

## بررسی تجربی نسبت اکسید کننده به سوخت در سوخت جامد KnSu

مصطفی اردشیری<sup>۱\*</sup>، محمد حسن جوارشکیان<sup>۲</sup>،

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی

(مصطفی اردشیری: mostafaardeshiry@yahoo.com)

### چکیده

در این تحقیق اثر نسبت سوخت به اکسید کننده در ماده پیشران KnSu به طور تجربی و عددی بررسی گردیده است. در روش تجربی به ازای نسبت های مختلفی از سوخت و اکسید کننده، نرخ سوختن اندازه گیری شده است. پس از بدست آوردن بهترین نقطه در روش تجربی آنالیز گونه ها بر اساس این نقطه توسط یک روش عددی انجام شده است. در روش عددی از معادلات بقای جرم، آنتالپی و معادلات تعادلی جزئیات دمای احتراق، تغییر فشار و اثرات آب باقی مانده در سوخت محاسبه گردیده است.

واژه های کلیدی: دمای آدیاباتیک شعله - نسبت سوخت به اکسید کننده - نرخ سوختن - KnSu

### ۱- مقدمه

امروزه علم طراحی موشک یکی از دانش های مهم و استراتژیک می باشد. برای طراحی یک موشک پارامترهای زیادی باید مورد بررسی قرار گیرد. یکی از مهم ترین این پارامترها سوخت موشک می باشد که وظیفه تولید نیروی پیشران را بر عهده دارد. سوخت یک موشک از جنبه های مختلفی مانند نرخ سوختن، نوع محصولات احتراق، دمای محصولات احتراق، چگالی، و... مورد بررسی قرار می گیرد. در این مقاله صرفا به بررسی پارامترهای مهم در انتخاب درصد اکسید کننده موجود در یک نوع سوخت جامد مشخص پرداخته شده است به طوری که کاربران این سوخت بتوانند به کمکاطلاعات و نمودارهای ارائه شده بهترین درصد اکسید کننده را در شرایط کاری مختلف انتخاب کنند.

یکی از مهم ترین عوامل تاثیر گذار در انتخاب درصد ترکیب اجزاء یک سوخت، نرخ سوختن آن می باشد. نرخ سوختن ( $\dot{r}$ ) بر اساس دو متغیر بررسی می شود [۱]:

- نمودار نرخ سوختن به درصد اکسید کننده که یکی از متغیرهای مورد نیاز برای انتخاب بهترین درصد اکسید کننده موجود در سوخت می باشد.
- نمودار نرخ سوختن به فشار که برای مرتبط کردن سطح سوختن سوخت و فشار محفظه احتراق استفاده می شود.

ریچارد ناکا [۲] در سال ۲۰۰۱ میلادی برای سوخت ۶۵٪ نمودار نرخ سوختن بر اساس فشار را به کمک آزمایش بدست آورد. افراد مختلف دیگری نیز این نمودار را بدست آورده اند اما دلیل قابل قبولی برای انتخاب سوخت ۶۵٪ ارائه نکرده اند.

### ۲- روش تجربی برای بدست آوردن نرخ سوختن:

تا کنون هیچ رابطه تئوری برای محاسبه نرخ سوختن در سوخت های جامد ارائه نشده است [۱] بنابراین تنها به روش عددی می توان این پارامتر مهم را بدست آورد. در این آزمایش نرخ سوختن سوخت بر اساس درصد

<sup>۱</sup>- دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی دانشگاه فردوسی مشهد

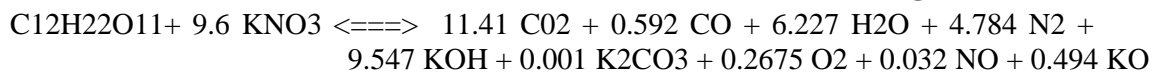
<sup>۲</sup>- دانشیار گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد



اکسید کننده بدست آمده است. این نمودار در کنار نمودار دمای احتراق به درصد اکسید کننده، قیمت مواد اولیه و دیگر مواردی که برای سازنده ممکن است مهم باشد به او برای انتخاب درصد اکسید کننده موجود در سوخت کمک می کند.

## ۱-۲- معرفی سوخت (Caramel Candy Propellant) KnSu

به علت مزایای زیادی که سوخت KnSu دارد یکی از شناخته شده ترین سوخت های جامد میباشد. از مزایای این سوخت می توان به در دسترس بودن مواد اولیه، مراحل ساخت نسبتا آسان، ارزان بودن و بی خطر بودن اشاره کرد. این سوخت از دو جزء اصلی شکر (C12H22O11) و نیترات پتاسیم (KNO3) ساخته شده است که شکر نقش سوخت، و نیترات پتاسیم نقش اکسید کننده را ایفا می کند، بنابراین برای سوختن نیازی به اکسیژن موجود در هوا ندارد. این واکنش در شرایط استاندارد به صورت زیر می باشد:



توجه شود که در معادله بالا از بعضی محصولات احتراق به علت ناچیز بودن، صرف نظر شده است.

## ۲-۲- روش های تولید:

۱) پودر خشک: در این روش شکر و نیترات پتاسیم به طور مجزا تا حد ممکن ساییده و سپس با یکدیگر مخلوط می شوند، مخلوط تهیه شده برای استفاده آماده است.

۲) ذوب خشک: به پودر تهیه شده در روش اول حرارت داده می شود تا جایی که شکر موجود در آن ذوب شود و سپس سیال بدست آمده را به شکل دلخواه قالب گیری می نماییم. دقت شود که نیترات پتاسیم موجود ذوب نمی شود بنابراین گرانروی سیال به درصد شکر موجود در آن و میزان ساییده شدن نیترات پتاسیم بستگی دارد که هرچه بیشتر باشد سیال روان تر و قالب گیری آن ساده تر است.

۳) ذوب تر: در این روش شکر و نیترات پتاسیم ابتدا در آب حل شده و سپس حرارت می بیند تا آب موجود در آن بخار شده و شکر ذوب شود. برتری این روش نسبت به روش قبل عدم نیاز به ساییدن شکر و نیترات پتاسیم است. همچنین به علت ذوب شدن اجزاء سوخت در آب، ذرات شکر و نیترات پتاسیم به طور همگن تری در کنار هم قرار می گیرند.

در نهایت روش سوم برای تولید سوخت انتخاب شد، مزیت های مهمی که باعث این انتخاب شدند عبارت اند از:

- همگن بودن سوخت: به علت اینکه شکر و نیترات پتاسیم در آب حل می شوند سوخت بدست آمده بسیار همگناست و با توجه به اینکه در سوخت های مرکب، قرار گرفتن اجزاء سوخت به صورت همگن، تاثیر زیادی در کیفیت سوخت دارد روش سوم بر دو روش دیگر برتریدارد.

- آسان تر بودن تولید: این روش نیازی به ساییدن اجزاء سوخت ندارد.

اما معایبی که این روش دارد:

- باقی ماندن مقداری آب درون سوخت که منجر به کاهش دمای احتراق می شود.
- سوخت بدست آمده از گرانروی کمتری برخوردار است و قالب گیری آن دشوار میباشد.
- سقف درصد نیترات پتاسیم موجود در سوخت به ۶۸٪ محدود می شود.

## ۳-۲- درصد ترکیب اجزاء سوخت:

در این مقاله ترکیب اجزاء سوخت توسط درصد جرمی اکسید کننده در کل سوخت بیان می شود به عنوان مثال سوخت ۶۰٪ به این معنی است که ۶۰٪ کل جرم سوخت را نیترات پتاسیم تشکیل می دهد. متداول ترین

ترکیب مورد استفاده در کاربرد های موشکی برای این نوع سوخت، ۶۵٪ می باشد. معمولاً سوخت های کمتر از ۶۰٪ به عنوان سوخت موشک استفاده نمی شوند چرا که اکسیژن به قدری کم است که ذرات کربن به صورت نسوخته خارج می شوند و بر کیفیت محصولات احتراق اثر منفی می گذارند. سقف محدوده تولید سوخت در فرآیند ذوب تر به ۶۸٪ محدود می شود چرا که در ترکیب های بیشتر از ۶۸٪، سوخت قبل از ذوب شدن تجزیه خواهد شد. اما در فرآیند ذوب خشک حتی می توان سوخت ۷۵٪ تهیه کرد. در مجموع برای کاربرد های موشکی سوختی بین ۶۰٪ تا ۷۰٪ استفاده می شود زیرا سوخت های پایین تر از ۶۰٪، ذرات کربن نسوخته خواهند داشت و در سوخت های بالای ۷۰٪، نیترات پتاسیم به صورت قطرات مذاب وجود خواهد داشت که هر دوی این موارد باعث کاهش کیفیت محصولات احتراق خواهد شد.

#### ۲-۴- شرح آزمایش:

برای بدست آوردن نرخ سوختن، ابتدا میله های سوختی (شکل ۱) متعددی با درصد اکسیدکننده های متفاوت از طریق فرآیند ذوب تر، تهیه و سپس اندازه گذاری شدند. میله های اندازه گذاری شده مشتعل شده و زمان سوختن آنها اندازه گیری شد، به کمک داده های تهیه شده نرخ سوختن محاسبه شد.



شکل ۱- یک میله سوخت

یکی از نکات مهم، تهیه میله های سوختی به نحوی بود که حباب و ترک خوردگی درون آنها وجود نداشته باشد. میله های سوختی مانند تمامی قطعاتی که از مواد مذاب تولید می شوند با مشکل وجود حباب های هوا مواجه هستند این حباب ها به علت نفوذ شعله به درون آنها باعث افزایش غیر واقعی نرخ سوختن می شوند. برای رفع شدن این خطا طول نمونه نسبتاً بزرگ در نظر گرفته می شود به عنوان مثال اگر به علت وجود این حفره ها، نمونه ای ۱۰ سانتی متری ۲ ثانیه سریع تر بسوزد خطای ایجاد شده ۰.۰۲ mm/s خواهد بود که با توجه به نرخ سوختن واقعی که چیزی در حدود ۲.۶ mm/s است تاثیری نخواهد داشت. به عنوان مثال در نرخ سوختن دو نمونه ی ۶۳٪ تنها ۰.۹ درصد اختلاف وجود دارد. وجود این حباب ها و ترک خوردگی ها باعث افزایش نرخ سوختن شده و از دقت داده های به دست آمده می کاهد.

#### ۲-۵- روش آزمایش:

ابتدا میله های سوختی را با ترکیب های ۶۰٪، ۶۳٪، ۶۵٪ و ۶۶.۷٪ آماده شد. سپس تمامی آنها را اندازه گذاری شدند تا بتوان نرخ سوختن را بدست آورد. بعد از آماده سازی نمونه ها آنها را در محیط باز و ایمن محترق نموده و از احتراق آنها فیلم برداری کردیم. به کمک بازبینی دقیق فیلم ها زمان احتراق بدست آمد و نرخ سوختن محاسبه شد. ابتدا قرار بود برای هر کدام از ترکیب های انتخاب شده پنج آزمایش انجام شود و از میانگین آنها استفاده شود اما به علت اینکه میله های سوختی با دقت

بسیار زیادی تهیه شده بودند و اکثر عوامل خطا حذف شده بودند اختلاف ناچیزی بین دو آزمایش در سوخت های ۶۰٪ و ۶۳٪ مشاهده شد که این امر باعث شد تا از تعداد آزمایش ها بکاهیم. جدول (۱) داده های بدست آمده از آزمایش را نشان می دهد.

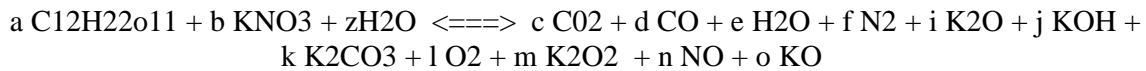
جدول ۱- داده های آزمایش نرخ سوختن

نرخ سوختن (mm/s)	زمان احتراق (s)	طول نمونه (mm)	درصد اکسید کننده
۲.۵۲۹	۳۹.۵۳۳	۱۰۰	۶۰
۲.۵۲۱	۳۹.۶۶۶	۱۰۰	۶۰
۲.۷۱۲	۳۶.۸۶۶	۱۰۰	۶۳
۲.۷۳۷	۳۶.۵۳۳	۱۰۰	۶۳
۲.۷۵۲	۲۹.۶۶۶	۸۰	۶۵
۲.۶۸۵	۲۶.۶۶۶	۷۰	۶۶.۷

### ۳- روش عددی در محاسبه پارامترهای احتراق:

روشهای مختلفی برای بدست آوردن دمای شعله وجود دارد، در این مقاله برای بدست آوردن دمای شعله، از آنتالپی تشکیل و برای بدست آوردن تعادل شیمیایی در محصولات از انرژی آزاد گیبس استفاده شد [۳]. با توجه به اینکه دمای شعله به درصد مولی محصولات احتراق و تنوع آنها بستگی دارد و محصولات احتراق نیز به دمای شعله مرتبط اند، از دو مجموعه معادله به صورت موازی برای حل استفاده شد به این ترتیب که به وسیله انرژی آزاد گیبس و با استفاده از یک دمای فرضی، محصولات احتراق محاسبه می شوند و سپس با برابر قرار دادن آنتالپی محصولات احتراق و آنتالپی واکنش دهنده ها دمای احتراق جدید بدست می آید. آنقدر این حلقه تکرار می شود تا به دمای شعله صحیح برسیم.

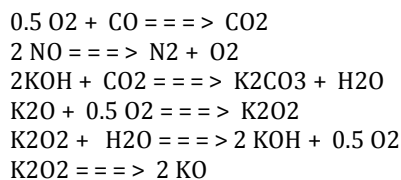
واکنش احتراق به صورت زیر در نظر گرفته شده است:



به علت اینکه بیشینه دمای احتراق در حدود  $2200k$  می باشد، از یونیزه شدن محصولات احتراق ( $H, O, OH$ ) صرف نظر شده است. با توجه به اینکه از روش ((ذوب تر)) استفاده شده است مقداری آب در سمت چپ معادله پیش بینی شده است تا حل به شرایط واقعی نزدیک تر شود.

متغیرهای  $a, b, z$  و ورودی های مسئله و متغیرهای دیگر مجهولات می باشند. با توجه به اینکه پنج عنصر در معادله وجود دارند، می توان پنج معادله بر اساس بقای اتم ها در واکنش شیمیایی نوشت. بنابراین به شش معادله تعادلی دیگر نیاز است. این معادلات تعادلی اضافی بر اساس شش واکنش تعادلی انتخابی بدست می آیند.

واکنش های تعادلی عبارت اند از:



انرژی آزاد گیبس بر اساس روابط ماکسول محاسبه شده [4] و به صورت زیر بیان می شود:

$$G = H - T \times s \quad (1)$$

حال با نوشتن معادلات تعادل انرژی گیبس مربوط به واکنش های بالا شش معادله دیگر به دست می آید که برای بدست آوردن ضرایب محصولات احتراق کافی می باشد. بر اساس این محاسبات نمودار های مختلفی رسم شده است که در بخش نتایج ارائه شده است. در ادامه معادلات مربوط به واکنش تعادلی NO را می نویسیم.

معادله (۲) اختلاف انرژی آزاد گیبس در دو طرف واکنش تعادلی NO را محاسبه می کند.

$$\Delta G_{T^0} = G_{T^0}^{NO} - 2 \times G_{T^0}^{NO} \quad (2)$$

معادله (۳) اختلاف انرژی آزاد گیبس بدست آمده را با دمای شعله و ثابت تعادل مرتبط می کند.

$$\Delta G_{T^0} = -R \times T \times \ln K_1 \quad (3)$$

معادله (۴) ثابت تعادل را بیان می کند. عبارت  $y$  در این معادله بیانگر کسر مولی عنصر مربوطه در محصولات احتراق می باشد که باید به توان ضریب همان عنصر در واکنش تعادلی برسد. به علت اینکه تعداد مول های گازی در دو سمت واکنش تعادلی برابر است توان  $P$  (فشار احتراق) صفر شده است.

$$K_2 = \frac{y_{O_2}^{1/2} y_{N_2}^1}{y_{NO}^2} \times P^0 \quad (4)$$

معادلات (۲) تا (۴) یک رابطه جدید بین مقادیر  $O_2$ ،  $N_2$  و  $NO$  را به ما می دهند. با نوشتن این معادلات برای دیگر واکنش های تعادلی تعداد معادلات مورد نظر برای بدست آوردن محصولات احتراق کافی می باشد. توجه شود که مقادیر موجود در سمت راست معادله (۲) در جداول ترمودینامیکی (JANAF) موجود می باشد. [5] همان طور که مشاهده می شود برای حل معادله (۳) به دمای شعله نیاز داریم. بنابراین با حدس زدن دمای شعله، محصولات احتراق را محاسبه می کنیم.

حال باید دمای شعله ای را که حدس زدیم اصلاح کنیم. بدین منظور محصولات احتراق بدست آمده از معادلات قبل را درون معادلات (۵) تا (۷) قرار می دهیم. معادله (۵) مجموع انتالپی واکنش دهنده ها و معادله (۶) مجموع انتالپی محصولات احتراق را نشان می دهد. توجه شود که  $h$  برابر است با مجموع انتالپی تشکیل و انحراف انتالپی از دمای مرجع ( $h_f^0 = h_f^0 + \Delta h_f^0$ ) با برابر قرار دادن این دو مقدار و پس از انجام دادن سعی و خطا، دمای شعله جدید بدست می آید.

$$HR = a \times h_{C_{12}H_{22}O_{11}} + b \times h_{KNO_3} + z \times h_{H_2O} \quad (5)$$

$$HP = c \times h_{CO_2} + d \times h_{CO} + e \times h_{H_2O} + f \times h_{N_2} + i \times h_{K_2O} + j \times h_{KOH} + k \times h_{K_2CO_3} + l \times h_{O_2} + m \times h_{K_2O_2} + n \times h_{NO} + o \times h_{KO} \quad (6)$$

$$HP = HR \quad (7)$$

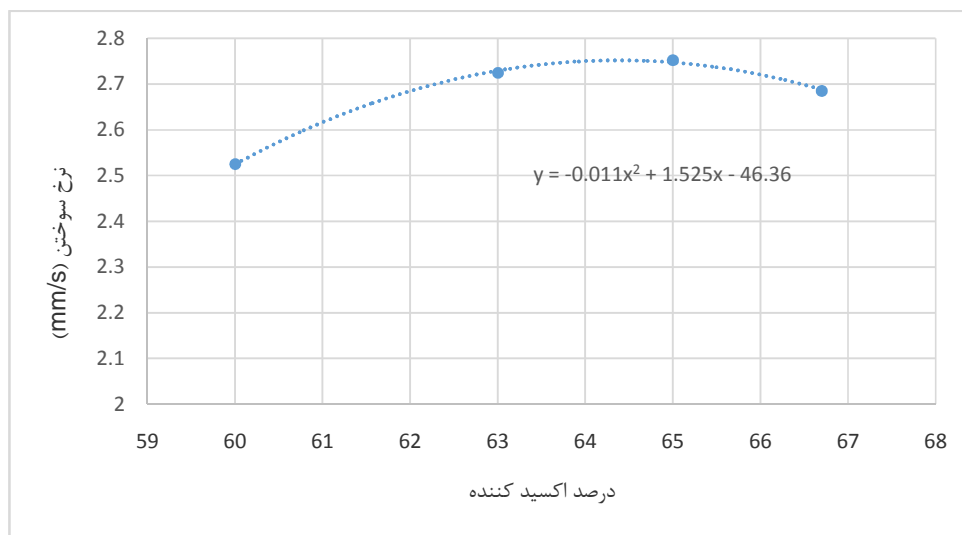
محصولات احتراقی که با دمای شعله حدسی محاسبه شدند و همچنین دمای شعله محاسبه شده از سه معادله بالا باید تصحیح شوند بنابراین دمای شعله جدید را درون معادلات (۲) تا (۴) قرار داده و محصولات احتراق را دوباره محاسبه می کنیم. باید آنقدر حل را تکرار کرد تا با دقت قابل قبولی به جواب صحیح نزدیک شویم.

#### ۴- نتایج:

با توجه به اینکه هدف اصلی از این پروژه بدست آوردن اطلاعاتی برای انتخاب درصد اکسید کننده موجود در پیشرانۀ KnSu می باشد، در این مقاله ترکیب مشخصی از سوخت پیشنهاد نخواهد شد و به ارائه نتایج بدست آمده اکتفا می شود.

#### ۴-۱- نرخ سوختن به درصد اکسید کننده:

نمودار زیر که بر اساس آزمایش بدست آمده است مشخص می کند که در روش ذوب تر بیشترین نرخ سوختن در سوختی با ترکیب ۶۴.۱۱٪ رخ می دهد.



نمودار ۱- نرخ سوختن به درصد اکسید کننده

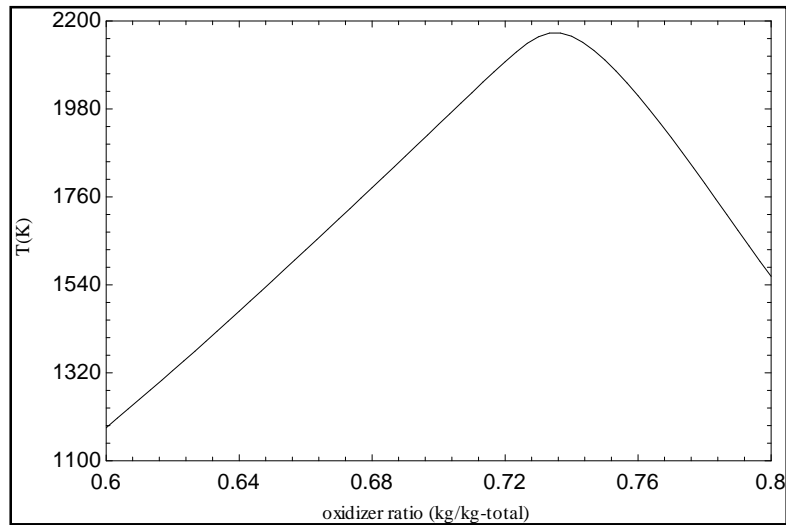
معادله خط گذرنده از نقاط آزمایش به صورت زیر است:

$$y = -0.0119x^2 + 1.5258x - 46.362 \quad (2)$$

براساس معادله بالا می توان دریافت که اوج نمودار در نقطه ۶۴.۱۱٪ خواهد بود که سوخت در این نقطه بیشترین نرخ سوختن را خواهد داشت. توجه شود که نرخ سوختن در این پیشران بسیار حساس است و این نتایج وابستگی زیادی به مراحل تولید و خلوص مواد اولیه دارند. ریچارد ناکا تاثیر وجود ناخالصی در نیترات پتاسیم را بررسی نموده است. [6] وی همچنین راهکاری عملی بر اساس حلالیت نیترات پتاسیم در آب جهت افزایش خلوص آن ارائه کرده [7] که به علت اطاله کلام به آنها نمی پردازیم.

۴-۲- تغییرات دمای شعله بر اساس درصد اکسید کننده:

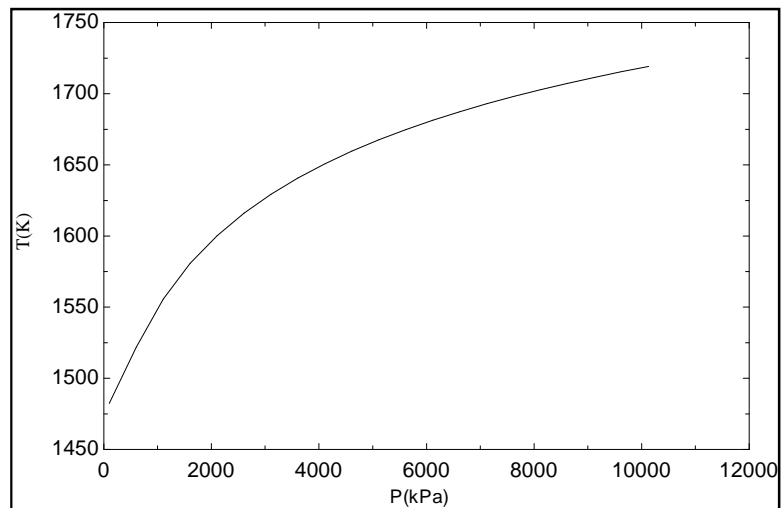
نمودار ۲ بیان می کند که بیشینه دمای آدیاباتیک شعله در سوخت ۷۳٪ می باشد. همانطور که مشاهده می شود هر چه از این نقطه فاصله می گیریم دما کاهش پیدا می کند.



نمودار ۲- تغییرات دما بر اساس درصد اکسید کننده سوخت (در فشار اتمسفر و بدون آب اضافی)

تاثیر دما بر روی سوخت به صورت افزایش سرعت صوت در محصولات احتراق عبور کننده از نازل نمود پیدا می کند، که باعث افزایش نیروی پیشران می شود.

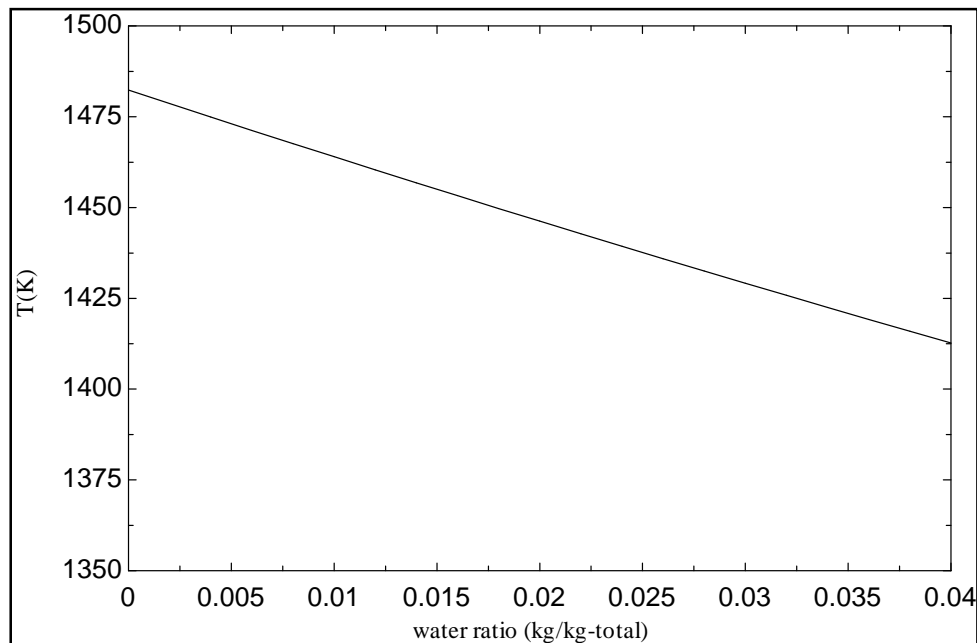
۴-۳- تغییرات دما بر اساس فشار احتراق



نمودار ۳- دمای احتراق به فشار (سوخت ۶۴٪ بدون آب اضافی)

نمودار ۳ به روشنی بیان می کند که با افزایش فشار، دمای آدیاباتیک شعله نیز افزایش می یابد. یک رابطه تعادلی بین فشار و دما وجود دارد، به این صورت که با افزایش فشار، واکنش های تعادلی به سمتی پیش می روند که تعداد مولهای گازی کمتر باشد. به عبارت دیگر، ملکول های گازی بزرگتر و یا محصولات جامد به وجود آید. یعنی افزایش فشار، تجزیه تعادلی ملکول های بزرگ را کاهش می دهد و باعث افزایش دمای واکنش می شود.

#### ۴-۴- تاثیر وجود آب اضافی در سوخت بر روی دمای احتراق:

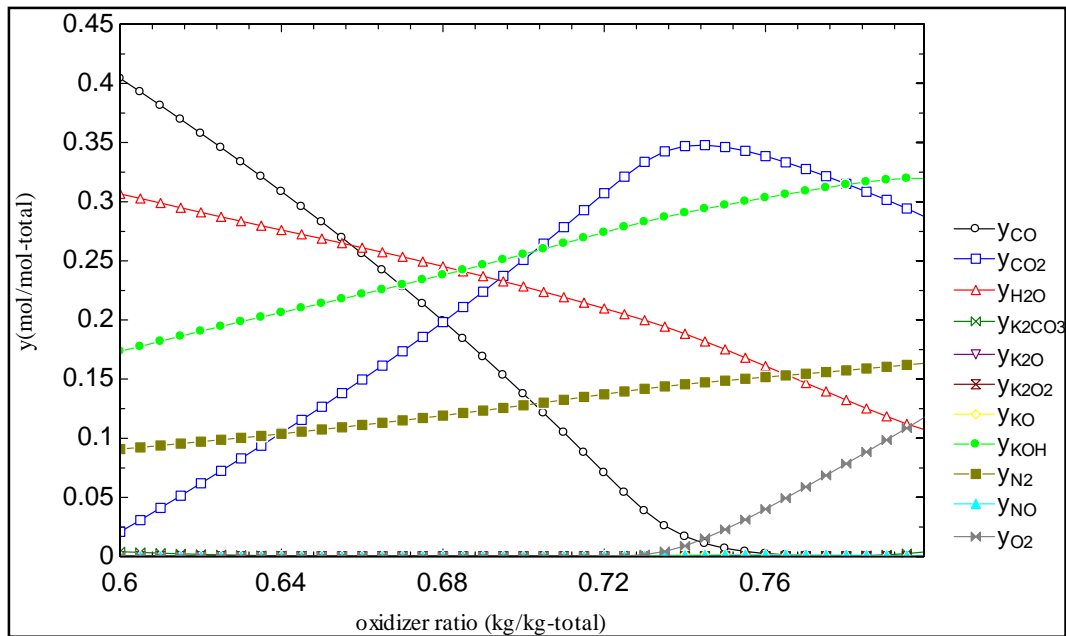


نمودار ۴: تغییرات دمای محصولات احتراق بر اساس آب اضافی (سوخت ۶۴٪ در فشار اتمسفر)

همان طور که انتظار می رود با افزایش آب موجود در سوخت دمای شعله به مقدار ناچیزی کاهش پیدا می کند. توجه شود که اگر در سوخت بالای ۳٪ آب موجود باشد احتراق ناپایدار خواهد بود و به طور ناگهانی قطع می شود.



۴-۵- تغییرات محصولات احتراق بر اساس درصد اکسید کننده سوخت:



نمودار ۵- تغییرات نسبت مولی اجزاء محصولات احتراق بر اساس درصد اکسید کننده سوخت

با افزایش درصد اکسید کننده، به علت افزایش اکسیژن، CO کاهش می یابد و به جای آن CO<sub>2</sub> تولید می شود. CO<sub>2</sub> نیز هنگامی که درصد اکسید کننده از ۷۴٪ فراتر می رود به علت کاهش اکسید شونده موجود در واکنش کاهش می یابد دلیل کاهش مولکول های آب نیز همین امر می باشد. به علت اینکه اتم های پتاسیم و نیتروژن درون ملکول های اکسید کننده می باشند با افزایش اکسید کننده موجود در سوخت N<sub>2</sub> و KOH افزایش پیدا می کنند.

۵- نتیجه گیری:

- بیشترین نرخ سوختن در سوخت ۶۴.۱۱٪ رخ می دهد.
- بیشترین دمای احتراق مربوط به سوخت ۷۳.۴۵٪ می باشد.
- بهترین روش برای تولید سوخت بین ۶۰٪ و ۶۵٪ روش ذوب تر می باشد.
- در صورت نیاز به سوخت های بالای ۶۵٪ بهتر است از روش ذوب خشک استفاده شود.

با توجه به این که هدف از انجام این پروژه بدست آوردن پارامتر های مهم برای انتخاب درصد اکسید کننده سوخت می باشد از انتخاب یک ترکیب مشخص برای سوخت خودداری شده و انتخاب بهترین ترکیب بر عهده خود کاربران می باشد، چرا که ترکیب سوخت بسته به شرایط کاربری مختلف متفاوت خواهد بود.



## پنجمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - بهمن ماه ۱۳۹۲



مراجع:

- 1- Sutton, G.P., Biblarz, O., *Rocket Propulsion Elements*, 7th Edition.
- 2- Nakka, R.[2001], *Strand Burner for Burn Rate Measurements*[online], Available from: <http://www.nakka-rocketry.net/staburn.html>.
- 3- Glassman, I., *Combustion*, 3<sup>rd</sup> edition, Academic press, pp. 15-20, 1996.
- 4- Van Wylen, G.J., *Fundamentals of Thermodynamics*, 6<sup>th</sup> edition, pp. 516-519.
- 5- Glassman, I., *Combustion*, 3<sup>rd</sup> edition, Academic press, pp. 489-546, 1996.
- 6- Nakka, R.[2001], *Purification of Low-grade Potassium Nitrate*[online], Available from: <http://www.nakka-rocketry.net/knpurify.html>.
- 7- Nakka, R.[2001], *Effect of Potassium Nitrate Grade on Propellant Performance*[online], Available from: <http://www.nakka-rocketry.net/kn-exp.html> .