

# مدل سازی سرعت سوزش فرسایشی سوخت جامد مرکب بر پایه HTPB

رامین بدرنژاد<sup>۱</sup>؛ فریبرز رشیدی<sup>ii</sup>

## چکیده

در این مقاله اثرات سوزش فرسایشی سوخت جامد در موتور نمونه کوچک با استفاده از روش قطع سوزش بررسی شده است. موتور طراحی شده شامل سه عدد سوخت استوانه‌ای درون سوز- برون سوز در قسمت موتور با نسبت  $L/D$  برابر ۵ و یک عدد سوخت استوانه‌ای درون سوز - دوسر سوز در محفظه تست است. سوزش فرسایشی برای سه فشار کاری و فلاکس جرمی که در پورت اتفاق می افتد بررسی می شود. در این تحقیق یک معادله؛ که اثرات فلاکس جرمی، نرخ سوزش، فشار محفظه احتراق و ابعاد موتور در آن لحاظ شده است، ارائه و پارامترهای معادله با نتایج آزمایشگاهی تست موتور نمونه کوچک تعیین می شود و در نتیجه یک معادله کاربردی در طراحی گرین به دست می آید.

## کلمات کلیدی

سوزش فرسایشی، سوخت جامد، مدلسازی، شبیه سازی عددی

## *Modeling of Solid Propellant Erosive Burning in HTPB Propellants*

R.Badrnezhad ; F.Rashidi

### ABSTRACT

The effects of erosive burning of solid propellant in a prototype motor have been investigated through "Interrupt Burning" method. The motor is composed of three internal - external combustion cylindrical propellant in motor section with the  $L/D$  ratio of 5 and one two-ended internal combustion cylindrical propellant in test section. Erosive burning will be examined taking into consideration of three working pressures and mass flux that occurred in the port. In this paper, a new equation will be introduced in which the effects of mass flux, burning rate, combustion chamber pressure and motor dimensions are included. The prototype motor will be tested and then the obtained results will be used to determine the parameters of the proposed. Therefore an applicable equation in grain designing will be obtained.

### KEYWORDS

Erosive burning-Solid Propellant-Modeling-Numerical Simulation.

عملکرد موتور با سوزش فرسایشی است. در اکثر فازهای

طراحی موتورهای سوخت جامد مرکب، داده‌های نرخ سوزش

بمب کرافورد و موتور استاندارد سودمند هستند. رفتار

احتراقی سوخت جامد مرکب در اثر عبور جریان تا حدودی

ناشناخته است. در بمب کرافورد فشار محفظه با استفاده از

### ۱- مقدمه

توسعه مدل های سوزش فرسایشی برای اهداف بالستیک داخلی از سال ۱۹۵۰ آغاز شده است. هدف اولیه این مدل‌ها پیش بینی بهتر و شبیه سازی فشار محفظه احتراق و نحوه

<sup>i</sup> دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر - Tel : 09122435224- E-Mail : Badrnezhad@Yahoo.com

<sup>ii</sup> استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی

یک گاز خنثی تا فشار مورد نظر افزایش یافته و تغییرات نرخ سوزش با فشار بررسی می‌شود؛ ولی اثر جریان در سطح سوزش بررسی نمی‌گردد.

بدون ملاحظات نوع سوخت (همگن، غیرهمگن و ...) نظریه های سوزش فرسایشی در چهار گروه طبقه بندی می‌شود. این مدل‌ها عبارتند از:

الف) تئوری بر مبنای پدیده انتقال حرارت [۱-۳]

ب) تحلیل بر مبنای لایه مرزی [۴-۶]

ج) اصلاح سازوکار احتراقی سوخت [۷-۹]

د) تحلیل لایه مرزی مغشوش با واکنش شیمیایی [۱۰-۱۲]

تعدادی از مدل‌های نظری، ترکیبی از مدل‌های فیزیکی یادشده هستند. در این حالت‌ها، مدل‌ها مطابق پایه‌های فیزیکی اصلی طبقه بندی می‌شوند.

در اثر تداخل واکنش‌های سوخت جامد با جریان‌های گازی؛ که به موازات سطح سوزش سوخت جریان می‌یابند، نرخ سوزش افزایش می‌یابد که این پدیده را سوزش فرسایشی گویند. در موتورهای سوخت جامد با گرین درونسوز سوزش فرسایشی در صورتی ظاهر می‌شود که فلاکس جرمی از یک میزان آستانه‌ای پیروی کند و باعث گردد که فشار محفظه افزایش یابد. از این رو فشار محفظه در موتور با نسبت طول به قطر بزرگ‌تر در ابتدای شرایط کاری موتور افزایش می‌یابد [۱۳].

اولین سازوکار در افزایش نرخ سوزش سوخت جامد می‌تواند در اثر فلاکس حرارتی وارد شده در اثر عبور جریان باشد. عوامل متعددی فلاکس حرارتی را افزایش می‌دهند که از آن جمله می‌توان به گرادیان دمایی در لایه مرزی اشاره کرد. وقتی که سرعت جریان بر روی سطح سوخت افزایش می‌یابد، لایه مرزی فشرده می‌شود، بدین ترتیب گرادیان دمایی در سطح سوخت افزایش می‌یابد که نتیجه آن افزایش انتقال حرارت به سطح می‌باشد.

مطالعات متعددی را Razdan & Kuo از دیدگاه لایه مرزی مغشوش انجام داده است تا افزایش نرخ سوزش را با سرعت جریان؛ که باعث افزایش گرمای برگشتی به سطح سوخت می‌شود، مدل سازی کند. King تحقیقات بسیار وسیعی را با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، روش‌های عددی و ارائه روابط چند پارامتری انجام داده است [۱۴]؛ اما مدل‌های کاربردی و معادلات سودمند برای پیش بینی اثرات سوزش فرسایشی با دقت بالا به دلیل عدم توسعه مدل ریاضی دقیق و تکنیک‌های موجود ارائه نشده و امکان اندازه گیری نرخ سوزش محلی تحت شرایط سوزش فرسایشی میسر نشده است. در این

مقاله اثرات سوزش فرسایشی در سوخت‌های جامد حاوی ذرات آلومینیم بوسیله آزمون‌های موتور نمونه کوچک اندازه گیری شده است. فرمول جدید ارائه شده بر مبنای Dickinson است و رفتار کاری موتور از نظر فشار و میزان پسروی سطح سوخت در محفظه آزمون در آن اعمال شده است [۱۵]. علاوه بر آن، نتایج حاصل از آزمون نمونه اصلی در به دست آوردن پارامترهای مدل لحاظ شده است.

## ۲- رابطه نرخ سوزش فرسایشی

با توجه مدل‌های متعددی که تا به امروز در خصوص سوزش فرسایشی سوخت جامد ارائه شده است هیچکدام از این مدل‌ها حتی با داشتن پارامترهای مدل قابل استفاده نیستند؛ چرا که پارامترهای ارائه شده در هر مدل براساس سوخت خاصی که در شرایط کاری مشخصی طراحی شده است، معین می‌شود. پس هر مدلی که برای سرعت سوزش فرسایشی مدنظر قرار گیرد باید پارامترهای آن مدل برای سوخت مورد نظر در شرایط کاری موتور تعیین گردد.

در این مقاله رابطه جدیدی بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای و آزمایش‌های انجام گرفته در خصوص نرخ سوزش فرسایشی سوخت جامد مرکب پیشنهاد شده است که مزیت آن، نزدیک بودن نتایج آزمایشگاهی با شرایط موتور اصلی در مدل پایه ارائه شده به وسیله Dickinson است. این رابطه به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{r}{r_0} = \begin{cases} 1 + (KP)^\alpha D_H^\beta G (1 - G_{th}^{\wedge} \frac{\rho_S r}{G}) & , G_{th}^{\wedge} < \frac{G}{\rho_S r} \\ 1 & , G_{th}^{\wedge} \geq \frac{G}{\rho_S r} \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه،  $r$  بیانگر نرخ سوزش خطی،  $G$  فلاکس جرمی در پورت،  $D_H = \frac{4Ap}{P_p}$  قطر هیدرولیک،  $P$  فشار محفظه احتراق،  $G_{th}^{\wedge}$  فلاکس جرمی بی بعد شده در شرایط آستانه‌ای،  $\rho_S$  دانسیته سوخت بوده و  $K, \beta, \alpha$  پارامترهای مدل هستند که از طریق تست آزمایشگاهی معین می‌شوند. زیر نویس  $r_0$  بیانگر شرایط غیر سوزش فرسایشی و زیر نویس  $G_{th}^{\wedge}$  بیانگر شرایط آستانه‌ای است. شرایط آستانه‌ای شرایطی است که در آن نقطه سوزش فرسایشی آغاز می‌شود و منظور از سطح پورت، فضای خالی موجود در گرین سوخت است که جریان گازهای حاصل از احتراق از آن مقطع عبور می‌کند. مبنای فرمول فوق همان فرمول Dickinson و به صورت زیر است [۱۵]:

$$\frac{r}{r_0} = 1 + K_d G \left(1 - \frac{G_{th}}{G}\right) \quad (2)$$

مشخص خواهد کرد. علت انتخاب این روش، دقت سیستم های قطع تراست و خاموشی موتور است که می توان پسروی سوخت را در هر لحظه به دست آورد. البته روش عکس برداری با دوربین سرعت بالا نیز دقت بسیار بالایی دارد؛ ولی به دلیل بررسی قطع تراست از روش قطع سوزش استفاده شده است. در این گزارش با شناخت از عوامل سوزش فرسایشی بعد از مرحله طراحی، تعیین سیستم های مورد نیاز برای اندازه گیری، بررسی سوزش فرسایشی و اندازه گیری پارامترهای موثر مورد نظر است.

برای بحث روی روش انجام کار و راه اندازی دستگاه تست سوزش فرسایشی مراحل کار را به بخش های زیر تقسیم بندی می کنیم:

### ۳-۱- اجزای موتور تست نمونه کوچک موتور

دو موتور با ابعاد مختلف برای تعیین داده های نرخ سوزش بکار برده می شوند. موتورهای مورد نظر برای تعیین نرخ سوزش با سرعت گازهای احتراقی؛ که موازی سطح سوزش نمونه سوخت جریان می یابند، به کار می روند. نمونه های سوختی در جایگاه های خاص موسوم به شبکه های نگهدارنده سوخت قرار می گیرند. نمونه های سوختی برای تولید مقدار مشخصی از گازهای احتراقی؛ که با نرخ ثابت تولید می شوند، به کار می روند که این نمونه ها به صورت درون سوز- برون سوز طراحی شده اند. برای جلوگیری از تراش کاری سوخت ها، قالب هایی طراحی و ساخته شده است. ذکر این نکته لازم است که آزمون موتورها در ابعاد مختلف به دلیل متفاوت بودن میدان جریان در موتور آزمایشگاهی و نمونه اصلی به طور کامل Scalable نیست.

نمونه های سوختی استوانه ای شکل به تعداد سه عدد در جایگاه های نگهدارنده سوخت قرار می گیرند. جنس موتور از آهن و جنس قالب ها از آلومینیم است.

در روی سطح موتور دریچه ای قرار داده شده است که برای ایجاد افت فشار لازم هنگام پاشش آب به داخل موتور فعال می شود که به آن، دریچه قطع تراست می گویند. شکل (۱) دستگاه آزمون سوزش فرسایشی را نشان می دهد.

### آتشزنه

آتشزنه بکار برده شده پیرو تکنیکی است و شار حرارتی لازم را برای اشتعال سوخت ایجاد می کند. آتشزنه به وسیله اسکوتیپ؛ که المان تبدیل کننده جریان به گرماست، فعال می گردد.

با توجه به گستردگی عوامل موثر در طراحی آتشزنه مناسب، مهم ترین این عوامل در نظر گرفته می شود. آزمایش ها

اما فلاکس جرمی آستانه ای به وسیله نرخ سوزش جرمی در نقطه آستانه، بی بعد شده است و علاوه بر آن، وابستگی فشار [۱۶] و قطر پورت [۱۷]؛ [۱۸] روی نرخ سوزش فرسایشی وارد شده است. طبق مطالعات اولیه، که محققین ارائه کرده اند، مقدار  $G_{th}$  متناسب با نرخ سوزش جرمی و مقدار  $G_{th}$  فلاکس جرمی بی بعد شده در شرایط آستانه ای است که تقریباً ثابت و مستقل از ترکیب درصد سوخت و فشار محفظه احتراق می باشد. مطابق Dickinson [۱۵] و Lenoir-Robillard [۱۷] مقدار  $\beta = -0.2$  تخمین زده شده است. مقادیر  $\alpha$  و  $K$  به مکانیزم واکنش شیمیایی بستگی دارد.

### ۳- تجویزات آزمایشگاهی

دیدگاه های آزمایشگاهی مربوط به سوزش فرسایشی به دو گروه اصلی تقسیم می شوند:

الف) آزمون های موتور موشک نمونه واقعی

ب) آزمون های آزمایشگاهی نمونه کوچک روی یک نمونه سوخت

وقتی که آزمون های موتور واقعی تحت شرایط واقعی دینامیک گاز انجام می گیرد، به خاطر اینکه از داده های نرخ سوزش متوسط استفاده می شود، دقت کمی دارد؛ چرا که در این نوع آزمون ها با داشتن نمودار فشار - زمان و محاسبه زمان عملکرد موتور و وب سوخت نرخ سوزش متوسط به دست می آید. از طرف دیگر، آزمون های نمونه کوچک با توجه به نحوه طراحی دقت بهتری را می تواند داشته باشد؛ اگرچه میدان جریان، نسبت به نمونه واقعی دقت کمتری خواهد داشت. آزمون های آزمایشگاهی سوزش فرسایشی برای تحقیق اثرات پارامترهای فیزیکی مختلف و مقایسه پیش بینی های نظری و نرخ سوزش فرسایشی اندازه گیری شده، اهمیت دارند. دقت نرخ سوزش به روش اندازه گیری بکار برده شده بستگی دارد.

روش های مختلفی برای اندازه گیری سرعت سوزش فرسایشی وجود دارد که می توان به روش های X-ray [۱۳]، اهرم فشار (Pressure Pickup)، روش قطع سوزش (Interrupt Burning) [۱۹]، روش غیر مستقیم اشتعال موتور و روش عکس برداری با دوربین سرعت بالا [۲۰] اشاره کرد.

یکی از مهم ترین روش های اندازه گیری سرعت سوزش فرسایشی استفاده از روش قطع سوزش است. در این روش، سوزش سوخت در فواصل زمانی مختلف قطع می شود. ابعاد گرین و وزن قبل و بعد از اندازه گیری، نرخ سوزش متوسط را

در دو فاز انجام می‌شود. در فاز اول با ثابت در نظر گرفتن خصوصیات محفظه موتور، تاثیر خصوصیات آتشزنی بر فشار ایجاد شده و در فاز دوم نحوه اثر گذاری خصوصیات محفظه احتراق موتور بر فشار ایجاد شده به وسیله آتشزنی بررسی می‌شود. تاخیر زمانی آتشزنی ۱ ثانیه است. مشخصات آتشزنی و پارامترهای خروجی آن در جدول (۱) و (۲) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات آتشزنی پیروتکنیکی

OXIDANT	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>
FUEL	AL
FUEL	KNO <sub>3</sub>
FUEL	C
FUEL	S
O/F	0.7857
PERCENT FUEL	56
EQUIVALENC RATIO	0.45

جدول (۲): مشخصات پارامترهای خروجی آتشزنی

	CHAMBER	THROAT	EXIT
PC/P	1.0000	1.7560	40.000
P, ATM	40.000	22.779	1.0000
T, DEG K	2079	1936	1388
RHO, G/CC	9.0129-3	5.5882-3	3.7405-4
H, CAL/G	-494.7	-552.7	-802.6
S,	1.6834	1.6834	1.6834
CAL/(G)(K)			

## اطفا

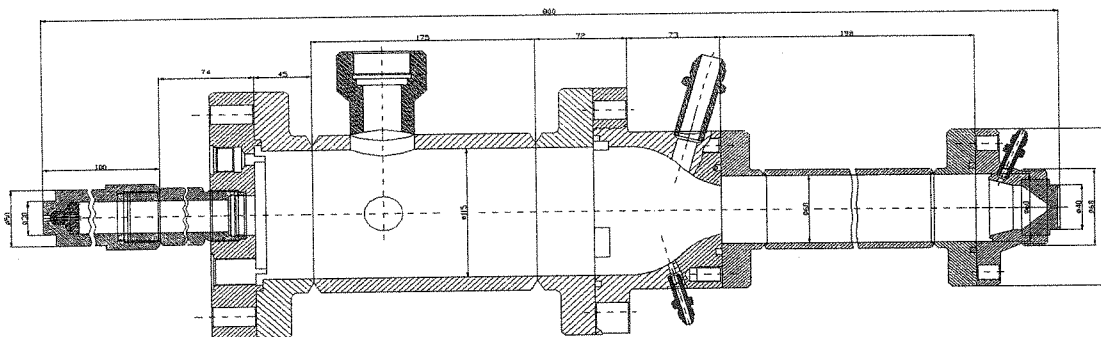
خفه کن برای اطفای موتور در زمان‌های مشخص به کار می‌رود. خفه کن دو دیافراگم دارد که فضای بین این دو دیافراگم از آب پر می‌شود و سپس با چسب آب بندی، دیافراگم‌ها روی محفظه قرار می‌گیرند. پشت دیافراگم اول ماده انفجاری قرار می‌گیرد که باعث ایجاد موج انفجار و پارگی دیافراگم شده و آب با فشار به داخل موتور پاشیده می‌شود.

## محفظه گذرا

محفظه گذرا؛ که از استیل ساخته شده است، برای انتقال گازهای حاصل از احتراق از محفظه احتراق به محفظه آزمون بکار می‌رود و باعث می‌شود گازها با سرعت زیادی از روی نمونه سوختی عبور کنند.

## محفظه آزمون

محفظه آزمون؛ که از استیل ساخته شده است، نمونه سوختی، مشابه نمونه سوختی بکار برده شده در موتور است که در آن قرار می‌گیرد و فقط ابعاد آن با سوخت موتور متفاوت می‌باشد و استوانه‌ای درون سوز - دوسرسوز است. برای تهیه نمونه سوختی قالب‌های مجزایی تهیه شده است.



شکل (۱): شماتیک دستگاه تست سوزش فرسایشی

## نازل

نازل‌های مختلفی با گلوگاه‌های مختلف برای تهیه فشار و سرعت جریان‌های مختلف بکار می‌رود. ذکر این نکته لازم است که نازل برای انبساط اپتیمم گازهای حاصل از احتراق طراحی نشده است.

## ۳-۲- سنجش و ابزار دقیق

در هر آزمون، متغیرهای زیر اندازه‌گیری می‌شوند:

الف) فشار در انتهای قسمت مولد گاز و ورودی محفظه

گذرا

ب) فشار در انتهای محفظه آزمون

ج) میزان پسروی سطح سوخت نسبت به زمان

## اندازه‌گیری فشار

ترانسدیوسر فشار برای اندازه‌گیری فشار در خروجی مولد گاز و محفظه آزمون از نوع کیسلر است که قبل از انجام آزمون بایستی کالیبره شود. تغییرات لحظه‌ای فشار به وسیله ترانسدیوسر ثبت می‌شود.

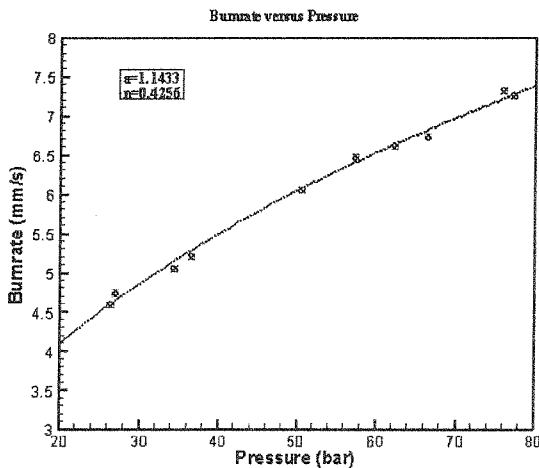
## اندازه‌گیری نرخ سوزش

برای تعیین نرخ سوزش سوخت در این روش مراحل زیر

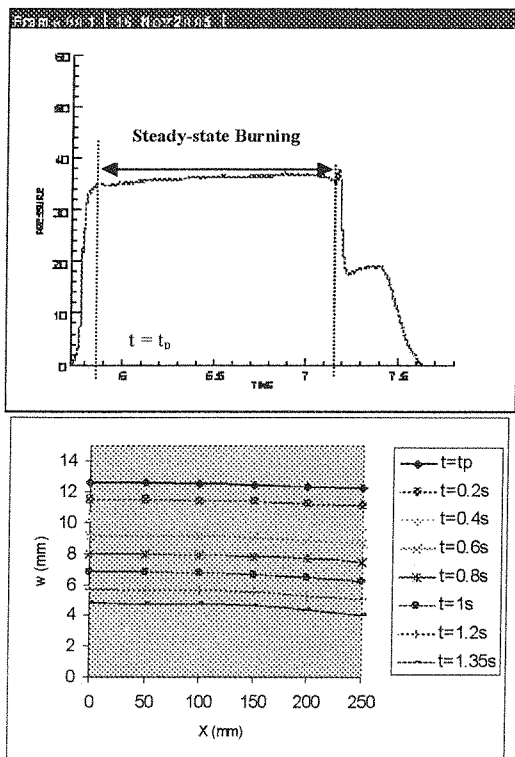
صورت می‌پذیرد:

منحنی برای سوخت مورد آزمون در آزمایشگاه در شکل (۲) آورده شده است.

شکل شماره (۳) تغییرات فشار - زمان و پسروی سطح سوخت اندازه گیری شده در آزمون را نشان می‌دهد. به طوری که در شکل مشاهده می‌شود گازهای محترقه از آتشزنه به صورت احتراق حالت گذرا از آتشزنه خارج می‌شود. اثرات سوزش فرسایشی در فاز اولیه کاری موتورها به دلیل کوچک بودن سطح پورت زیاد است؛ ولی به دلیل طراحی خوب آتشزنه و موتور فشار پیک در حالت گذرا از آتشزنه و رسیدن به سوزش حالت پایا دیده نمی‌شود.



شکل (۲): نمودار فشار - زمان سوخت



شکل (۳): نمودار فشار - زمان و میزان پسروی موضعی سطح سوخت

۱- اندازه گیری دقیق وب سوخت : این اندازه گیری در چهار نقطه در دو سر سوخت انجام می‌شود و در صورت اختلاف بیش از ۳ درصد سوخت برای این آزمون مردود شمرده می‌شود. در صورت مناسب بودن سوخت، وب سوخت از متوسط مقادیر خوانده شده به دست می‌آید.

۲- روشن کردن سوخت با قطره‌های گلیویی نازل مختلف (فشارهای مختلف) و ثبت فشار

۳- تهیه جدول نرخ سوزش سوخت برحسب فشار: با تعیین زمان سوزش سوخت و متوسط فشار در موتور و تقسیم وب سوخت بر این زمان، جدول نرخ سوزش بر حسب فشار متوسط به دست می‌آید.

۴- برازش منحنی نمایی به داده‌های حاصل و تعیین  $n$  و  $a$  جدول (۳) خواص سوخت بکار برده شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۳): خواص و مشخصه سوخت

۶۹٪	اکسید کننده
۱۱/۵٪	پایندر HTPB
۱۹٪	سوخت فلزی (آلومینیم)
۰/۵٪	اکسید آهن
۱/۷	دانسیته سوخت ( $g/cm^3$ )
۵/۲	نرخ سوزش خطی ( $mm/s$ )
۰/۴۲۵۶	توان فشار
۰/۰۰۱	حساسیت دمایی
۲۱۵۰	دمای شعله آدیاباتیک (k)
۱/۲	نسبت ظرفیت حرارتی ویژه
۲۷/۸	جرم مولکولی متوسط

### خطاها

جدول (۴) خطاهای استاتیک را برای سنسور فشار در محدوده ۲۰۰ بار نشان می‌دهد.

جدول (۴): خطاهای استاتیک

Title	Error	Permissible
Non-Zeroing	-0.01	$\leq + 0.3$
Non-Linearity	0.12	$\leq + 0.4$
Hysteresis	0.06	$\leq + 0.4$
Repeatability Lowering	0.05	$\leq + 0.4$
Repeatability Rising	0.04	$\leq + 0.4$

دقت کولیس دیجیتال در اندازه گیری پسروی سطح سوخت ۰/۰۱ میلی متر و دقت تایمر در سیستم قطع تراست ۰/۱ ثانیه است.

### ۴- نتایج آزمایشگاهی

با برازش یک منحنی نمایی  $r = a p^n$  به داده‌های حاصل از نتایج آزمون آزمایشگاهی،  $n$  و  $a$  به دست می‌آید. نمونه این

## معادله پیوستگی

این معادله نشان دهنده قانون بقای جرم برای سیال است که به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (3)$$

در این معادله،  $U$  نشانگر بردار سرعت،  $\rho$  دانسیته و  $t$  زمان است.

معادله های اندازه حرکت سیال (مومنوم)

در این معادله‌ها قانون دوم نیوتن برسیال اعمال می‌شود. نیروهای وارد بر سیال بر دونوع هستند:

نیروهای سطحی (مانند نیروهای فشاری و نیروهای لزج تنش‌های برشی و نرمال)

نیروهای بدنه‌ای (مانند نیروهای گرانشی، گریز از مرکز و ...)

فرم معادله اندازه حرکت به صورت زیر است.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (6)$$

مؤلفه‌های طرف دوم معادلات به ترتیب اثر نیروهای فشاری، نیروهای لزجت و نیروهای بدنه‌ای است. برای تنش‌های لزجی باید روابطی به دست آید. تمامی گازها و بسیاری از مایعات ایزوتروپ هستند، نرخ تغییر شکل در این سیالات ۶ مؤلفه مستقل دارند و در یک سیال نیوتنی، تنش‌های لزج متناسب با نرخ تغییر شکل می‌باشند. ناویر و استوکس در قرن نوزدهم برای تنش‌ها معادله زیر را به طور هم زمان به دست آوردند:

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (7)$$

در اعداد رینولدز بالا، که جریان مغشوش است، برای محاسبه تنش‌ها از مدل‌های مغشوش استفاده می‌شود. مدلی که در این مدل سازی استفاده شده است مدل  $k-\epsilon$  است.

## معادله انرژی

برای موازنه حرارت از اصل پایستگی انرژی؛ یعنی، قانون اول ترمودینامیک استفاده شده است. در اینجا موتور به عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفته شده است که در آن، جرم به

البته در موتورهای بزرگ؛ که برای روشن شدن آنها از سوخت‌های پیروژنی استفاده می‌شود، پیک فشاری آتشنزده دیده می‌شود که ارتباطی به بحث سوزش فرسایشی ندارد و با ادامه کار موتور سوزش فرسایشی آن مشخص خواهد شد. وقتی که فشار پیک در زمان  $t_p$  بعد از روشن شدن موتور دیده می‌شود حدود ۱۵ درصد جرمی از کل سوخت محفظه محترق شده است. در بررسی اثرات سوزش فرسایشی، موتور مولد گاز باید فشار ثابتی را در محفظه آزمون ایجاد کند تا امکان بررسی این پدیده به وجود آید؛ چرا که اگر فشار ثابت نباشد رفتار موتور مولد گاز در زمان‌های مختلف، متفاوت بوده و پس روی سطح سوخت در زمان‌های یکسان مختلف خواهد بود؛ بنابراین مولد گاز نباید پیک سوزش فرسایشی داشته باشد.

## ۵- مدل سازی سیالاتی سوزش فرسایشی با

### استفاده از روش‌های عددی [۲۱]

از آنجا که به دست آوردن پارامترهای ترمودینامیکی و آنالیز دینامیک گازی یکی از مهم ترین بخش‌های طراحی موتور است؛ در این بخش موارد مذکور بررسی می‌شود. علاوه بر آن، تعیین طول ناحیه آزمون، که در آن جریان گازها به صورت توسعه یافته باشد و همچنین بهینه سازی پارامترهای مدل ارائه شده از دلایل مهم مدل سازی سیالاتی موتور آزمون سوزش فرسایشی می‌باشد.

با توجه به اینکه مدل سازی در فاز حالت پایا انجام می‌شود که دبی جرمی ثابتی از موتور به سمت محفظه آزمون جریان می‌یابد؛ بنابراین در این معادلات حرکت مرز سوخت و افزایش پورت و تغییر حجم موتور در نظر گرفته نمی‌شود.

معادلاتی که برای بررسی این مساله باید حل گردید عبارتند از:

پیوستگی

مومنوم

معادلات مغشوش  $k-\epsilon$

معادله انرژی

روش حل به این صورت است که ابتدا این معادلات با روش‌های انفصال مناسب به معادلات جبری تبدیل می‌شوند و معادلات جبری به دست آمده در شبکه مناسب به وسیله روش‌های تکرار حل می‌گردند.

## ۵-۱- معادلات حاکم و روش حل آنها

معادله‌هایی که باید در مدلسازی مورد بحث قرار بگیرند معادله‌های ناویر استوکس هستند که این معادله‌ها باید به وسیله روش‌های عددی حل شوند.

داخل موتور جریان دارد. با توجه به ورود جرم به موتور و خروج از آن، موتور به صورت یک مدل ترمودینامیکی فرآیند حالت - پایا جریان - پایا (Steady-State Steady-Flow) در نظر گرفته می‌شود.

$$\dot{Q}_{c.v.} + \sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right) = \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) + \dot{W}_{c.v.} \quad (8)$$

این معادله همراه با معادلات پیوستگی، مومنتم و مغشوش به طور همزمان با روش‌های عددی حل می‌شوند.

## روش عددی

با استفاده از روش‌های عددی مناسب معادلات حل می‌شوند. برای این منظور ابتدا شبکه‌ای از نقاط بر میدان حل منطبق می‌شود و معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری در هر نقطه از این شبکه تبدیل می‌شوند. سپس با استفاده از الگوریتم‌های خاصی دستگاه معادلات جبری به دست آمده حل می‌شود و توزیع کمیت‌های مختلف در نقاط شبکه مشخص می‌گردد.

حل عددی به وسیله نرم‌افزار Fluent صورت گرفته است. این نرم‌افزار معادلات را به صورت عددی در شبکه‌ای از نقاط ایجاد شده در نرم‌افزار Gambit حل می‌کند. حل‌کننده استفاده شده در این مساله Segregated solver است که معادلات را بصورت مجزا حل می‌کند از الگوریتم سیمپل برای کوپلینگ سرعت و فشار و برای انفصال معادله فشار از روش مرتبه دو و برای سایر معادلات از روش بالادست مرتبه اول استفاده شد. روش حل به این صورت بود که ابتدا معادلات را به صورت غیردائم آغاز و بعد از مدتی که باقیمانده‌ها به مقدار مناسبی کاهش یافتند، حل معادلات را به صورت دائم تمام می‌کنیم. مزیت استفاده از این روش، استفاده از مقادیر اولیه مناسب در ابتدای حل معادلات است که از حل غیر دائم به دست آمده است.

## ۵-۲- مروری بر آشفتگی و مدل سازی آن [۲۲]

آشفتگی عبارت است از عدم تبعیت توده‌های متوالی در یک جریان از یک خط جریان. به عبارت دیگر هر توده جریان ممکن است به صورت اتفاقی موقعیت محلی خود را در هر یک از جهات تغییر دهد و به طور یقین نمی‌توان موقعیت آن را تشخیص داد. کلی‌ترین نوع تقسیم بندی روش‌های مدل سازی جریان‌های مغشوش، بر اساس استفاده یا عدم استفاده مدل از معادلات متوسط زمانی رینولدز انجام می‌گیرد. مدل‌های نوع اول بیشتر در مهندسی کاربرد دارد و مقادیر متوسط زمانی

جریان را به دست می‌آورند، و به همین خاطر برای اهداف مهندسی کاملاً مناسب هستند. روش‌های دسته دوم؛ که بیشتر در تحقیقات مربوط به جریان مغشوش کاربرد دارند، مقادیر لحظه‌ای جریان را به طور کامل آریه می‌کنند و به دو گروه شبیه سازی مستقیم و شبیه سازی توده‌های بزرگ تقسیم می‌شوند. با توجه به تقسیم بندی فوق، مدل  $k-\varepsilon$ ؛ که در این مدل سازی استفاده شده است، یک مدل دو معادله‌ای است که با استفاده از معادلات متوسط زمانی و مدل لزجت توده‌ای، تنش‌های رینولدز را مدل می‌کند.

در مدل‌های دو معادله‌ای علاوه بر معادله انرژی جنبشی مغشوش یک معادله دیگر برای نرخ اتلاف انرژی جنبشی نوشته می‌شود:

$$k = \overline{u_j u_j} \quad (9)$$

$$\varepsilon = V \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

رابطه (۹) انرژی جنبشی مغشوش و رابطه (۱۰) نرخ استهلاک انرژی جنبشی مغشوش است.

برای مدل‌های دو معادله‌ای، لزجت مغشوش با انرژی جنبشی مغشوش و نرخ استهلاک انرژی جنبشی مغشوش رابطه دارد:

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

ذکر این نکته لازم است که انرژی جنبشی مغشوش و نرخ استهلاک انرژی جنبشی مغشوش از حل معادلات انتقال مربوطه محاسبه می‌شود.

مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  به طور گسترده در مدل سازی فرآیندهای صنعتی به کار می‌رود. معادله انرژی جنبشی آن از کاهش انرژی مکانیکی لحظه‌ای از مقدار متوسط زمانی، و معادله نرخ اتلاف انرژی جنبشی از استدلال‌های فیزیکی به دست می‌آید. این مدل برای جریان‌های مغشوش کامل معتبر هست و اغلب برای جریان‌های صنعتی و انتقال حرارت کاربرد دارد.

با توجه به اینکه حل این معادلات با روش تحلیلی غیر ممکن است، با استفاده از روش عددی مناسبی به حل آنها اقدام می‌شود. برای این منظور ابتدا شبکه‌ای از نقاط بر میدان حل منطبق می‌شود و معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری در هر نقطه از این شبکه تبدیل می‌گردد. سپس با استفاده از الگوریتم‌های خاصی دستگاه معادلات جبری به دست آمده حل و توزیع کمیات مختلف در نقاط شبکه مشخص می‌شوند.

در این پژوهش، برای تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات

جبری، روش حجم محدود (Finite Volume Method): که اولین بار پتتکار (Patankar, ۱۹۸۰) آن را ارائه کرد، استفاده می-شود.

### ۳-۵- شبکه و هندسه

با توجه به تقارن موجود در هندسه نازل و موتور از مدل سازی دو بعدی تقارن محوری در این مدل سازی استفاده شده است. در کل مجموعه، از سلولهای چهار وجهی برای شبکه بندی استفاده شده است و در نقاطی که به علت پیچیدگی هندسه و جریان به شبکه ریزتری نیاز بود از تراکم در این نقاط استفاده شده است.

هندسه دوبعدی هرکدام از مدل ها در نرم افزار Gambit رسم و پس از تکمیل هندسه به شبکه بندی آن اقدام شد. برای اطمینان از صحت شبکه و استقلال جواب ها از شبکه در سه مرحله به شبکه بندی اقدام گردید.

### ۴-۵- شرایط مرزی سیال

برای شرط ورودی از شرط دبی جرم ورودی استفاده شده است. دبی جرمی برابر با ۱.۲ کیلوگرم بر ثانیه فرض شده است. دمای ورودی ۳۱۵۰ کلوین و برای مقادیر ورودی مغشوش شدت ۵ در صد فرض شده است و قطر گلوگاه به عنوان قطر هیدرولیکی در نظر گرفته شده است. خواص سیال استفاده شده در جدول (۵) نشان داده شده است. در این مرحله، تغییرات فشار-زمان و سرعت-زمان و با حل دو بعدی جریان در حالت پایا با مدل ارائه شده محاسبه شده است، که به دلیل طولانی بودن نتایج فقط نمودارهای فشار و سرعت ارائه می-شود. پارامترهای  $G_{th}$ ،  $\beta$  به طوری که قبلا اشاره شده است، ثابت هستند. دو پارامتر باقیمانده  $\alpha$  و  $K$  با در نظر گرفتن میزان پسروی سطح سوخت و فشار در هر آزمون به دست می آیند. برای تعیین دو پارامتر بالا مقدار  $(KP)^{\alpha}$  ثابت در نظر گرفته شده و بهترین مقدار  $(KP)^{\alpha}$  در هر آزمایش به دست می-آید. جدول ۵ خواص سیال

خاصیت	مقدار	واحد
$\rho$	قانون گاز کامل	Kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	۱۹۱۷	J/Kg.k
$\theta$	۰/۰۳۴	W/m.k
$\mu$	۰/۰۰۰۰۹	Kg/m.s
$M$	۲۶/۶	Kg/Kg mol

سپس پارامترهای  $\alpha$  و  $K$  از رابطه داخلی بین مقدار  $(KP)^{\alpha}$  و فشار به دست می-آید. این عمل به دلیل کم بودن دامنه تغییرات فشار در مدت عملکرد حالت پایا می-تواند در نظر گرفته

شود.

نتایج محاسبات عددی با استفاده از بهترین مقدار  $(KP)^{\alpha}$  ارزیابی شده است. با توجه به اینکه قطر گلوگاه نازل در احتراق پایای سوخت جامد به دلیل چسبیدن ذرات اکسید آلومینیم تغییر می-یابد؛ بنابراین تغییرات فشار محاسبه شده بدون در نظر گرفتن سوزش فرسایشی افزایشی خواهد بود. از این رو، در محاسبات، قطر گلوگاه نازل متناسب با زمان آزمایشها فرض می-شود.

در شکل شماره (۴) بهترین مقدار  $(KP)^{\alpha}$  به دست آمده از هر آزمایش با فشار رسم شده است. شیب و عرض از مبدا در شکل بیانگر  $\alpha$  و  $K$  خواهد بود. مقدار  $\alpha$  برابر (۰/۷-) و مستقل از خواص سوخت در محدوده فشار کاری ۸-۴ مگا پاسکال است.

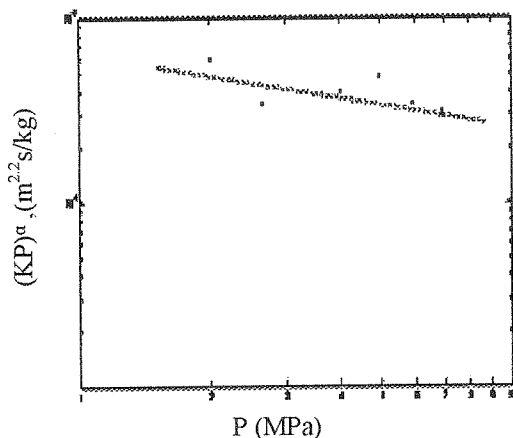
بدین ترتیب، پارامترهای به دست آمده به شرح ذیل است:

$$G_{th}^{\alpha} = 1.0$$

$$\alpha = -0.7 \quad (4 \text{ Mpa} < p < 8 \text{ Mpa})$$

$$\beta = -0.7$$

مقدار  $K$  برای هر سوخت متفاوت است و برای سوخت با مشخصات ذکر شده برابر  $0.7 \text{ m}^2 \text{ s/kg Mpa} \cdot 10^{-3} \cdot 6/2 \times 10^{-3}$  می-باشد.

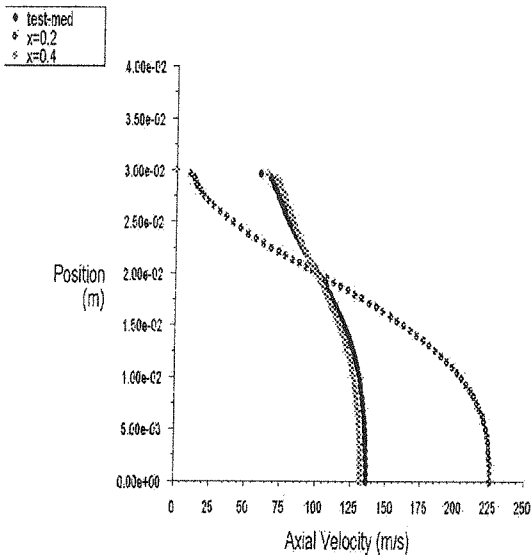


شکل (۴): رابطه بین  $(KP)^{\alpha}$  و فشار P

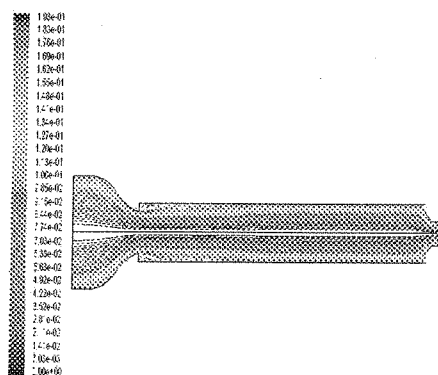
### ۶- نتایج شبیه سازی عددی و آزمون استاتیک

اکنون به بررسی نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی می-پردازیم. شکل (۵) هندسه و شبکه استفاده شده در محفظه آزمون به طول ۴۲۵ میلیمتر با نازل ۲۴ میلیمتر را نشان می-دهد. همان گونه که در تصویر مشخص است در نقاطی که تغییرات در پارامترهای اصلی جریان زیاد است، شبکه ریزتری استفاده شده است.

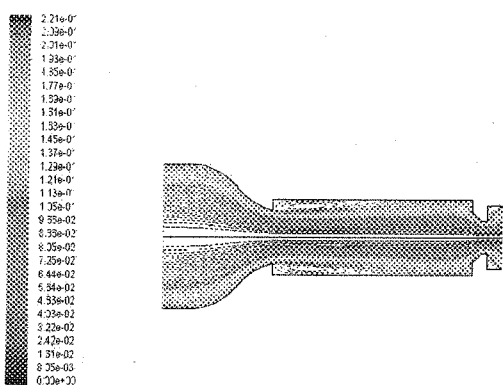




نمودار (۸): مقادیر سرعت محوری در سه مقطع از طول محفظه با نازل به قطر خروجی ۲۴ میلیمتر

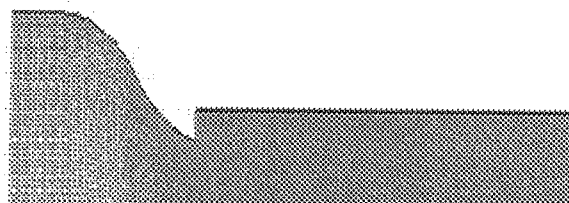


شکل (۹): کانتورهای خطوط جریان در محفظه آزمون به طول ۳۳۵ میلیمتر

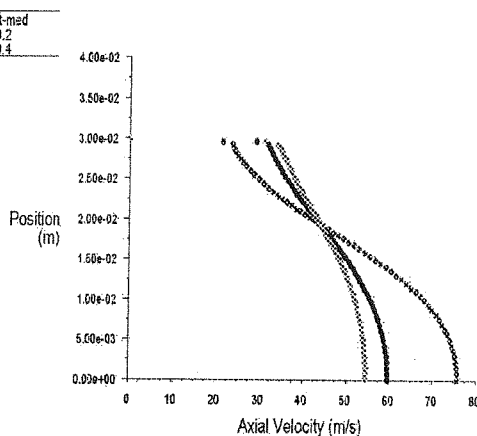


شکل (۱۰): کانتورهای خطوط جریان در محفظه آزمون به طول ۱۸۵ میلیمتر

در نمودارهای (۱۱) الی (۱۳) کانتورهای فشار در محفظه آزمون به طول ۳۳۵ با نازل های مختلف نشان داده شده است.

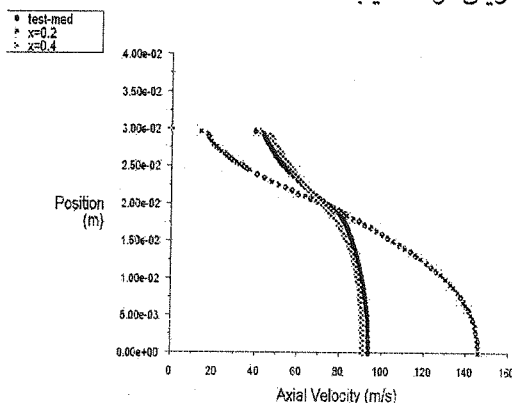


شکل (۵): هندسه و شبکه استفاده شده در محفظه آزمون به طول ۳۳۵ میلیمتر



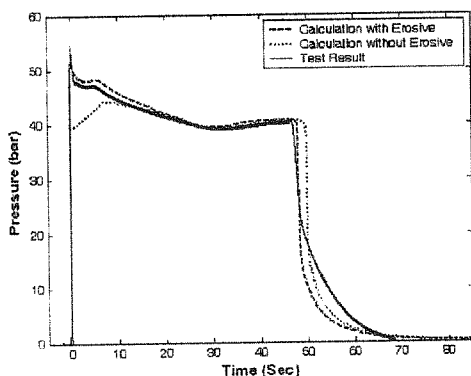
نمودار (۶): مقادیر سرعت محوری در سه مقطع از طول محفظه با نازل به قطر خروجی ۱۶ میلیمتر

در نمودارهای (۶) الی (۸) توزیع سرعت در محور محفظه آزمون نشان داده شده است. همانگونه که از تصاویر مشخص است تغییرات زیادی در داخل هر کدام از محفظه آزمون ها مشاهده نمی شود؛ ولی با مقایسه این نمودارها مشخص می شود که فشار در محفظه آزمون با نازل ۱۶ میلیمتر از حدود ۹۲ بار به ۴۰ بار در محفظه آزمون با نازل ۲۴ میلیمتر کاهش یافته است. مهم ترین نتیجه حاصل شده از شکل های (۹) و (۱۰) این است که به دلیل وجود جریان های گردابی در ورودی محفظه آزمون، طول محفظه آزمون باید بیشتر از ۲۵۰ میلیمتر باشد تا جریان توسعه یابد.



نمودار (۷): مقادیر سرعت محوری در سه مقطع از طول محفظه با نازل به قطر خروجی ۲۰ میلیمتر

محاسباتی را برای موتور نمونه اصلی به طول ۶ متر و به قطر ۱/۴ متر را نشان می دهد که در آن، نمودار پیوسته به آزمون استاتیک، نمودار خط چین پایینی به پیش بینی فشار داخلی موتور بدون در نظر گرفتن سوزش فرسایشی و نمودار خط چین بالایی به پیش بینی فشار داخلی موتور با در نظر گرفتن سوزش فرسایشی به وسیله مدل ارائه شده مربوط است. به طوری که در شکل مشاهده می شود نمودار فشار-زمان ارائه شده بسیار به داده های حاصل از آزمون استاتیک نزدیک است و به خوبی با استاتیک داخلی موتور را پیش بینی می کند.

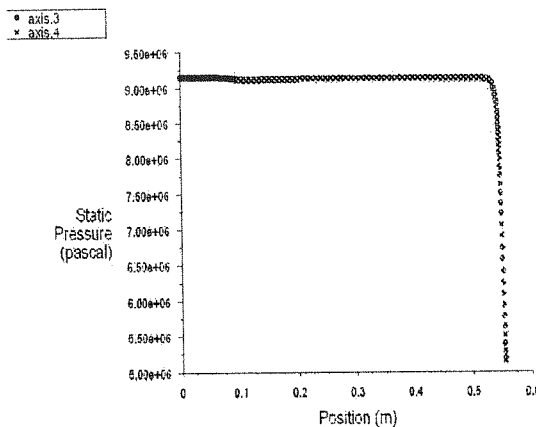


نمودار (۱۴): نمودارهای فشار-زمان حاصل از آزمون استاتیک و محاسباتی با در نظر گرفتن سوزش فرسایشی

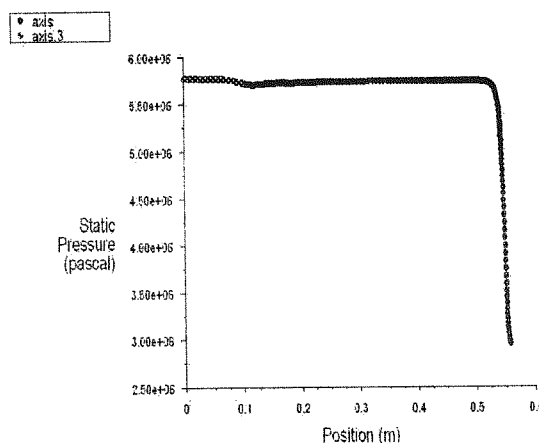
#### ۷- نتیجه گیری

سازوکار احتراق سوخت جامد تحت تاثیر جریان مغشوش بالای سطح سوخت قرار می گیرد. فلاکس حرارتی اعمال شده به سطح سوزش به دلیل نفوذ شعله از فاز گاز به سطح سوخت جامد در اثر اختلاط مغشوش باعث افزایش نرخ سوزش می شود که به این پدیده سوزش فرسایشی گفته می شود. با توجه به اینکه مشخصه میدان جریان مغشوش مستقل از فشار است در نتیجه اثرات سوزش فرسایشی به طور نسبی با افزایش فشار محفظه احتراق ضعیف می شود. سوخت های با نرخ سوزش و دمای شعله بالاتر، طول شعله کمتری از سوخت های با نرخ سوزش کمتر دارند؛ بنابراین اثر سوزش فرسایشی سوخت های با نرخ سوزش بالاتر، کمتر از سوخت های با نرخ سوزش کمتر است.

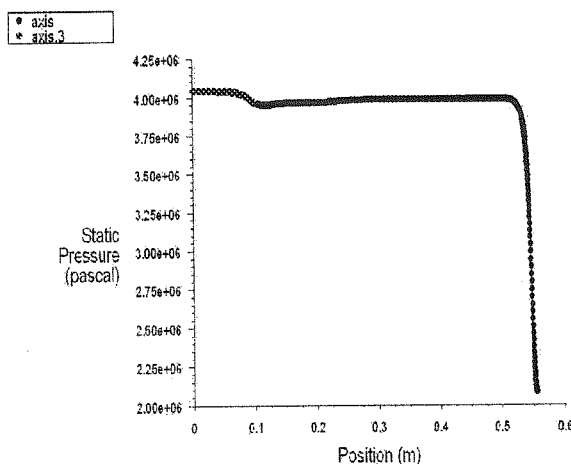
حساسیت دمایی؛ که عبارت است از درصد تغییرات نرخ سوزش بر درجه تغییرات دمایی سوخت، به قطر ذرات پرکلرات آمونیم، انرژی فعال ساز واکنش های فاز گاز وابسته است که Cohen آن را تعریف کرده است [۲۳]، فاصله بین سطح جامد و نفوذ شعله به وسیله این پارامتر مشخص شد که اثرات سوزش فرسایشی را توصیف می کند؛ بنابراین مقدار  $K$  که بیانگر بزرگی اثرات سوزش فرسایشی می باشد با حساسیت دمایی افزایش



نمودار (۱۱): مقادیر فشار در محور محفظه آزمون با نازل به قطر خروجی ۱۶ میلیمتر



شکل (۱۲): مقادیر فشار در محور محفظه آزمون با نازل به قطر خروجی ۲۰ میلیمتر



نمودار (۱۳): مقادیر فشار در محور محفظه آزمون با نازل به قطر خروجی ۲۴ میلیمتر

از این نمودارها نتیجه می شود که نازل با قطر ۲۴ سانتیمتر فشار ۴۰ بار را، که نزدیک به فشار کاری موتور است ایجاد می کند.

شکل شماره (۱۴) نمودارهای حاصل از آزمون استاتیک و

می‌یابد.

فلاکس جرمی آستانه ای بدون بعد بر نرخ سوزش جرمی تقریباً ثابت و برابر ۱۰ است. نتایج محاسبات عددی با استفاده از بهترین مقدار  $^{(KP)}$  با نتایج تجربی نشان داده شده است. پارامترهای  $\alpha$  و  $K$  از رابطه داخلی بین مقدار  $^{(KP)}$  و فشار به دست می‌آیند.

اثرات سوزش فرسایشی سوخت جامد در موتور نمونه اصلی با وارد کردن پارامترهای مدل برای پیش بینی نمودارهای فشار-زمان بررسی شده است و مدل ارائه شده در این مقاله را بخوبی تایید می‌کند.

اثرات سوزش فرسایشی در نوعی از سوخت جامد مرکب بر پایه  $HTPB$  مشاهده و به وسیله موتور آزمون سوزش فرسایشی با استفاده از تکنیک قطع سوزش اندازه گیری شد. در این تحقیق، یک رابطه جدید برای محاسبه سوزش فرسایشی ارائه شده است. فلاکس جرمی، فشار، قطر هیدرولیک پورت و فلاکس جرمی آستانه ای بی بعد در رابطه قرار دارند. پارامترها با در نظر گرفتن نمودار فشار - زمان و میزان پسروی سطح سوخت از آزمایش‌ها تعیین می‌شوند. مقدار

## ۸- فهرست لغات

$C_p$	ظرفیت حرارتیواکنش گرما، $kcal / kg \cdot k$	$\frac{r_b}{r_o}$	نسبت افزایش نرخ سوزش فرسایشی
$C_s$	ظرفیت حرارتی سوخت، $kcal / kg \cdot k$	$P$	فشار، Pa
$A_p$	سطح پورت، $m^2$	$P_o$	فشار سکون، Pa
$D_H$	قطر هیدرولیک، m	$a$	ضریب ثابت رابطه نرخ سوزش
$M$	عدد ماخ یا جرم مولکولی گاز	$n$	توان نرخ سوزش
$t$	زمان، s	$\alpha, \beta$	ثوابت معادله نرخ سوزش ساییشی
$\sigma_p$	حساسیت دمایی، $K^{-1}$	$m'_b$	دبی جرمی سوزش $kg / m^2 \cdot s$
$T$	دمای گاز، k	$R_u$	ثابت عمومی گازها $N \cdot m / kmole \cdot k$
$T_f$	دمای شعله، k	$Re_x$	عدد رینولدز بر مبنای x
$U$	سرعت گاز در جهت x، m/s	$r$	کل نرخ سوزش سوخت جامد، m/s
$U$	سرعت محوری گاز بیرون لایه مرزی، m/s	$r_c$	نرخ سوزش ساییشی m/s
$V$	سرعت گاز در جهت y یا r، m/s	$r_o$	نرخ سوزش عمومی (غیرساییشی)، m/s
$w$	سرعت گاز در جهت Z، m/s	$\alpha_g$	ضریب نفوذ حرارتی گاز، $m^2 / s$
$W$	وزن مولکولی گازها، $kg / kmol$	$\epsilon$	نرخ پراکندگی جریان آشفته، $m^2 / s^3$
$\mu_{eff}$	ویسکوزیته موثر $kg / m \cdot s$	$\lambda$	ضریب هدایت حرارتی گاز
$V_t$	ضریب نفوذ جریان آشفته $m^2 / s$	$\lambda_f$	ضریب هدایت حرارتی جریان آشفته kcal/m.s.k
$G$	فلاکس جرمی گازهای احتراق $kg / m^2 \cdot s$	$\mu$	ویسکوزیته گاز $kg / m \cdot s$
$G_{th}$	فلاکس جرمی آستانه ای $kg / m^2 \cdot s$	$P_p$	محیط پورت، m
$G_{cr}$	فلاکس جرمی بحرانی $kg / m^2 \cdot s$	$f_y$	نیروهای وارده در جهت y
$f_x$	نیروهای وارده در جهت x	$f_z$	نیروهای وارده در جهت z

## ۹- مراجع

Sixth symposium (International) on Combustion , Reinhold , New York , 1957 , pp.663-667.

Mohan K. Razdan , Kenneth K. Kuo" Erosive Burning of solid propellants" AIAA Paper 1985. [۱]

Marklund , T., " Propellant Erosion Studies , " Research Institute of Nation Defense, Sweden , 1961. [۲]

Lenoir , J . M . and Robillard , G., "A Mathematical Method to Predict the Effects of Erosive Burning in Solid - Propellant Rocket , " [۲]

- Kreidler, J.W. "Erosive Burning : New Experimental Techniques and Methods of Analysis", AIAA Paper 64-155,1964. [۱۶]
- J.M.Lenoir and G.Robillard "A Mathematical Method to Predict the Effects of Erosive Burning in Solid-Propellant Rocket, 6<sup>th</sup>onal Symposium on Combustion, 1957, pp.663-667. [۱۷]
- M.Kohno, H.Nagata and T. Shimada "Erosive Burning of Highly Aluminized Composite Propellant:Improved Correlation and Grain Design Applications,first TEMPE-ISAS Joint Workshop on Space Propulsion and Related Materials, Bonassola,1997 [۱۸]
- Green, L.J."Erosive Burning of Some Composite Solid Propellants" Jet Propulsion, Vol. 24, 1954, pp. 9-15. [۱۹]
- Zucrow, M.J.Osborn, J.R.,and Morphy, J.M. "An Experimental Investigation of the Erosive Burning Characteristics of a Nonhomogenous Solid Propellant,AIAA Journal, Vol. 3 , No. 3 , March 1965 pp 523-525. [۲۰]
- Brian A. McDonald , Suresh Menon"Direct Numerical Simulation of Solid Propellant Combustion in Cross Flow" Journal of Propulsion and Power , Vol. 21, No. 3 , May-June 2005. [۲۱]
- Li Yimin , Xia Xiangxing and Zhang Yi"Erosive Burning Characteristics as a Function of Turbulent Parameter and Pressure"AIAA Journal 1990 [۲۲]
- Cohen,M.S. and Flanigman,D.A."Mechanisms and Model of Solid Propellant Burn-Rate Temperature Sensitivity: A Review"AIAA Journal, Vol. 23 1985, pp 15381547 [۲۳]
- Zucrow , M., Osborn , J. R., and Murphy , J. M., "The Erosive Burning of a Nonhomogeneous solid propellant, " Chemical Engineering Techniques in Aerospace , edited by D. J. Simkin, American Institute of chemical Engineering , New York, 1964pp 23 -29 [۲۴]
- Burick , R. J . and Osborn , J. R., "Erosive Combustion of Double- Base Solid Rocket Propellants, "4<sup>th</sup> ICRPG combustion Conference, CPIA Publ.162, Vol . 11, Dec 1967 , pp57-9 [۲۵]
- King , M.K., " A Modification of the composite propellant Erosive Burning Model of Lenoir and Robillard , " Combustion and Flame, Vol. 24,1957, pp. 365-368. [۲۶]
- Beddini, R. A., "Aerothermochemical Analysis of Erosive Burning in a laboratory Solid - Rocket Motor , " ATAA Journal , Vol . 18, Nov1980pp. 13461353 [۲۷]
- Arora ,R., Wu , X., White, F. X., and Kuo , K. K., " Erosive Burning of Composite Solid Propellants : Mechanism, Correlation, and Grain Design Application, " Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 20, Jan - Feb. 1983, pp43 48. [۲۸]
- Wu , X., Arora , R., Kumar, M., and Kuo, K. K., "An Aerothermochemical Model for Erosive Burning of Double - Base Propellants in Turbulent Shear Flow" , Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, Tokyo, June 28July 2,1982 , pp. [۲۹]
- Mukunda , H. S., "A Comprehensive Theory of Erosive Burning in Solid Rocket Propellants, "Combustion Science and Technology, Vol. 18,1978 pp. 105-118 [۳۰]
- Parkinson, R. C. and Penny, P. D., " A Transpired Boundary Layer Model of Erosive Burning, " AIAA Paper 7890,14 th Joint Propulsion Conference, Las Vegas, Nev., July 1978.. [۳۱]
- Parkinson, R. C. and Penny, P. D., " Boundary Layer Models of Erosive Burning, " AGARD Conference on Solid Rocket Motor Technology, Oslo , Norway , (AGARD CP-259) , April 2-5 , 1979, Paper10.. [۳۲]
- Hiroshi Hasegava , Shin-ichiro Tokudome , Masahisa Hanzava , Masahiro Cohno "Erosive Burning of Aluminized Composite Propellants" 39<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2023 July 2003 , Huntsville , Alabama. [۳۳]
- R.Badrnezhad,F.Rashidi , " A Review of Solid Propellant Erosive Burning",7<sup>th</sup> World Congress of Chemical Engineering,Scotland Glasgow,2005 [۳۴]
- L.A.Dickinson , F. Jackson, and A.L. Odgers "Erosive Burning of Polyurethan Propellants in Rocket Engines, 8<sup>th</sup> International Symposium on Combustion, 1960 pp.745-759. [۳۵]