrium expansion.

۳- دود اولیه

دود اولیه مخلوطی از ذرات مایع و جامد است که معمولاً همراه محصولات احتراق از سطح خروجی نازل خارج می‌شوند. دود اولیه براحتی قابل مشاهده است برای اینکه در یک زمان دارای سه ظرفیت مشخص جذب، نشر و پخش فرابنفش، مرئی یا اشعه مادون قرمز هستند که شدت مرئی بودن بستگی به تعداد، اندازه^۱ و طبیعت ذرات دارد. عامل ایجادکننده دود به فرمولاسیون اولیه پیشرانه برمی‌گردد. وجود ترکیباتی در فرمولاسیون، باعث بوجود آمدن اکسیدهای فلزی می‌شود که این ترکیبات در دمای احتراق و در خروجی از نازل به شکل مایع و جامد می‌باشد و ایجاد یک دود سفید رنگ می‌کنند. به این نوع دود، که نتیجه وجود ترکیبات فلزی با درصد بالا در پیشرانه می‌باشند، دود اولیه گویند. عواملی که تولید دود اولیه می‌کنند عبارتند از:

• از تجزیه حرارتی بازدارنده^۲ سطح پیشرانه: در گرین‌های سیگاری سوز^۳ که سطح آن‌ها از بازدارنده حرارتی پوشیده شده شده است مقدار قابل توجهی دود اولیه ایجاد می‌گردد و ثابت شده که پلی‌استر به عنوان بازدارنده حرارتی در مجاورت

1- size

2- Inhibitor

3- End-Burning

محصولات احتراق، در پیشراندهای ریخته‌گری، حدود ۳٪ وزن کم می‌کند (دمای احتراق حدود ۲۰۰۰ درجه کلوین) که همین امر باعث ایجاد ۱٪ وزنی ذرات جامد (دود) در گازهای خروجی می‌شود که این مقدار با انباشتگی که در عقبه موشک پیدا می‌کند، باعث می‌شود که موشک رؤیت^۱ شود [۱].

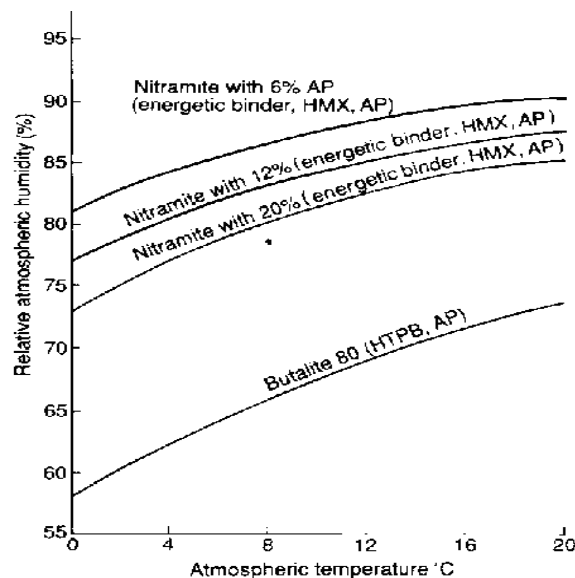
- عایق حرارتی پوسته موتور^۲
- در دماهای بالا، قسمت‌های فلزی موتور (پوسته یا نازل) که مستقیماً در تماس با گازهای داغ هست، ذوب شده و در احتراق شرکت کرده و در نتیجه تولید دود اولیه می‌کند.
- فرمولاسیون پیشرانده

موادی که می‌توانند در فرمولاسیون پیشراندها ایجاد دود کنند عبارتند از:

- کاتالیست‌های بالستیکی^۳، وجود نمک فلزاتی مثل آهن، کرم، مس، سرب و قلع بعنوان بهبود دهنده‌های نرخ سوزش.
- افزودنی‌هایی که مانع از ناپایداری احتراق می‌شوند^۴ مثل پودر آلومینیوم یا اکسیدهای فلزی.
- بازدارنده‌های نورهای ناگهانی با عناصر معدنی^۵: مواد بازدارنده پس‌سوزی یا موادی که از احتراق بعدی گازهای کامل نسوخته جلوگیری می‌کند^۶ که شامل یون‌های فلزات قلیایی، مخصوصاً پتاسیم می‌باشد.
- پودر فلزات بعنوان سوخت: وجود ترکیبات فلزی مثل پودر آلومینیوم که جهت افزایش ایمپالس ویژه و پایداری احتراق به فرمولاسیون پیشرانده اضافه می‌شوند.

۴- دود ثانویه

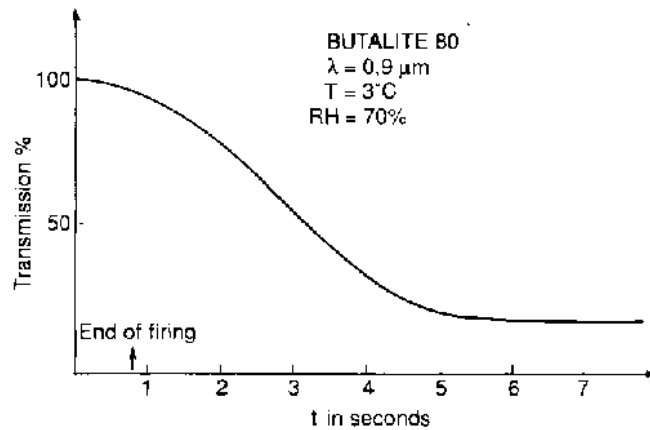
بعضی از ترکیبات مثل پرکلرات آمونیوم بر اثر احتراق، بخاراتی مانند H_2O و HCl ایجاد می‌کنند. این بخارات تحت شرایط خاص جوی در محیط‌های مرطوب و در شرایط دمایی پایین تشکیل مه یا ذرات منجمد می‌دهند که به صورت دود نمایان می‌شود. به این نوع دود، دود ثانویه می‌گویند. در شکل (۱) محدوده شرایط جوی جهت آشکار شدن دود ثانویه برای چند نوع پیشرانده مقایسه شده است.



شکل ۱ مقایسه محدوده شرایط جوی جهت آشکار شدن دود ثانویه برای چند نوع پیشرانده [۱]

- 1- Detect
- 2 - Thermal Insulation
- 3 - Ballistic Catalysts
- 4 - Anti-instability Additives
- 5 - Flash Suppressors
- 6 - after burning Suppressant

مشاهده شده که معمولا بعد از چند ثانیه دود ثانویه به بالاترین ظرفیت و تیرگی می‌رسد، یعنی زمانی طول می‌کشد تا بیشتر بخارات H₂O و HCl تحت شرایط جوی تبدیل به مه یا منجمد شوند. شکل (۲) نشان می‌دهد برای یک پیشرانه خاص با گذشت زمان مقدار عبور نور مرئی یا اشعه مادون قرمز کم می‌شود و به عبارتی مقداری از نور توسط دود ثانویه جذب یا پخش می‌شود.



شکل ۲ تغییرات مقدار عبور نور مرئی یا اشعه مادون قرمز با گذشت زمان برای یک پیشرانه خاص [۲]

در پیشرانه‌های کامپوزیت با بیش از ۶۰٪ آمونیوم پرکلرات، دود ثانویه خیلی غلیظی تشکیل می‌شود. ولی در پیشرانه‌های XLDB (با درصد خیلی پایین از آمونیوم پرکلرات)، در موقع روشن شدن موتور دود شفافی مشاهده می‌شود که کاتالیست‌های بالستیکی نقش خیلی کمی دارند. چون مقدار این مواد در فرمولاسیون کم است. پس چیزی که در تشکیل دود ثانویه بعد از فرمولاسیون پیشرانه خیلی مهم است شرایط جوی (مخصوصا دما و رطوبت) می‌باشد که در جدول (۲) درصد تشکیل دود ثانویه برای دو نوع پیشرانه در فصول مختلف سال نشان داده شده است.

جدول ۲ شدت دود ثانویه برای دو نوع پیشرانه در فصول مختلف سال [۱]

TABLE 2

Frequency of occurrence of secondary smoke
in Paris Montsouris (percentages)

Season	82% AP composite	15% AP XLDB
Spring	30	17
Summer	19	4
Fall	50	25
Winter	64	40
Annual average	40	21

جدول (۳) بر اساس تاثیر ترکیبات AP و Al در دودزایی پیشرانه‌ها تنظیم شده است.

جدول ۳ تاثیر فرمولاسیون در دودزایی پیشرانه‌ها [۱]

TABLE 3 Classification of the propellants* based on their signature

Class	Primary smoke	Secondary smoke	Restrictions place on the formulation
Smokeless	Very little	None	No aluminum No AP Very low level of condensable species
Minimal smoke	Very little	Low density and not frequent	Little or no aluminum, Little AP (< 20%) Very low level of condensables species
Reduced smoke	Little	Yes	AP permitted Very low level of condensable species
High signature	Yes	Yes	None

* This classification cannot yet be considered as an international classification. A working group of NATO/AGARD is now trying to define a standard international classification.

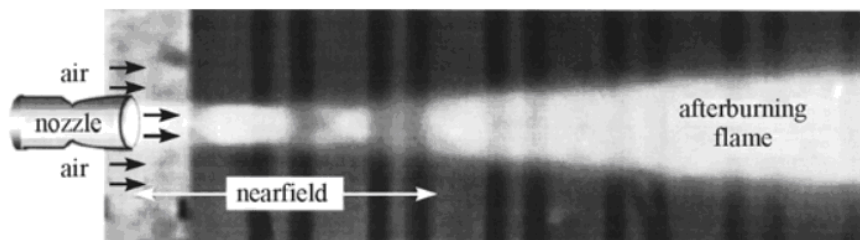
۵- پدیده پس‌سوزی

پیشرانه‌هایی که اکسیژن بالانس منفی دارند، پیشرانه‌های غنی از سوخت^۱ گفته می‌شود که پیشرانه‌های دویایه از این دسته هستند بنابراین در محفظه احتراق بجای گازهای CO₂ و H₂O بیشتر CO و H₂ تشکیل می‌شود (جدول ۴). بعضی مواقع در طراحی پیشرانه‌های دویایه عمداً فرمولاسیون را غنی از سوخت انتخاب می‌کنند چون جرم مولکولی CO و H₂ کمتر از CO₂ و H₂O می‌باشد و ایمپالس ویژه رابطه عکس با جرم مولکولی محصولات احتراق^۲ دارد یعنی با کاهش جرم مولکولی، ایمپالس ویژه افزایش می‌یابد.

جدول ۴ محصولات احتراق انواع پیشرانه‌های جامد [۲]

Class of propellant	Theoretical gas composition, mole %				
	CO	H ₂	H ₂ O	HCl	HF
AP-hydrocarbon	13	6	42	20	-
HMX-nitrocellulose-nitroplasticizer	6	15	20	-	-
AP-HMX-nitrocellulose-nitroplasticizer	23	17	23	4	-
HMX-fluorocarbon	30	1	5	-	16
Nitrocellulose-nitroplasticizer	37	26	9	-	-

احتراق یا اکسیداسیون دوباره CO و H₂ در بیرون از سطح خروجی نازل در مجاورت اکسیژن هوا را پس‌سوزی یا احتراق ثانویه می‌گویند و چون احتراق مجدد در بیرون موتور اتفاق می‌افتد از نقطه نظر دود، می‌توان آن را بررسی مجدد نمود (شکل ۳).



شکل ۳ رخداد پدیده پس‌سوزی [۳]

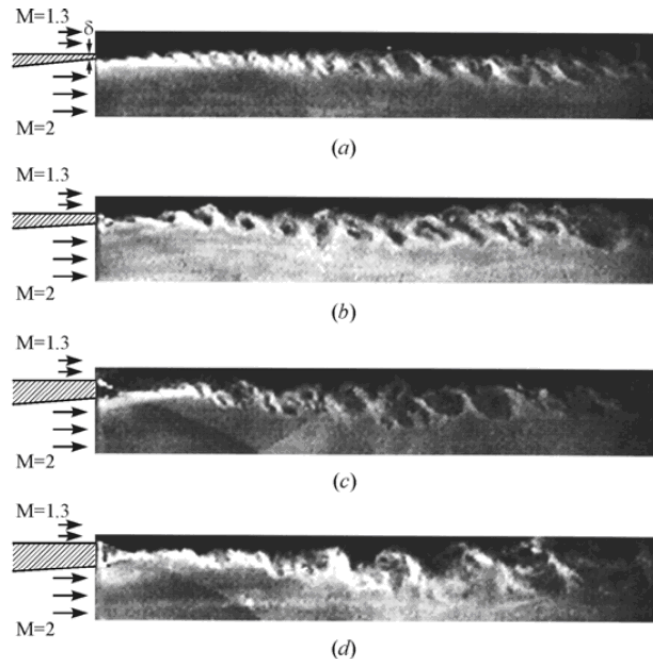
۵-۱ عوامل مؤثر در پدیده پس‌سوزی

- جریان خروجی گازها از سطح خروجی نازل: هرچه قدر دبی خروجی گازها بیشتر باشد، شدت آشفته‌گی آن بیشتر و در نتیجه اکسیژن بیشتری از هوا با این گازها مخلوط شده و سریعتر این پدیده اتفاق می‌افتد.
- طراحی موشک: در آشفته‌گی جریان گازهای خروجی مؤثر است.
- سرعت موشک: در آشفته‌گی جریان گازهای خروجی مؤثر است.
- ارتفاع پرواز: در ارتفاعات بالا مقدار اکسیژن کمتر است و در نتیجه این پدیده دیرتر اتفاق می‌افتد.

1 - Fuel-Rich

2 - M_w

-فرمولاسیون پیشرانه: با توجه به فرمولاسیون پیشرانه، خواص آن مثل سطح انرژی، دمای احتراق، طبیعت گازهای خروجی و حالت‌های احتراق تغییر می‌کند و خواص مذکور در این پدیده خیلی مؤثر هستند.
 -فشار محفظه احتراق: هر چه فشار محفظه بیشتر باشد نرخ خروج گازها بیشتر و جریان، آشفته‌تر خواهد بود.
 -دمای گازهای خروجی: هر چه دمای گازهای خروجی بالاتر باشد این پدیده راحت‌تر اتفاق می‌افتد.
 -شکل نازل: شکل نازل در ایجاد آشفستگی جریان مؤثر است (شکل ۴).



شکل ۴ تاثیر شکل نازل در رخداد پدیده پس‌سوزی [۳]

۵-۲- معایب پدیده پس‌سوزی

پدیده پس‌سوزی چون همراه با احتراق مجدد است بنابراین در پشت صفحه خروجی نازل، افزایش دما خواهیم داشت و در نتیجه مشکلات زیر بوجود می‌آید:

- درخشندگی^۱ و نور ایجاد خواهد شد و در نتیجه ردیابی موشک برای دشمن میسر می‌گردد.
- نشر مادون قرمز^۲ بوجود خواهد آمد در نتیجه در هدایت موشک‌هایی که به این روش ردگیری می‌شوند، اختلال بوجود خواهد آمد
- باعث تراکم یون‌ها^۳ شده و در نتیجه در هدایت‌های راداری مشکلاتی ایجاد خواهد شد.
- به خاطر ایجاد الکترون‌های آزاد و اختلال در امواج رادار (امواج الکترومغناطیسی) امکان ردیابی با رادار افزایش می‌یابد.
- افزایش آشفستگی و اغتشاش در گازهای خروجی و در نتیجه اختلالات در هدایت لیزری و نویز^۴ در هدایت سیگنال‌های رادار به‌وجود می‌آید.
- نویزهای صوتی^۵ موشک را افزایش می‌دهد.
- طبیعت و مقدار دوده‌های اولیه و ثانویه (بواسطه تبدیل H_2 به H_2O) را افزایش می‌دهد.

1 - Luminosity
 2 - Infrared Emission
 3 - Concentration of Ions
 4 - Noise
 5 - Acoustic

▪ شعله‌های ناشی از این پدیده باعث بوجود آمدن H_2O و در نتیجه احتمال مرطوب شدن ادوات دقیق ردگیری اپتیکی موشک یا هدف وجود دارد.

۵-۳- روش‌های جلوگیری از پدیده پس‌سوزی

الف- استفاده بازدارنده‌های نور ناگهانی

اضافه کردن ترکیباتی که حاوی فلزات قلیایی هستند (سدیم و مخصوصاً پتاسیم) مثل سولفات پتاسیم در فرمولاسیون پیشرانده‌های همگن دوپایه اکسترودی و ریخته‌گری و نیتروآمین‌ها امکان خنثی کردن پدیده پس‌سوزی را بوجود می‌آورد [۴-۵]، البته این افزودنی‌ها تولید دود اولیه می‌کنند (برای اینکه پایه فلزی دارند) ولی مقدار این ترکیبات در فرمولاسیون خیلی کم می‌باشد و به همین دلیل در پیشرانده‌های بدون دود، مقدار کمی دود اولیه مشاهده می‌شود. بازدارنده‌های پس‌سوزی علاوه بر خاصیت بازدارندگی پس‌سوزی، بر خواص بالستیکی، پایداری حرارتی، پایداری شیمیایی، سطح انرژی، طول عمر و مقدار دود اولیه پیشرانده‌ها مؤثرند لذا در انتخاب این ترکیبات باید موارد فوق مورد نظر قرار گیرد. پدیده پس‌سوزی در همه پیشرانده‌ها وجود ندارد و بیشتر در پیشرانده‌هایی که کمبود ترکیبات اکسیدکننده مثل آمونیوم پرکلرات، پتاسیوم پرکلرات و ... دارند، دیده می‌شود یعنی در پیشرانده‌هایی که غنی از سوخت هستند، احتراق کامل نیست و در محصولات احتراق آن‌ها H_2 و CO وجود دارد. جدول (۵) نشان می‌دهد که در چه پیشرانده‌هایی این پدیده اتفاق می‌افتد. [۱ و ۴-۶]

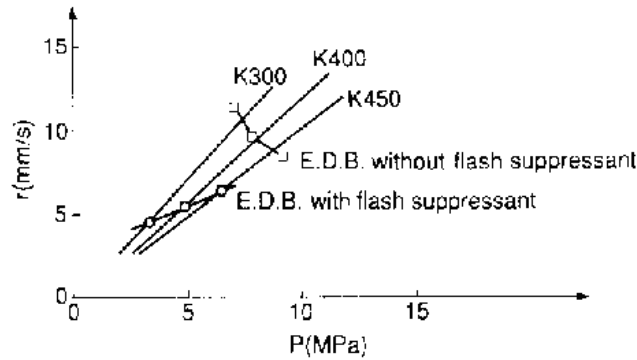
جدول ۵ تقسیم‌بندی پیشرانده‌ها بر اساس پدیده پس‌سوزی [۲]

Propellant	K Equivalent ppm	Afterburning	Attenuation dB	Frequency GHz
CDB	21	yes	16	10
Nitramite 1905 (minimum smoke CMDB)	150	yes	16	16
Nitramite 1903 (minimum smoke CMDB)	3720	no	0.2	16
EDB	2635	yes	11	16
Butalite (HTPB/AP)	45	no	1	10

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در پیشرانده‌های همگن دوپایه اکسترودی و ریخته‌گری این پدیده اتفاق می‌افتد. اضافه کردن بازدارنده‌های پس‌سوزی بطور مستقیم در مخلوط فرمولاسیون، در نرخ سوزش پیشرانده‌های دو پایه تأثیر می‌گذارد که در شکل (۳-۳۲) این تأثیرات ملاحظه می‌شود. برای دوری جستن از این تأثیرات باید تغییراتی در فرآیند تولید پیشرانده‌های دوپایه بوجود آید:

- در پیشرانده‌های اکسترودی، بازدارنده‌های پس‌سوزی در مرحله نهایی عملیات رول کردن^۱ اضافه می‌شوند تا از نزدیکی مولکولی با کاتالیست‌های نرخ سوزش جلوگیری شود [۱].
- در پیشرانده‌های دوپایه ریخته‌گری، دو نوع باروت ساخته می‌شود و در فرمولاسیون یکی از باروت‌ها بازدارنده پس‌سوزی و در فرمولاسیون باروت دومی کاتالیست‌های نرخ سوزش اضافه می‌شود. این عمل باعث می‌شود که مقدار بازدارنده تغییر نکند و درست همان مقدار مورد نظر در فرمولاسیون باقی بماند [۱].

ب- استفاده از اثر شکل نازل، نرخ موشک، ارتفاع پرواز و طراحی موشک

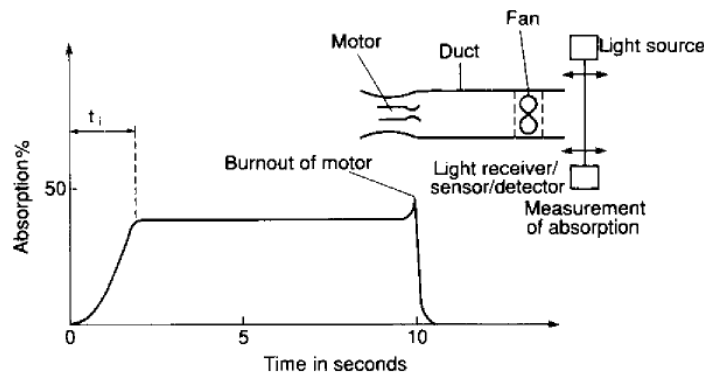


شکل ۵ تاثیر بازدارنده‌های پس‌سوزی در نرخ سوزش پیش‌رانه‌های دو پایه [۱]

۶- روش‌های اندازه‌گیری دود در پیش‌رانه‌ها

۶-۱- روش دود متر^۱

دودمتر یک تونل باد زیر صوت^۲ با ۱۰ متر طول و یک متر قطر و سکوی تست استاتیک جهت مقایسه دود اولیه پیش‌رانه‌ها، در شرایط استاندارد، می‌باشد. تجهیزات اندازه‌گیری اپتیکی در بیرون تونل نصب می‌شود (شکل ۶). البته در این فرآیند توسط دستگاه فن هوا به داخل تونل وارد می‌شود و بدینوسیله گازهای خروجی موتور از 10^{-1} تا 10^{-2} (نسبت سرعت گازها به سرعت هوای ورودی تونل) رقیق می‌شوند.



شکل ۶ روش دود متر [۱]

اشکال بزرگ این وسیله این است که دود تشکیل شده خیلی به حالت‌های واقعی نزدیک نمی‌باشد همچنین زمان عمل کرد موتور باید بالای دو ثانیه باشد اما لاقط شرایط جوی (آب و هوا) هیچ تاثیری بر روی تست ندارد و تست براحتی قابل تکرار می‌باشد.

۶-۲- روش اندازه‌گیری فری جت^۳ [۷]

در این روش، سایت تست در کانال وسیعی از هوا محفوظ شده تا شکل دود انباشته شده در پشت موتور تغییر نکند و تجهیزات اندازه‌گیری (منبع نور و سنسور) در جهت عمود بر محور خروج گازها در مسافت مناسب (درست در نقطه‌ای که گازها شروع به condensate می‌کنند) نصب می‌شود و یک سری دیگر از این تجهیزات بطور متحرک در طول مسیر دود حرکت می‌کند تا میزان دود را در مسافت‌ها و زمان‌های مختلف ثبت کند.

1 - The smoke meter

2 - subsonic

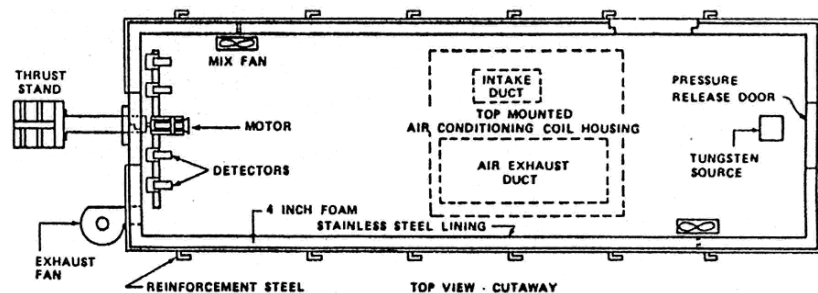
3 - Free jet

لازم به ذکر است در روش‌های اندازه‌گیری اپتیکی، منبع نور و دتکتور در رنجی انتخاب می‌شوند که هدایت موشک در آن طول موج‌ها انجام می‌شود.

۳-۶- روش اندازه‌گیری^۱ SCF [۷]

از این روش در گروه موشکی ارتش آمریکا جهت اندازه‌گیری مشخصات دود استفاده می‌شود. SCF محفظه‌ای است به مشخصات:

- به حجم $19/6 \text{ m}^3$
 - به ضخامت چهار اینچ، توسط فوم، عایق کاری شده است.
 - موتورهایی که جهت تست در این محفظه استفاده می‌شود، قابلیت تست استاتیک گرین‌های 65-75 g را دارد.
 - محفظه از دمای 40°F تا 140°F قابل کنترل می‌باشد.
 - درصد رطوبت محفظه در محدوده ۱۰۰-۲۰٪ قابل کنترل می‌باشد.
 - در محفظه، پورتهایی جهت دسترسی نصب تجهیزات، تعبیه شده است.
 - موتورها باید با آتش‌زنه‌های بدون دود روشن شوند.
 - موتورها باید در داخل محفظه روشن شوند.
 - دتکتورها و منبع نور، مریبی یا IR می‌باشد.
- جزئیات SCF در شکل (۷) مشاهده می‌شود:



شکل ۷ روش اندازه‌گیری دود بروش SCF [۷]

۴-۶- اندازه‌گیری بروش امواج مادون قرمز^۲ [۷]

- در این روش مقدار نشر، جذب و پخش طیف‌های مادون قرمز توسط مولکول‌های گازها، اندازه‌گیری می‌شود.
- تمام پدیده‌هایی که بعد از سطح خروجی نازل اتفاق می‌افتد و باعث تغییرات در مقدار دود اولیه و ثانویه می‌شود با این روش قابل اندازه‌گیری است
- با این روش تأثیرات پدیده پس‌سوزی در هدایت موشک قابل بررسی است
- استفاده از دوربین IR ارزیابی پدیده پس‌سوزی را ممکن می‌سازد
- با استفاده از دوربین IR می‌توان راندمان مواد بازدارنده پس‌سوزی را بررسی کرد.

۷- نتیجه‌گیری

- پیشران‌های دوپایه که به پیشران‌های بدون دود معروف هستند به نسبت مقدار کاتالیست‌های نرخ سوزش، بازدارنده‌های پس‌سوزی و پایدار کننده‌های احتراق موجود در فرمولاسیون‌شان، دارای دود اولیه هستند.

1 - Smoke Characterization Facility

2 - infrared

- پدیده پس‌سوزی در پیشران‌های دوپایه وجود دارد.
- در پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته بواسطه پدیده پس‌سوزی، دود ثانویه نیز بوجود می‌آید.
- در پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته بواسطه پدیده پس‌سوزی، در هدایت‌های لیزری، راداری و IR، اختلال بوجود می‌آید.
- با به حداقل رساندن مقدار کاتالیست‌های سرعت سوزش، بازدارنده‌های پس‌سوزی و پایدار کننده‌های احتراق می‌توان مقدار دود اولیه را در در پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته کم کرد.
- با تغییر در فرآیند تولید می‌توان اثر بازدارنده‌های پس‌سوزی را بهینه کرد و از تاثیر منفی آن‌ها (تأثیر در سرعت سوزش) جلوگیری کرد.
- بسته به نوع فرآیند تولید، احتمال مصرف شدن بازدارنده‌های پس‌سوزی در حین فرآیند وجود دارد و در مراحل مختلف تولید مقدار آن باید کنترل شود.
- با روش متناسب با نوع هدایت موشک، می‌توان مقدار دود را بطور کمی اندازه‌گیری کرد.

۸- پیشنهادات

- روشی عملی جهت اندازه‌گیری مقدار کمی دود در مقیاس موتور کوچک طراحی شود.
- اثر متقابل ترکیب انواع پیشران‌ها با بازدارنده‌های^۱ سطح سوزش و عایق حرارتی^۲ پوسته موتور و لاینرها بررسی شود.
- اثر متقابل بازدارنده‌های پس‌سوزی در مجاورت با دیگر اجزا ترکیب پیشرانه بیشتر بررسی شود.

منابع

- [1] Davenas, A.; "Solid rocket propulsion technology", Pergamon Press Inc 1992, USA.
- [2] George P. Sutton. Rocket Propulsion Elements. Seventh Edition
- [3] Roy G.D. "Advances in chemical propulsion science to technology". Chapter 9 (CRC, 2002)(T)(525s)
- [4] Miller, E., and Mitson, S.; "The suppression of afterburning in solid rocket plumes by potassium salts". AIAA Paper No. 85-1253 (1985), USA.
- [5] Balley, A. and Murray, S. G.; "Explosives, Propellants and Pyrotechnics". BRASSEY'S Inc., April 1989, UK
- [6] Mchale, E.T; "Flame Inhibition by Potassium Compounds". Combustion and Flame, 1975, 24 pp 277-279, USA
- [7] Kenneth K.Kuo, Martin Summerfield. 1963. Fundamentals of solid propellant combustion