

شده است [21].

جدول 2- ترکیب درصد اجزاء پیشرانه جامد مولد گاز بر پایه آمونیوم نیترات پایدار شده.

درصدوزنی [19]	درصدوزنی [16]	ترکیبات
17 - 19	22/85	HTPB
76 - 83	73/125	PSAN
-	1/875	Fe ₂ O ₃
-	1/9	عاملپخت
-	0/25	آنتیاکسیدان
0 - 5	-	عاملخنککننده
0 - 3	-	اصلاحکنندههالاستیکی

جدول 3- فرمولاسیون پیشرانه مولد گاز بر اساس بایندر GAP [20].

درصدوزنی	ترکیبات
27/2	GAP
58	PSAN
3/9	N ₁₀₀ (عامل اتصالعرضیوعاملپخت)
8	AX (خنککننده)
2	کاتالیزسترسرعتسوزش
0/9	افزودنیهایدیگر

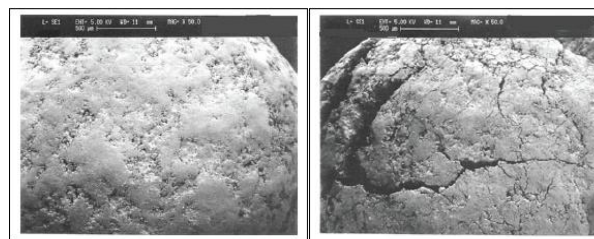
قابل ذکر است که فرمولاسیونهای دارای گلیسیدیل آزید پلیمر (GAP) و آمونیوم پرکلرات، دارای دمای گازهای حاصل از احتراق بالا و سرعت سوزش زیاد میباشند و همچنین ترکیبات دارای آمونیوم پرکلرات، به علت داشتن کلر، دارای گازهای خروجی سمی و خورنده میباشند.

جدول 4- فرمولاسیونهای بر پایه گوانیدین نیترات و آمونیوم پرکلرات [21].

درصدوزنیتترکیبات در فرمولاسیون					ترکیبات
5	4	3	2	1	
58/5	47/4	60/6	56/7	30	GN
23/5	39/5	24/3	22/8	21/3	AP
17/8	-	-	-	16/2	NaNO ₃
-	13/1	-	-	-	Li ₂ CO ₃
-	-	14/9	-	-	LiNO ₃
-	-	-	20/5	-	KNO ₃
-	-	-	-	32/3	HMX یا RDX
0/2	-	0/2	-	0/2	سیلیکا

0/99	125/2	ایزومتریک	II-I
------	-------	-----------	------

در انتقال فاز حالت‌های IV-III و IV-V، حجم آمونیوم نیترات به ترتیب حدود 3% و 3/5% افزایش می‌یابد. انتقال IV-III یک عیب بسیار مهم در حین نگهداری پیشرانه می‌باشد. اگر آمونیوم نیترات موجود در آن در محدوده دمایی 32/2°C (انتقال IV-III)، قرار داشته باشد، حجم آن و بالطبع حجم پیشرانه، افزایش می‌یابد و یا این تغییر در هنگام عملکرد موتور رخ می‌دهد. از این انتقال نمی‌توان جلوگیری کرد ولی با روش‌های مختلفی می‌توان آن را کم و تقریباً ناچیز نمود. فرایند تولید پیشرانه‌های عاری از این عیب می‌تواند در دمایی بالاتر از دمای این انتقال انجام شود که به موجب آن این انتقال بعد از سرد کردن با کاهش حجم رخ می‌دهد. روش دیگر بر اساس بالا بردن دمای تغییر فاز با استفاده از ترکیبات معینی است که پتاسیم نیترات در اینجا از اهمیت زیادی برخوردار است. علت افزودن پتاسیم نیترات اینست که خودش یک اکسیدکننده است و انتظار می‌رود که حداقل با نقش اصلی آمونیوم نیترات که اکسیدکنندگی است همراهی کند [14 و 13 و 10]. تغییرات حجمی ناشی از این تغییرات فازی در آمونیوم نیترات، باعث افزایش حجم و ترک خوردن آمونیوم نیترات یا پیشرانه تشکیل شده از آن می‌شود (شکل 1).



شکل 1- آمونیوم نیترات قبل و بعد از اعمال سیکل حرارتی [18].

در زمینه به کارگیری آمونیوم نیترات برای ساخت پیشرانه جامد مولد گاز، فعالیت‌های زیادی انجام شده است. کاروال هیرو و همکاران، تا میزان 73% از نوع پایدار شده این اکسیدکننده را در فرمولاسیون پیشرانه جامد مرکب بر پایه بایندر پلی بوتادیان دارای گروه‌های انتهایی هیدروکسیل¹ (HTPB)، وارد کردند [16] و افزایش مقدار اکسیدکننده جامد در پیشرانه تا 83% نیز گزارش شده است [19] که به همراه عامل خنک‌کننده استفاده شده است (جدول 2). این اکسیدکننده در ساخت پیشرانه‌های جامد بر پایه بایندر HTPB به همراه گوانیدین نیترات² (GN) و یا با بایندر پلی پروپیلن گلیکول³ (PPG) و یا بایندر گلیسیدیل آزید پلیمر⁴ (GAP)، نیز استفاده شده است (جدول 3) [20]. همچنین تهیه مولدهای گاز پیروتکنیکی بر پایه گوانیدین نیترات و آمونیوم پرکلرات و بدون استفاده از سیستم بایندر (جدول 4) نیز گزارش

¹ 1-Hydroxy-Terminated Polybutadiene

² Guanidine Nitrate

³ Poly Propylene Glycol

⁴ Glycidyl Azide Polymer

2-2- ساخت آمونیوم نیترات فاز پایدار (PSAN)

2-2-1- فرایند انحلال و کریستالیزاسیون مجدد

پس از توزین و آماده‌سازی مواد اولیه، در یک بشر 2 لیتری مقدار 200 گرم آب مقطر ریخته شده و روی هیتر قرار داده می‌شود. یک عدد مگنت به منظور اختلاط بهتر داخل بشر انداخته شده و هنگامی که دمای آب به 40°C رسید، مقدار 200 گرم پتاسیم نیترات به آن اضافه می‌شود، در دمای 50°C - 40°C مشاهده می‌شود که پتاسیم نیترات به صورت کامل در آب حل می‌شود اما از آنجا که پتاسیم نیترات خالص نیست، ناخالصی‌هایی در محلول داخل بشر مشاهده می‌شود، محلول حاصل را در حالیکه هنوز گرم است از کاغذ صافی عبور داده تا ناخالصی‌های آن گرفته شود. سپس اجازه داده تا دمای محلول به 80°C برسد (آمونیوم نیترات در این دما در آب حل می‌شود) و در این هنگام 2kg پودر آمونیوم نیترات به محلول اضافه می‌شود. واکنش آمونیوم نیترات با محلول گرماگیر است برای همین در هنگام افزایش آمونیوم نیترات دما از 80°C به 60°C کاهش می‌یابد، از اینرو دوباره اجازه داده می‌شود که بعد از انحلال کامل آمونیوم نیترات دما به 80°C برسد. عمده ناخالصی‌های پتاسیم نیترات در مرحله صاف کردن جدا می‌گردد. سپس اجازه داده می‌شود که دما تا 120°C بالا رود تا انحلال کامل شود، پس از آن، محلول داغ را داخل یک سینی ساخته شده از جنس فویل آلومینیوم ریخته و اجازه داده می‌شود تا محلول در دمای محیط سرد شده و بلورهای PSAN، تشکیل گردد.

2-2-2- خشک کردن و تهیه آمونیوم نیترا ت فاز پایدار میکرونیوز

پس از خشک شدن کامل، بلورهای PSAN بدست آمده آسیاب شده (کوچک تر از 300 میکرون) و برای مراحل بعدی کار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این بلورهای آسیاب شده دارای اندازه کمتر از 300 میکرون می‌باشند، به منظور رسیدن به دانه بندی مناسب تر و اطمینان از یکسان بودن اندازه تمامی دانه‌ها، ذرات آمونیوم نیترات فاز پایدار از مش شماره 80 عبور داده شده و به اندازه‌ای حدود 110 میکرون خواهند رسید. اگر این ذرات در دمای محیط باشند، به علت خصلت ذاتی آمونیوم نیترات، مقداری آب جذب می‌کنند، بنابراین برای استفاده از آن‌ها در تولید پیشرانه‌های مولد گاز، این ذرات به مدت 48 ساعت در آونی با دمای 60°C قرار می‌گیرند. در شکل زیر مراحل ساخت آمونیوم نیترات فاز پایدار نشان داده شده است (شکل 2).

نیاز به ساخت مولدهای گازی با دمای گازهای حاصل از احتراق پایین، سرعت سوزش در محدوده 3-1 mm/s و تولید محصولات با خصوصیات غیر خورنده بودن و غیر سمی بودن، باعث شد تا از آمونیوم نیترات فاز پایدار شده به عنوان اکسیدکننده در فرمولاسیون استفاده گردد. بنابراین در این تحقیق، ابتدا آمونیوم نیترات طی یک سری از فرایندهای شیمیایی به نوع پایدار آن تبدیل گردید (که در این حالت به آن آمونیوم نیترات فاز پایدار شده¹ (PSAN) گفته می‌شود)، سپس آمونیوم نیترات پایدار شده، در ساخت پیشرانه جامد مولد گاز بکار گرفته شد و خواص مکانیکی و احتراقی آن بررسی گردید.

این فرمولاسیون (فرمولاسیون بر اساس آمونیوم نیترات فاز پایدار شده و بایندر HTPB)، برای نخستین بار در کشور انجام شده و مشخصاتی نظیر خواص مکانیکی مناسب، سرعت سوزش پایین، دمای گازهای احتراق پایین و عدم سمیت و خوردگی محصولات به دلیل نداشتن کلر را دارا می‌باشد.

2- بخش تجربی

2-1- مواد مصرفی و تجهیزات

آمونیوم نیترات صنعتی با $M_w=80/5\text{gr/mol}$ و چگالی $1/725\text{ gr/cm}^3$ به عنوان اکسیدکننده، پتاسیم نیترات صنعتی 96% با $M_w=101/1\text{gr/mol}$ و چگالی $2/109\text{ gr/cm}^3$ به عنوان عامل پایدارکننده فاز، پلی بوتادی اندارای گروه‌های انتهایی هیدروکسیل (HTPB) صنعتی چگالی برابر با $0/91\text{ gr/cm}^3$ و $M_w=3200\text{gr/mol}$ به عنوان بایندر، اکسید آهن (Fe_2O_3) با خلوص 96-97 درصد به عنوان کاتالیست سرعت سوزش، تولوئن دی ایزوسیانات² (TDI) به عنوان عامل پخت استفاده شد.

همچنین از ظرف اختلاط³ خورشیدی مجهز به پمپ خلاء و سیستم گردش آب برای تأمین دمای مورد نیاز جهت انجام فرایند اختلاط، لرزاننده⁴ (شیکر) برای خارج شدن حباب‌های احتمالی، هاون چینی برای پودر کردن دانه‌های درشت مواد اولیه، قالب به منظور ریخته‌گری⁵ نمونه پیشرانه تولید شده، آون برای قرار دادن قالب سوخت در داخل آن به منظور کامل شدن فرایند پخت، بشر، گرم‌کن، دماسنج، کاغذ صافی، اسپاتول، همزن و قیف شیشه‌ای استفاده گردید.

خواص مکانیکی پیشرانه‌های ساخته شده توسط دستگاه کشش سنج فاریس⁶ اندازه‌گیری می‌شود. همچنین سرعت سوزش این پیشرانه‌ها، مطابق روش بمب کرافورد اندازه‌گیری می‌گردد.

1 -Phase stabilized ammonium nitrate

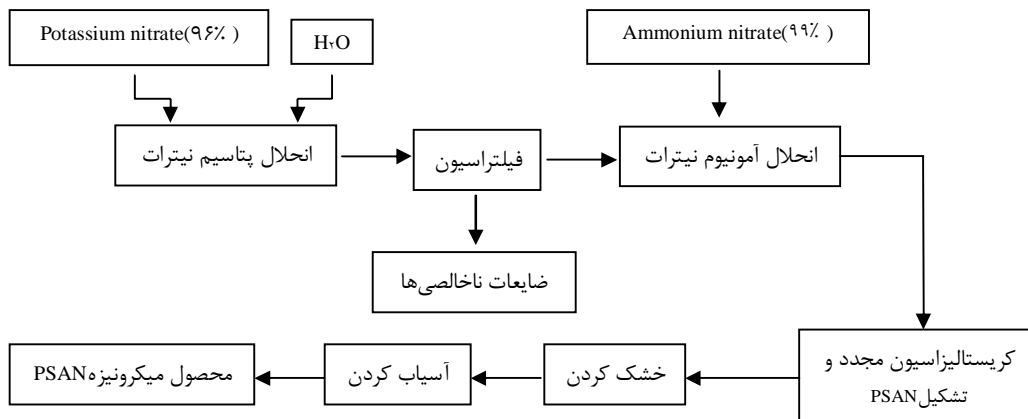
2-Toluylene diisocyanate

3-Mixer

4-Shaker

5-Casting

6-Farris



شکل 2- نمودار جعبه‌ای فرایند تولید آمونیوم نیترات فاز پایدار (PSAN).

3-2- ساخت پیشرانه

با توجه به مطالعات انجام شده و بر مبنای اهداف این تحقیق، فرمولاسیون بر پایه بایندر HTPB طراحی گردید. با توجه به سرعت سوزش بسیار کند آمونیوم نیترات، از کاتالیست سرعت سوزش Fe_2O_3 استفاده شد. همچنین به منظور تهیه نمونه‌هایی با سرعت سوزش و دمای گازهای احتراق متفاوت، بخشی از آمونیوم نیترات موجود در فرمولاسیون، با اکسیدکننده‌های آمونیوم پرکلرات گوانیدین نیترات، جایگزین گردید (جدول 5).



شکل 3- تصویری از قالب ریخته‌گری سوخت.

جدول 5- فرمولاسیون پیشرانه‌های تولید شده.

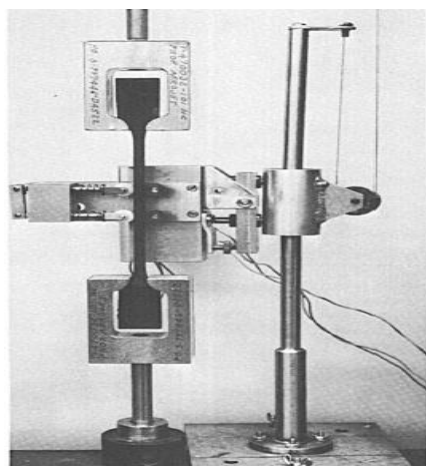
ماده افزودنی	عامل پخت	درصدوزن مواد مصرفی					تجزیه آمونیوم
		Fe_2O_3	HTPB	گوانیدین نیترات	آمونیم پرکلرات	آمونیم نیترات	
2	1/25	0/75	22	-	-	74	101
2	1/25	0/75	22	2	5	67	102
2	1/25	0/75	22	2	10	62	103

3- نتایج و بحث

در مرحله اول، لازم بود که آمونیوم نیترات فاز پایدار تهیه گردد. بدین منظور، مقادیر متفاوتی از نمک اصلاح‌کننده معدنی پتاسیم نیترات، در فرایند پایداری فازی آمونیوم نیترات استفاده گردید (جدول 6). نمونه‌های تولید شده با درصدهای 0/25 تا 10% پس از گذشت یک هفته در دمای محیط خشک شدند. با بررسی این نمونه‌ها مشخص شد که در برخی از آن‌ها افزایش حجمی وجود دارد که به صورت پف کردن روی سطح نمونه و حتی در برخی نمونه‌ها بر روی جداره‌های ظرف حاوی آن‌ها مشاهده گردید. از آنجاکه تغییر فازی آمونیوم نیترات از حالت III-IV که در دمای محیط رخ می‌دهد، عامل این تغییر حجم است، و با توجه به اینکه وزن تمامی نمونه‌ها یکسان بوده (نمونه‌های 50 گرمی)، و از ابتدا مشخص است، با جدا کردن این قسمت‌های پف کرده و جدا شده از سطح و یا مقادیر چسبیده به جداره‌ها و کم کردن آن‌ها از مقدار اولیه (50 گرم)، درصد افزایش حجم بدست می‌آید. بنابراین هرچه درصد افزایش حجمی کمتر باشد، آمونیوم نیترات حاصل از نظر فازی پایدارتر است. در مرجع 18 عنوان شده است که با استفاده از 9% وزنی پتاسیم نیترات، تغییر حجمی حدود 0/02% است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش پتاسیم نیترات از 6- 0/25 درصد در فرایند پایداری،

نمونه‌های پیشرانه در ظرف اختلاط خورشیدی و در دمای $60^\circ C$ مخلوط می‌شوند. فرایند اختلاط حدود 2 ساعت به طول انجامید. در حین فرایند اختلاط، میزان دور تیغه‌ها بر روی عدد 15rpm (دور در دقیقه) تنظیم شده و هر سه دقیقه یک‌بار جهت گردش تیغه‌ها عوض شد. در مراحل پایانی اختلاط، به منظور اطمینان از خروج گازها و تولید سوخت بدون حباب، بر روی نمونه خلاء $0/03MPa$ اعمال گردید. پس از دو ساعت اختلاط، ریخته‌گری در شرایط اتاق و رطوبت کمتر از 20% در فشار اتمسفر انجام گردید. سپس ترکیب بدست آمده درون قالب ریخته شده (شکل 3) و جهت حصول اطمینان نهایی از نبود حباب، درون شیکر گذاشته شد. سپس به مدت چهار روز در یک آون با دمای $60^\circ C$ پخت گردید.

شود. نمونه می تواند به روش های برش کاری حدیده ای، ریخته گری یا فرزکاری تهیه شود. نمونه ها مطابق با استاندارد ASTM D695 تهیه می شوند که استوانه ای و دارای قطر و 25/4mm طول می باشد. سپس از آن ها نمونه های دمیل مانند بریده می شود. تست کشش تک محوری با نرخ کرنش تقریباً ثابت در محدوده 0/0001 تا 0/01 هر تتر و توسط ماشین تست کشش (INSTRON ۵۵۸۳) انجام می شود. نمونه ای از کشش سنج های دقیق ساخت شرکت فارسیس در شکل (5) نشان داده شده است [22].



شکل 5- نمونه ای از کشش سنج فارسیس [22].

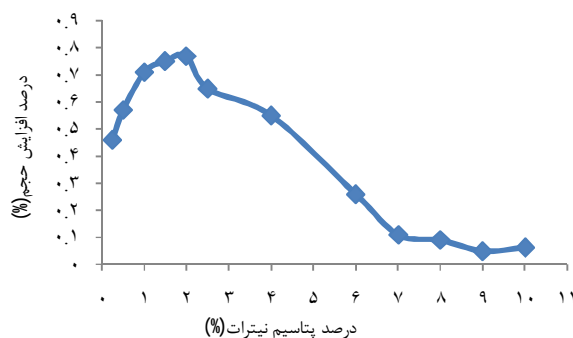
آزمون های ارزیابی خواص مکانیکی بر روی تمامی این نمونه ها انجام شده و نتایج آن در جدول 7 آمده است. از هر نمونه دو قطعه یکسان برش داده و آزمایش شد. با گرفتن میانگین از هر دو نمونه مربوط به یک فرمولاسیون شکل های (6-9) بدست آمد. با توجه به داده های جدول مشخص شد که در فرمولاسیون 101 که تنها از اکسیدکننده PSAN استفاده کرده است، مقدار تنش حداکثر بالاتری به دست آمد. همچنین این نمونه بالاترین مقدار کرنش را در نقطه شکست نشان داد که نشانگر بالا بودن استحکام این نمونه بود. از طرف دیگر با اضافه کردن آمونیوم پرکلرات به فرمولاسیون از مقدار تنش حداکثر کاسته شد و هرچه درصد آمونیوم پرکلرات بیشتر شد، این کاهش نیز بیشتر مشاهده گردید.

در شکل (6) مقدار تنش حداکثر³ برای سه پیشرانه ساخته شده با مقادیر مختلف آمونیوم پرکلرات، نشان داده شده است. مشاهده می شود زمانیکه تنها از اکسیدکننده آمونیوم نیترات استفاده می شود (عدم حضور آمونیوم پرکلرات)، بالاترین مقدار تنش حداکثر بدست می آید اما زمانیکه درصدی از آمونیوم نیترات با آمونیوم پرکلرات جایگزین می شود، مقدار تنش کاهش یافته و همچنین افزایش درصد آمونیوم پرکلرات نیز باعث کاهش بیشتر مقدار تنش می شود.

تغییر خاصی در کیفیت آمونیوم نیترات مشاهده نمی شود. اما با افزایش مقدار پتاسیم نیترات از 6% به تدریج کیفیت آمونیوم نیترات پایدار حاصل بهتر گردید و میزان افزایش حجم ناشی از تغییر فاز در آن کاهش یافت. با استفاده از پتاسیم نیترات در محدوده 7-10 درصد، آمونیوم نیترات فاز پایداری (PSAN) با کیفیت مناسب تولید گردید که مقدار بهینه آن 9% از پتاسیم نیترات می باشد (شکل 4) که نزدیک ترین مقدار را به درصد بدست آمده از مرجع 18 دارد.

جدول 6- درصد افزایش تغییرات حجمی IV-III آمونیوم نیترات بر حسب درصد پتاسیم نیترات.

درصد پتاسیم نیترات (%)	وضعیت ظاهری	درصد افزایش حجمی IV-III (%)
0/25	نامطلوب	0/46
0/5	نامطلوب	0/57
1	نامطلوب	0/71
1/5	نامطلوب	0/75
2	نامطلوب	0/77
2/5	نامطلوب	0/65
4	نامطلوب	0/55
6	نامطلوب	0/26
7	مناسب	0/11
8	مناسب	0/09
9	بهینه	0/05
10	مناسب	0/062



شکل 4- بهبود تغییرات حجمی آمونیوم نیترات پایدار شده با مقدار پتاسیم نیترات اضافه شده.

پس از تکمیل فرایند پخت، نمونه های تولید شده از قالب خارج شده و به منظور ارزیابی خواص مکانیکی، آزمون های تنش¹ و کرنش² بر روی آن ها انجام گرفت. متداول ترین تست برای خواص مکانیکی تست کشش تک محوری است که نمونه کششی جنف (JANNAF) نیز خوانده می -

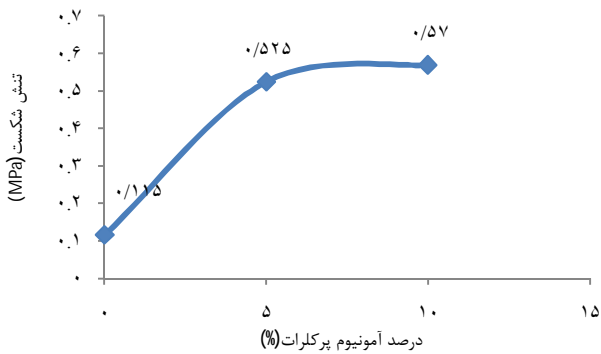
۳ - Maximum tensile stress

۱ - Stress

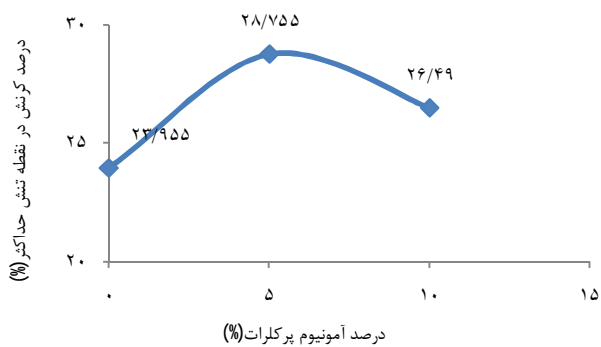
۲ - Strain

جدول 7- خواص مکانیکی مربوط به فرمولاسیون پیشرا نه‌های تولید شده.

نوع فرمولاسیون	شماره نمونه	تنش حداکثر (MPa) N/mm ²	تنش شکست (MPa) N/mm ²	درصد کرنش در نقطه شکست	درصد کرنش در نقطه حداکثر
101	1	0/76	0/10	51/56	22/53
	2	0/74	0/13	37/33	25/38
102	1	0/68	0/57	39/29	27/89
	2	0/66	0/48	38/98	29/62
103	1	0/66	0/56	34/42	27/11
	2	0/62	0/58	34/77	25/87

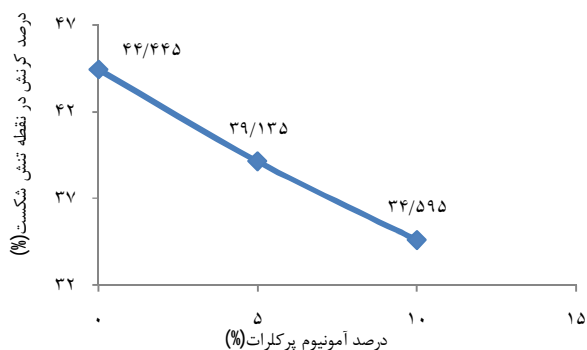


شکل 7- تغییرات تنش شکست پیشرا نه جامد بر حسب درصد وزنی آمونیم پرکلرات.

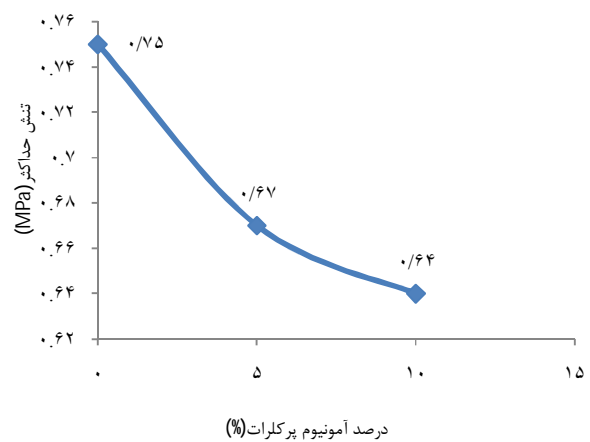


شکل 8- مقادیر درصد کرنش در نقطه تنش حداکثر بر حسب درصد وزنی آمونیم پرکلرات.

مقادیر درصد کرنش در نقطه شکست پیشرا نه‌های ساخته شده برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف آمونیم نیترات در شکل 9، ارائه شده است. نمونه 101 نسبت به دو نمونه دیگر در نقطه شکست کرنش بیشتری را تحمل می‌کند. هرچه درصد آمونیم پرکلرات موجود در نمونه بیشتر می‌شود، از درصد کرنش در نقطه شکست کاسته می‌شود یعنی نمونه زودتر می‌شکند که نشانگر ضعیف بودن خواص مکانیکی آن است.



شکل 9- مقادیر درصد کرنش در نقطه تنش شکست بر حسب درصد وزنی آمونیم پرکلرات.



شکل 6- تغییرات تنش حداکثر پیشرا نه جامد بر حسب درصد وزنی آمونیم پرکلرات.

مقادیر تنش شکست نیز برای سه پیشرا نه ساخته شده تعیین گردید (شکل 7). استفاده از درصدی آمونیم پرکلرات به جای آمونیم نیترات باعث افزایش میزان تنش شکست می‌شود. همچنین استفاده از درصدهای بالاتر آمونیم پرکلرات در فرمولاسیون، باعث می‌شود که مقدار تنش شکست نسبت به زمانی که تنها از آمونیم نیترات استفاده می‌شود، افزایش یابد. یعنی زمانی که از دو اکسیدکننده استفاده می‌شود، برای شکست نمونه مقدار تنش بیشتری لازم است. این پدیده می‌تواند به این دلیل باشد که عامل پیوندی اتصال مناسب‌تری بین آمونیم پرکلرات و بایندر به‌وجود آورده است.

تغییرات میزان کرنش در نقطه تنش حداکثر برای پیشرا نه‌های مختلف ساخته شده، در شکل (8) آورده شده است. مشاهده می‌شود که با اضافه کردن 5% آمونیم پرکلرات بجای آمونیم نیترات، کرنش در نقطه تنش حداکثر افزایش می‌یابد. افزودن مقادیر بیشتری از آمونیم پرکلرات به فرمولاسیون باعث کاهش کرنش می‌شود. فرمولاسیون 102، در نقطه تنش حداکثر، بیشترین مقدار کرنش را نشان می‌دهد.

جایگزینی آمونیوم پرکلرات به جای آمونیوم نیترات، باعث افزایش دمای گزهای حاصل از احتراق، ایمپالس ویژه و چگالی در پیشرانه‌ها می‌شود. آمونیوم پرکلرات به دلیل داشتن گرمای احتراق بالا، موجب افزایش دمای گزهای احتراق می‌شود بنابراین در مواقع استفاده در مولدهای گازی که به دمای پایین نیاز دارند، معمولاً همراه با یک عامل خنک-کننده (در این مورد گوانیدین نیترات)، استفاده می‌شود. همچنین این ماده به علت داشتن کلر، محصولات سمی و خورنده تولید می‌کند. از آنجاکه تعیین دمای گزهای حاصل از احتراق پیشرانه و همچنین میزان ترکیبات حاوی کلر آزاد شده ناشی از سوختن پیشرانه جامد، به راحتی امکانپذیر نمی‌باشد، این کار به کمک یک نرم‌افزار شبیه‌سازی انجام گرفت. به کمک این نرم افزار تأثیر جایگزین نمودن آمونیوم نیترات با مقادیر مختلفی از آمونیوم پرکلرات بر دمای گزهای احتراق، بررسی گردید (جدول 9).

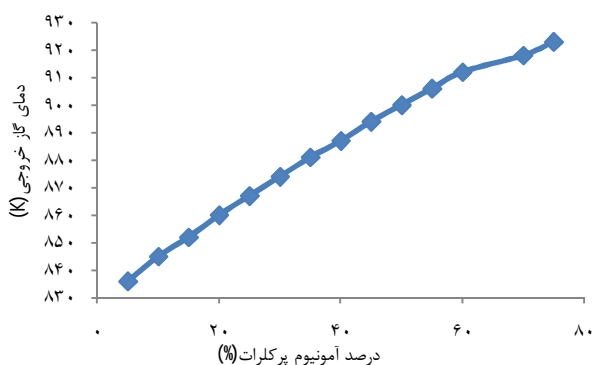
برای بررسی اثر آمونیوم پرکلرات بر روی سرعت سوزش پیشرانه مولد گاز، آزمون سرعت سوزش روی نمونه‌های 101 و 102 انجام شد که نتایج آن در جدول (8) آمده است. رایج‌ترین روش برای اندازه‌گیری سرعت سوزش، روش بمب کرافورد یا رشته سوزشی¹ است. رشته‌های پیشرانه توسط تیغه فولادی تیز با سطح مقطع برابر 5*5mm بریده می‌شوند و بمب دستگاه را به فشار مورد نظر می‌رساند. هر رشته‌ی پیشرانه با یک نوار الاستیک در تماس است. دستگاه با یک جفت لایه‌ی رزین اپوکسی به عنوان متوقف کننده احتراق احاطه می‌شود. در فواصل 50mm از رشته سوراخ زده می‌شود. سیم‌های سربی ذوب شده از این سوراخ‌ها عبور می‌کنند و سیم احتراق از جنس نیکروم است. فاصله طی شده بین سیم‌ها تقسیم بر زمان پیمودن این مسافت، سرعت سوزش را مشخص می‌کند. اثر جایگزینی 5% آمونیوم پرکلرات به جای آمونیوم نیترات و تأثیری که بر سرعت سوزش می‌گذارد، به خوبی مشخص است.

جدول 8- نتایج آزمون سرعت سوزش پیشرانه‌های تولید شده.

نوع فرمولاسیون	سرعت سوزش (mm/s)	فشار (bar)	دما (K)
101	1/524	70	298
102	2/045	70	298

جدول 9- دمای گزهای حاصل از احتراق پیشرانه جامد حاوی مقادیر مختلف آمونیوم پرکلرات.

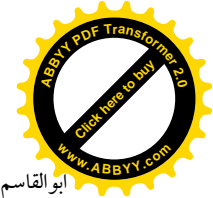
درصد آمونیوم پرکلرات	75	70	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
دمای گزهای خروجی (K)	923	918	912	906	900	894	887	881	874	867	860	852	845	836



شکل 10- افزایش دمای گزهای حاصل از احتراق با بالا رفتن میزان آمونیوم پرکلرات.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هرچه درصد آمونیوم پرکلرات افزایش می‌یابد، دمای گزهای حاصل از احتراق نیز بیشتر می‌شود (شکل 10). همچنین افزایش درصد آمونیوم پرکلرات باعث افزایش تولید ترکیبات حاوی کلر می‌شود. هنگامی که درصد آمونیوم پرکلرات پایین است، تمامی کلر آزاد شده با پتاسیم ترکیب شده و به پتاسیم کلراید تبدیل می‌شود. ولی زمانی که درصد آمونیوم پرکلرات بالاتر می‌رود، مقدار کمتری پتاسیم کلراید تولید می‌شود و بیشتر کلر آزاد شده به شکل گاز خورنده هیدروژن کلراید درمی‌آید. همچنین میزان ترکیبات کلردار در گزهای خروجی بر مبنای نتایج نرم‌افزار شبیه‌سازی، برای این پیشرانه‌ها در جدول (10) آمده است.

¹ - Strand burner



جدول 10- مقدار ترکیبات حاوی کلر آزاد شده ناشی از سوختن پیشرانده حاوی مقادیر مختلفاً آمونیوم پرکلرات.

میزان KCl (گرم)	میزان گاز HCl (گرم)	آمونیوم پرکلرات %
0	0	0
3/16	0	5
4/21	1/039	10
3/87	2/75	15
3/54	4/45	20
3/21	6/15	25
2/88	7/87	30
2/55	9/53	35
2/22	11/12	40
1/88	12/84	45
1/55	14/47	50
1/22	16/06	55
0/89	17/63	60
0/55	19/22	65
0/22	20/94	70

4- نتیجه گیری

برای پایداری سازی فازی آمونیوم نیترات می توان از پتاسیم نیترات با مقدار بهینه 9% برای تولید IPSAN استفاده کرد و برای بهبود خواص سوزشی پیشرانده های مبتنی بر آمونیوم نیترات، می توان از ترکیبات حاوی کروم استفاده نمود. فرمولاسیون های ساخته شده از آمونیوم نیترات فاز پایدار، خواص مکانیکی و سوزشی مناسبی نشان می دهند. نتایج حاصل از آزمون های خواص مکانیکی و سرعت سوزش نشان می دهد که فرمولاسیون با آمونیوم نیترات فاز پایدار خواص بهتری داشته و دمای گازهای حاصل از احتراق هم مطلوب می باشد. نمونه های دارای آمونیوم پرکلرات علاوه بر داشتن دمای بالاتر، به علت آزاد شدن گاز هیدروژن کلراید سمی و خورنده هستند.

مراجع

[5] Richards, R. J. "Solid Propellant Cool Gas Generating Systems"; Safe Engineering. August/September., Paper presented to 77th Flight Safety, Survival and Personnel Equipment, 1970.

[6] Alkam, M. K.; Butler, P. B. "Thermal Simulation of a Pyrotechnic Solid-Propellant Gas Generator"; Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering 2009, 3, 198-205.

[7] Engelen, K.; Lefebvre, M. H. "Properties of Gas Generating Mixtures Related to Different Fuel and Oxidizer Compositions"; Propell., Explos., Pyrotechnic. 2003, 28, 201-209.

[8] Engelen, K.; Lefebvre, M. H.; Hubin, A. "Properties of a Gas Generating Composition Related to Particle Size of the Oxidizers"; Propell., Explos., Pyrotechnic. 2002, 27, 290-299.

[9] تیموری مفرد، رضا؛ حسن زاده، پریسا؛ ابریشمی، فاطمه و نوروزی، مهدی "معرفی انواع اکسیدکننده، پایندروسا، ایرافزودنی همدار فرمولاسیون مولدهای گاز، پنجمین همایش سراسری مواد منفجره، پیروتکنیک و پیشرانده، صفحه 655-641، اسفند 1386.

[10] Krowicki, K.; Syczewski, M. "Solid Rocket Propellants"; AD-823225, 1967.

[11] Simões, P. N.; Pedroso, L. M.; Portugal, A. A.; Compos, J. L. "Study of the Decomposition of Phase Stabilized Ammonium Nitrate (PSAN) by Simultaneous Thermal Analysis: Determination of Kinetic Parameters"; J. Thermochim. Acta 1998, 319, 55-65.

[12] Sutton, G. P. "Rocket Propulsion Elements"; 5th ed, New York, Wiley, 1986, 296.

[13] Zaheer, U.; Malik, A. Q. "Thermal and Kinetic Studies of Ammonium Nitrate and the Effect of Addition of Potassium Nitrate Employing Simultaneous Thermal Analysis Technique"; School of Chemical and Materials Engineering, Pakistan, 2011, 227-233.

[14] Wei, Y.; Cal, B. "Study on Modified Ammonium Nitrate and Stability"; Youth Innovation Fund Projects of Explosives & Propellants, Grant No.HZY 08020201-5, 2011, 340-343.

[15] Carvalheira, P. "Calculation of the Equilibrium Thermodynamic Properties of the Isobaric Adiabatic Combustion Products of AN/HTPB-IPDI Propellants at 7.0 MPa"; 26th International Annual Conference of ICT, 1995, 27(1)-27(14).

[16] Carvalheira, P.; Campos, J.; Gadiot, G. M. H. J. L. "Burning Rate Modifiers for AN/HTPB-IPDI Composite Solid Propellants for Gas Generators"; 26th International Annual Conference of ICT, 1995, 69(1)-69(14).

[17] Oommen, C.; Jain, S. R. "Ammonium Nitrate: a Promising Rocket Propellant Oxidizer"; J. Hazard. Mat. 1999, A67, 253-281.

[18] Kiiski, H. "Properties of Ammonium Nitrate Based Fertilisers"; Dissertation for the Degree of Doctor Philosophiae, University of Helsinki, for Public Criticism in the Auditorium D101 of the Department of Physics (A. I. Virtasen aukio 1), on the 28th October, 2009, 27.

[19] Strecker, R. A. H.; Linde, D. "Gas Generator Propellants For Air-to-Air Missiles"; Gesellschaft Fuer Flugchemische Antriebe mbH, 8261ASCHAO, 1978, 17(1)-17(11).

[20] Yuping, C.; Zicheng, T.; Youxin, D.; Zhi, F. "Smokeless, Lower Flame Temperature Glycidyle Azide Poltmer/Ammonium Nitrate Gas Generator Propellant"; Redstar Institute of Chemistry, Xiangfan 441002, Hubei, China, 1986, 235-241.

[21] Knowlton, G. D.; Ludwig, C. P.; Haun, D. "Gas Generating Compositions"; US Patent 5,078,076A, 1998.

[22] Kelley, F. N. "Solid Propellant Mechanical Properties Testing, Failure Criteria, and Aging"; Air Force Rocket Propulsion Laboratory, Edwards, Calif., Advances in Chemistry; American Chemical Society: Washington, DC, 1969.

[1] صیامی زاده، محمودرضا؛ زنجیریان، ابراهیم و محمد زمانی، قدرت الله "طراحی فرمولاسیون سوخت جامد مرکب (composite) برای یک سیستم گاز زئراتور (gas generator)"، سومین همایش سراسری مواد منفجره، پیروتکنیک و پیشرانده، صفحه 207-201، 1383.

[2] تیموری مفرد، رضا؛ حسن زاده، پریسا؛ ابریشمی، فاطمه و ذری، محمدعلی "مولدهای گاز و کاربردهای آن ها"، پنجمین همایش سراسری مواد منفجره، پیروتکنیک و پیشرانده، صفحه 1038-1025، اسفند 1386.

[3] Corns, M.; Gordon, P. C.; Christiansson, T. "Method and Device for Inflating Inflatable Structures"; GB Patent 2,034,622, 2000.

[4] Davenas, A. "Solid Rocket Propulsion Technology"; Technology and Research Director, SNPE: France, pp 351-354, 2000.

