

## مدلسازی عددی تاثیر بافل بر روی ناپایداری احتراق محفظه‌های احتراق

احمد صداقت<sup>۱</sup>، حمید رضا شهبازیان<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان  
E-mail: Sedaghat@cc.iut.ac.ir

**چکیده:** ناپایداری احتراق به سبب اندرکنش امواج آکوستیک با پدیده‌های احتراقی محفظه احتراق رخ می‌دهد. در این فرآیند انرژی حاصل از احتراق به امواج آکوستیکی منتقل شده و با ایجاد موج شوک، که در محیط‌های گازی با سرعتی حدود ۲۰۰۰ متر در ثانیه حرکت کرده و نسبت فشاری در حدود ۲۰ ایجاد میکند، باعث می‌شود دامنه نوسانات فشار شدیداً افزایش یابد. در این حالت ارتعاشات شدید موتور و افزایش ضریب انتقال حرارت تا ۱۰ برابر می‌تواند سیستم هدایت و کنترل را از کار بیندازد و یا موجب ذوب بدنه موتور در کسری از ثانیه شود. به این لحاظ جلوگیری از ناپایداری احتراق بسیار مهم می‌باشد. یکی از روشهای کاهش این ناپایداری استفاده از بافلها در محفظه احتراقی است. بافلها صفحاتی هستند که به صفحه انژکتور موتور متصل می‌شوند و برای کاهش اندرکنش بین امواج آکوستیک و پدیده‌های احتراقی به کار برده می‌شوند. در این تحقیق با مدل کردن محفظه احتراق توسط نرم افزار *Fluent* تاثیر بافلها در پایداری احتراق بررسی می‌شود. بواسطه پیچیدگی مسئله از معادلات دوبعدی جریان تراکم ناپذیر، مدل آشفتگی *RNG k-ε* و مدل قلیملت برای شعله غیر پیش مخلوط آرام استفاده شد و اثرات موج شوک با اعمال پالس فشاری در یک نقطه از محفظه مدل می‌شود. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که با انتخاب اندازه مناسب و مکان مناسب برای بافلها می‌توان از آنها برای پایداری احتراق استفاده نمود.

**واژه‌های کلیدی:** امواج آکوستیک، بافل، ناپایداری احتراق، محفظه احتراق.

### فهرست علائم:

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$	ضرایب ثابت معادله $\epsilon$	$t$	زمان
$E_a$	انرژی فعال سازی واکنش	$u_i$	مولفه $i$ ام سرعت
$G$	تولید در معادله انرژی جنبشی توربولانس	$x_i$	مختصه $i$ ام مکان
$h$	انتالپی	$\epsilon$	انرژی اتلاف توربولانس
$k$	انرژی جنبشی توربولانس	$\mu$	ویسکوزیته
$P$	فشار	$\mu_{eff}$	ویسکوزیته موثر
$R_u$	ثابت جهانی گازها	$\mu_t$	ویسکوزیته توربولانس
$T$	دما	$\rho$	جرم حجمی

۱- استادیار دانشکده مکانیک

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد

## ۱- مقدمه

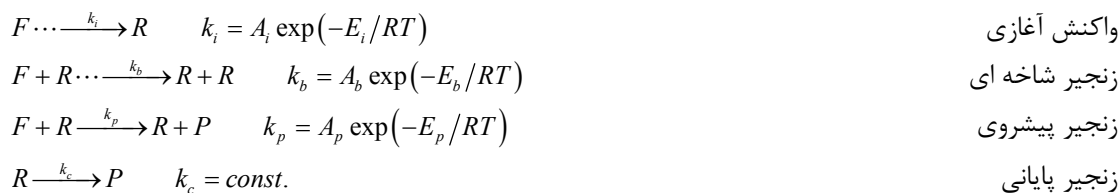
ناپایداری احتراق در بسیاری از سیستم‌های احتراقی مشاهده می‌شود بطوری که ضربات شدیدی به سیستم‌هایی نظیر موتورهای جت و محفظه‌های احتراق موشکی می‌زند. ناپایداری احتراق باعث ایجاد نوسانات جریان با دامنه زیاد، ارتعاشات مکانیکی محفظه احتراق و دیگر المانهای سیستم و افزایش نرخ انتقال حرارت به دیواره‌های محفظه احتراق می‌شود که علاوه بر آسیب‌های مکانیکی شدید ممکن است باعث ذوب شدن محفظه احتراق در کسری از ثانیه بشود. برای مطالعه ناپایداری دو روش وجود دارد: روش اول، تحلیل خطی مساله ناپایداری و روش دیگر، شبیه‌سازی عددی معادلات گاز دینامیکی حاکم بر مساله است. در روش تحلیل خطی مساله، با فرض اینکه اغتشاشات موجود در جریان و اثر آن بسیار کوچک است معادلات حاکم خطی شده و حل می‌شوند. با استفاده از این روش فرکانسهای اغتشاشات و نرخ رشد آنها و مرزهای ناپایداری با دقت خوبی بدست می‌آیند. از سوی دیگر در محدوده غیر خطی، روش عددی اطلاعات کامل تری را در مورد ناپایداری ارائه می‌دهد. اما زمان اجرای طولانی محاسبات اشکال اصلی این روش خواهد بود.

اولین مطالعات نظری مربوط به ناپایداری توسط کارلی [۱] در سال ۱۹۹۰ انجام گرفت. در مطالعات او علاوه بر تعیین مستقیم مرزهای پایداری، نرخ رشد مدهای ناپایداری و فرکانس‌ها برای گستره وسیعی از پارامترهای مهم بدست می‌آید. شرت و همکاران [۲] نیز در پی روشن کردن نقش طبیعت واکنشهای ناپایداری با استفاده از واکنش سه مرحله‌ای به مدل سازی عددی یک بعدی پرداختند. کیم و ویلیامز [۳] مدلسازی نظری لاینرها و اثر آن بر روی میرایی امواج مختلف در حالتی که شرایط کاری آنها تشدید یا غیر تشدید است را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب میرایی لاینرها، محدوده پایداری موتور افزایش می‌یابد. این اثر بویژه در فرکانسهای بالا قابل توجه است. اثر حفره‌های آکوستیکی بر روی پایداری سازی دینامیکی موشکها به صورت نظری و تجربی توسط دوبرگو و زنوگ [۴] مورد مطالعه قرار گرفته است. چین و همکارانش [۵] به صورت نظری در مورد متناسب کردن تزریق سوخت در پایداری احتراق تحقیقاتی انجام داده‌اند. مظاهری [۶] در سال ۲۰۰۴ مطالعاتی در مورد ناپایداری احتراق بر اساس واکنشهای آغازی احتراق انجام داده است. رستمی و همکاران [۷] نیز مطالعاتی در زمینه اثر بافلها در احتراق سوخته‌های مایع انجام داده‌اند.

در کار حاضر، پایداری احتراق بکمک بافل برای یک محفظه احتراق با استفاده از نرم افزار Fluent شبیه‌سازی شده است. در ابتدا مدل سینتیکی و مکانیزم احتراق شرح داده می‌شود و سپس با بیان معادلات حاکم بر جریان دو بعدی برای یک محفظه احتراقی ارائه می‌شود. در ادامه حل عددی معادلات و شرایط مرزی تشریح می‌شود و سپس نتایج عددی برای محفظه احتراق و تاثیر بافل‌ها در پایداری احتراق ارزیابی می‌گردد. در نهایت بحث و نتیجه‌گیری این کار پژوهشی ارائه می‌گردد.

## ۲- مدل سینتیکی و مکانیزم احتراق

بطور کلی یک مکانیزم احتراق واقعی از واکنشهای مقدماتی متعددی تشکیل شده است که تعداد آنها برای سوخته‌های هیدروکربنی نظیر متان بیش از ۱۰۰ واکنش است. واکنشهای مقدماتی را میتوان به چهار دسته زنجیره‌های آغازی، پیشروی، شاخه‌ای و پایانی مطابق زیر طبقه بندی نمود [۶]:



که در واکنشهای فوق  $F$ ،  $R$  و  $P$  به ترتیب سوخت، رادیکال، و فرآورده‌های واکنش هستند. به جز در واکنش پایانی که

نرخ واکنش ثابت است، نرخ واکنش بقیه واکنشها از رابطه آرنیوس بدست می آید. در این بررسی، سوخت تغذیه محفظه احتراق  $C_5H_{12}$  در نظر گرفته شده است که توسط ۳ مشعل وارد محفظه احتراق می‌شود و معادله احتراق کامل آن مطابق زیر است.



به منظور مدل‌سازی احتراق از مدل شعله غیرپیش مخلوط<sup>۱</sup> و استفاده از مدل فلیملت آرام استفاده می‌شود. مکانیزم واکنش احتراق با در نظر گرفتن ۷ نمونه جرمی  $NO, N_2, H_2O, CO, CO_2, O_2, C_5H_{12}$  حل شده است.

### ۳- معادلات حاکم بر جریان

در حالت واقعی، جریان درون موتور سوخت مایع، یک جریان مغشوش، تراکم پذیر، واکنشی و دو فازی است. مدل‌سازی چنین جریانی به دلیل پیچیدگی‌های زیاد آن، بویژه در حالت گذرا بسیار دشوار می‌باشد. پدیده‌هایی همچون شکست جت مایع، ایجاد قطرات و اندرکنش آنها، بر این پیچیدگی می‌افزاید. به همین دلیل، تنها پدیده‌های اختلاط سوخت و اکسیدکننده گازی و احتراق آنها مدل‌سازی شده است.

برای انجام محاسبات احتراقی، بایستی میدان جریان و میدان دما و نمونه‌های شیمیائی معلوم و مشخص باشند. لذا نیاز به حل معادلات حاکم بر سیستم‌های احتراقی است که شامل معادلات جرم، مومنتوم، انرژی جنبشی توربولانس و اتلاف آن، کسرهای مخلوط و واریانس آنها، برای جریان تراکم ناپذیر و پایدار می‌باشد. معادلات فوق‌رانی توان به شکل عمومی به فرم زیر نوشت:

$$\nabla \cdot (\bar{\rho} \mathbf{u} \phi - \Gamma_\phi \nabla \phi) = S_\phi \quad (2)$$

که در آن  $\phi$  نماینگر متغیر اصلی در معادلات انتقال می‌باشد.  $\Gamma_\phi$  ضریب دیفیوژن موثر و  $S_\phi$  ترم منبع می‌باشد. جدول (۱) خلاصه‌ای از متغیرها و ضرایب دیفیوژن و ترم منبع مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱: ضرایب دیفیوژن و ترم منبع برای معادله انتقال

معادله	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
پیوستگی	$l$	$0$	$0$
مومنتوم	$u_i$	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{eff} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i}$
انرژی جنبشی توربولانس	$k$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G^* - \rho \varepsilon$
انرژی اتلاف توربولانس	$\varepsilon$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$(C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \varepsilon / k$
کسر مخلوط	$f_i$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_f}$	$0$

جهت حل معادله انتقال گونه‌های جرمی از یک معادله عمومی که دارای تمام قسمت‌های جابجایی، پخشی، تولید و مصرف گونه جرمی است استفاده شد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial}{\partial x_j}(\phi) \right) + S_\phi \quad (3)$$

همچنین برای محاسبه احتراق در جریان توربولانس از تابع چگالی احتمال استفاده می‌شود. چندین تابع چگالی احتمال برای احتراق مغشوش بکار می‌رود ولی در اینجا از تابع  $\beta$  استفاده شده است [۸]، که به صورت زیر بیان می‌گردد:

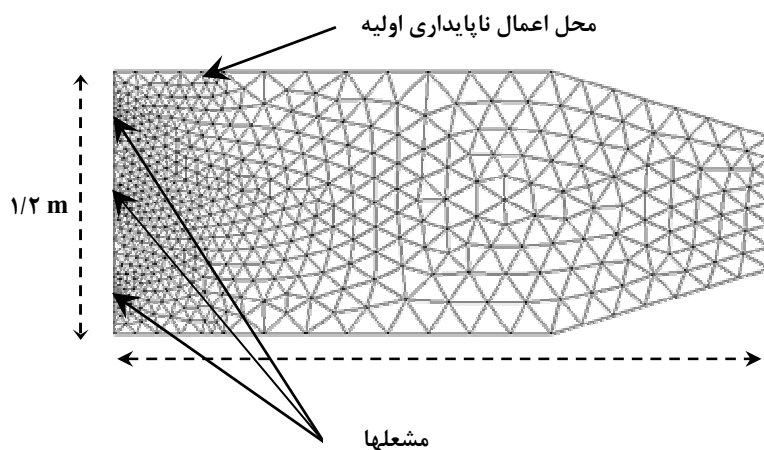
$$\beta(f_i) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} f_i^{a-1} (1-f_i)^{b-1} = \frac{f_i^{a-1} (1-f_i)^{-1}}{\int f_i^{a-1} (1-f_i)^{b-1} df_i} \quad (4)$$

که در آن  $f_i$  پارامترهای مخلوط و  $a$  و  $b$  از روابط زیر به مقدار متوسط نسبت مخلوط،  $\bar{f}_i$ ، و واریانس،  $\sigma$ ، آن مربوط می‌شود.

$$a = \bar{f}_i \left( \frac{\bar{f}_i(1-\bar{f}_i)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad b = (1-\bar{f}_i) \left( \frac{\bar{f}_i(1-\bar{f}_i)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (5)$$

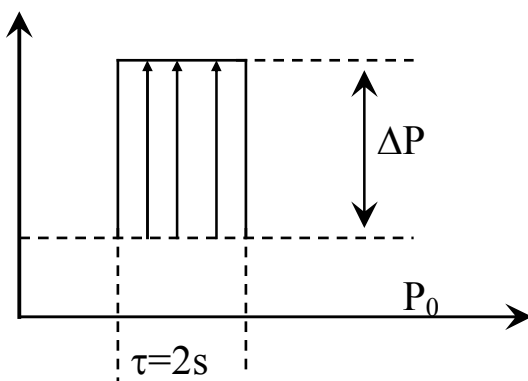
#### ۴- حل عددی معادلات و اعمال شرایط مرزی

شبیه‌سازی عددی برای یک محفظه احتراقی دو بعدی با طول ۲/۹۵ m و عرض ۱/۲ m مطابق شکل (۱) توسط نرم افزار FLUENT انجام شد. سوخت و هوا به صورت عمود بر صفحه مشعلها و از ورودی‌های جداگانه ای وارد محفظه احتراق می‌شوند [۹]. این هندسه دو بعدی در واقع برش طولی از محفظه احتراق یک موشک است که در آن یک ردیف انژکتورهای سوخت و اکسید کننده قرار دارند.



شکل ۱: محفظه احتراق و ورودی‌های سوخت و هوا

فرض گردیده است که سوخت مصرفی پنتان گازی  $C_5H_{12}$  و اکسید کننده اکسیژن گازی باشد که توسط ۳ مشعل وارد محفظه احتراق می‌شود. در ابتدا جریان دو بعدی و دائمی درون محفظه احتراق حل می‌شود و پس از رسیدن به جواب حالت دائمی از یک پالس فشاری برای بررسی حالت غیر پایدار جریان استفاده شده است. شکل این پالس فشاری به صورت یک پالس مربعی مطابق شکل (۲) انتخاب شده است.



شکل ۲: نوع اعمال تحریک

پس از اعمال تحریک، جریان درون محفظه به صورت گذرا توسط نرم افزار حل می‌گردد و رشد و یا از بین رفتن نوسانات فشاری در محفظه بررسی می‌شود. در صورتی که نوسانات فشار تغییر قابل توجه ای نکنند، این بدان معنی است که کارکرد موتور در مرز ناپایداری است. در صورتی که نوسانات فوق تقویت شود، وجود شرایط ناپایداری قابل استنتاج می‌باشد. چنانچه شرایط کارکرد موتور بعد از اعمال تحریک مجدداً به حالت پایدار برسد، مشخص است که مکانیزمهای میرا کننده درون موتور توانسته اند شرایط کارکرد را پایدار نمایند [۷].

با حل جریان گذرا بعد از تحریک فشاری، وضعیت پایداری بررسی می‌شود و حضور یا عدم حضور نوسانات در محفظه با گرفتن فشار یک نقطه معین از محفظه مشخص می‌شود. در مرحله بعد از یک بافل با طول معین در محفظه استفاده شده و مراحل فوق تکرار می‌گردد. با مطالعه دامنه نوسانات فشاری، می‌توان از میزان اثر بافل بر روی پایداری احتراق اطلاع پیدا کرد.

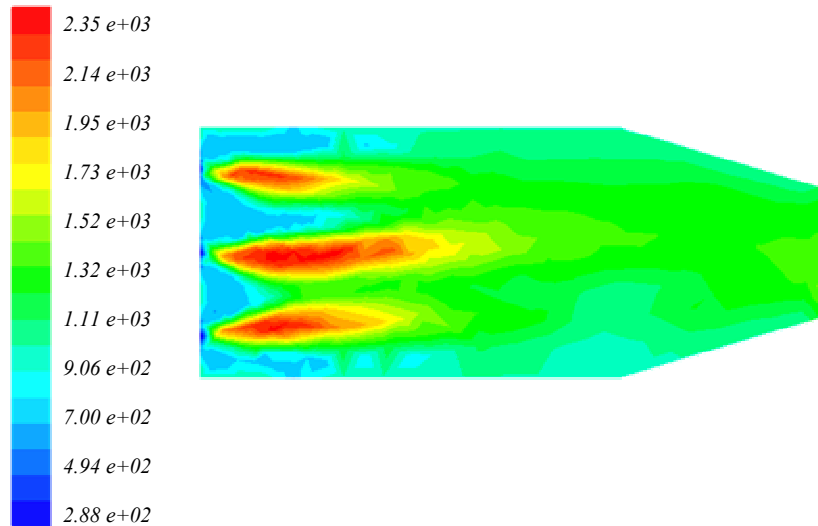
با توجه به ابعاد مشخص شده اتاق احتراق و پیچیدگی های هندسی مسئله شبکه محاسباتی به صورتی انتخاب شده است که هم نواحی کوچکی همچون ورودی های سوخت و هوا را شبکه بندی کند و هم از نظر محاسباتی از دقت کافی و قابل قبولی برخوردار باشد. شکل (۱) نمایی از محفظه احتراق مورد مطالعه و شبکه محاسباتی ایجاد شده را نشان می‌دهد، در این شکل می‌توان ورودی‌های سوخت و هوا و شبکه بندی محفظه احتراق را مشاهده نمود. شرایط مرزی ورودی سوخت و هوا در جدول (۲) لیست شده است. دیواره های محفظه احتراق در دمای ثابت ۱۰۰۰ درجه کلوین فرض شده است. در حل عددی حاضر، از مدل توربولانس RNG k-e استفاده شده است. جملات معادلات مومنتوم و اغتشاش به وسیله روش توانی و جملات معادله انرژی و کسر مخلوط به وسیله روش بالادست مرتبه دوم گسسته سازی می‌گردد و الگوریتم بکار رفته برای حل SIMPLE است. برای خروجی محفظه احتراق از شرط درونیابی استفاده شده است.

جدول ۲: شرایط مرزی ورودی

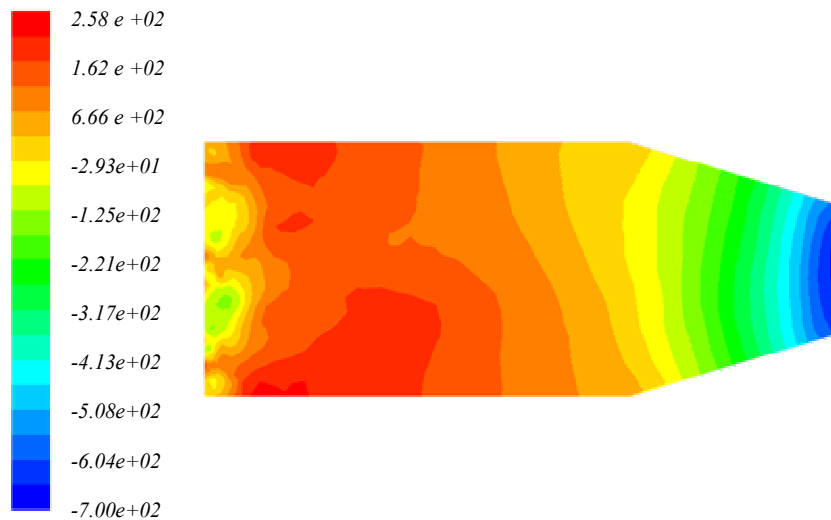
$T_{Fuel}=298 K$	$\dot{m}_{Fuel} = 0.1kg / s$	Mass Flow Inlet	سوخت
$T_{air}=688 K$	$\dot{m}_{air} = 10kg / s$	Mass Flow Inlet	هوا

## ۵- نتایج عددی و بحث پیرامون نتایج

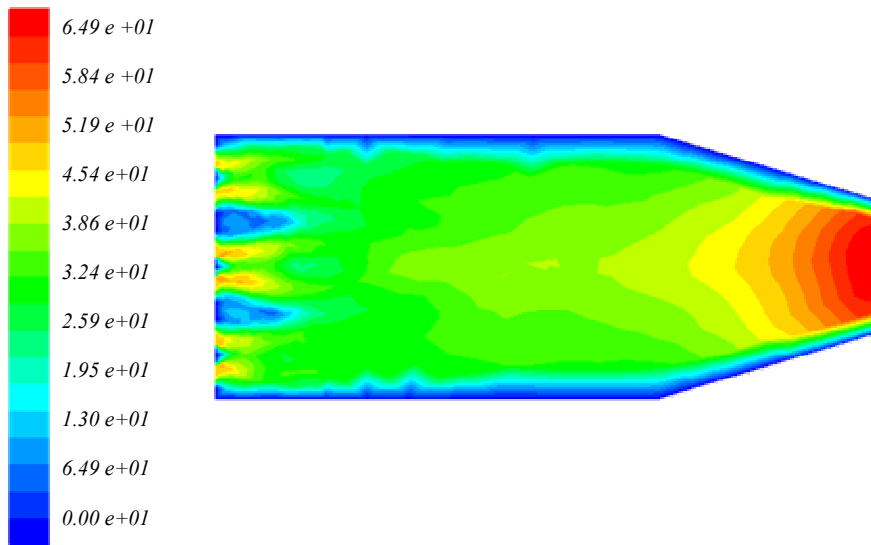
برای محفظه احتراق بدون حضور بافل ها، جریان دو بعدی تراکم ناپذیر در حالت دائمی طبق شرایط اولیه درج شده در جدول (۲) حل شده است. شکل (۳) کانتورهای دما در مقطع محفظه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود. در ابتدای محفظه و در ناحیه اختلاط سوخت و هوا واکنشهای احتراقی صورت گرفته و توده‌های سیال حاوی گازهای داغ حاصل از احتراق به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کند. شکل (۴) و (۵) نیز به ترتیب کانتورهای فشار و سرعت را در مقطع محفظه احتراق نشان می‌دهند



شکل ۳: توزیع دما (K) بر حسب موقعیت مکانی در محفظه احتراق



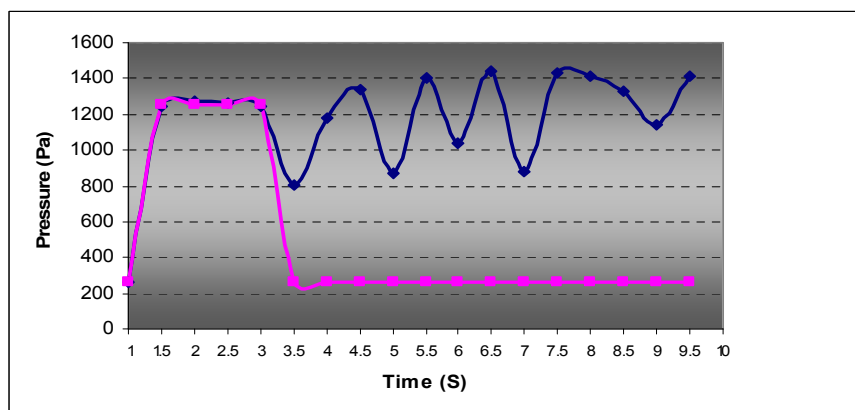
شکل ۴: توزیع فشار (Pa) بر حسب موقعیت مکانی در محفظه احتراق



شکل ۵: توزیع سرعت (m/s) بر حسب موقعیت مکانی در محفظه احتراق

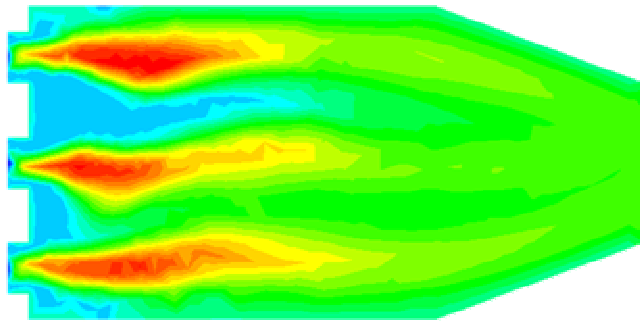
## ۶- تاثیر بافل ها در ناپایداری احتراق

تاثیر وجود بافلها در پایداری احتراق مطابق زیر بررسی گردید. در ابتدا حل جریان حالت دائمی برای محفظه احتراق بدون بافل بدست می آید. سپس با اعمال اغتشاش پله ای (پالس فشاری)، حل گذرای جریان برای محفظه احتراق بدست می آید. با سنجش فشار یک نقطه از محفظه احتراق مطابق نمودار (۶) مشاهده می شود که با اعمال فشاری متناسب با ۵ برابر فشار کاری سیستم به مدت ۲ ثانیه، دامنه نوسانات فشاری سیستم نه تنها میرا نمی شود بلکه به صورت نوسانات غیر منظمی در بستر زمان پیش می رود.

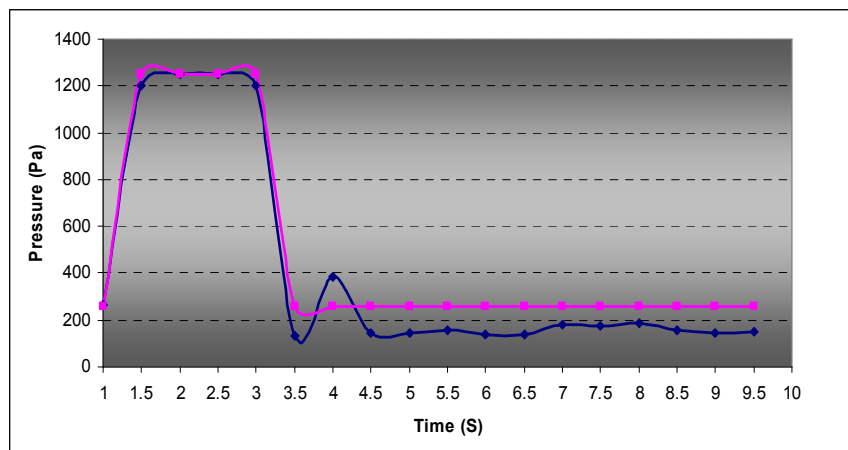


شکل ۶: نمودار فشار در حالت گذرا بدون استفاده از بافل

در مرحله بعدی با قرار دادن بافلها ئی به طول ۱۰ cm (حالت ۱) و ۲۰ cm (حالت ۱) از صفحه مشعلها مراحل حل حالت دائم و گذرای سیستم را برای مشاهده اثر بافل در میرا نمودن و یا تقویت شدن دامنه نوسانات تکرار شد. کانتور های توزیع دما بهمراه شکل و موقعیت بافل تعبیه شده و همینطور نمودار نوسانات فشار در بستر زمان در شکلهای (۷) و (۸) برای بافل حالت (۱) و در شکلهای (۹) و (۱۰) برای بافل حالت (۲) ترسیم شده است. در مرحله بعدی نیز تاثیر بافل را در افزایش پایداری احتراق در حالتی که بافلی به طول ۱۰ cm در دیواره محفظه احتراق قرار داشته باشد مورد بررسی قرار گرفته است. مجددا کانتور های توزیع دما بهمراه شکل و موقعیت بافل تعبیه شده و نمودار نوسانات فشار در بستر زمان در شکلهای (۱۱) و (۱۲) ارائه شده است. ملاحظه می شود که در حالت ۱ نوسانات فشار سریعاً میرا شده است. در حالیکه در دو حالت دیگر پالس فشاری با نوسانات بیشتری میرا می شوند و یا با دامنه نوسانات کوچک در زمان طولانی تری ادامه می یابند. ولی در مجموع میرائی ناپایداری احتراق بکمک هندسه مناسب بافل امکان پذیر و قابل بهینه شدن است.

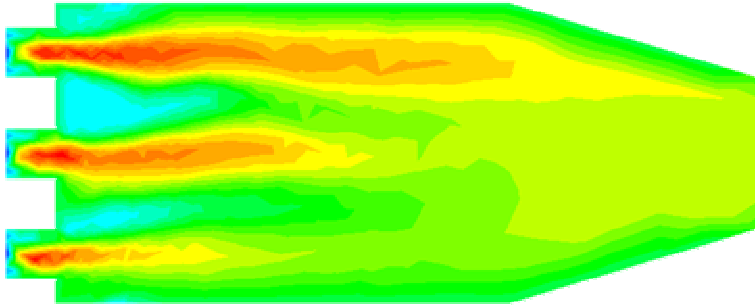


شکل ۷: اندازه و موقعیت نصب بافل در محفظه احتراق در حالت ۱

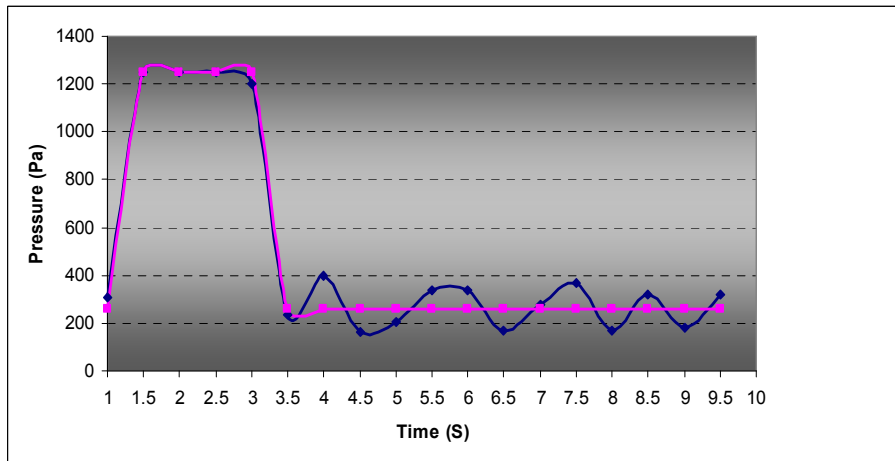


شکل ۸: نمودار فشار در حالت گذرا با استفاده از بافل ۱۰ cm در صفحه مشعلها

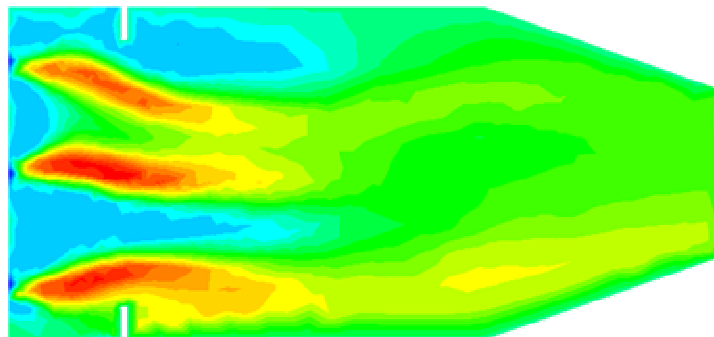




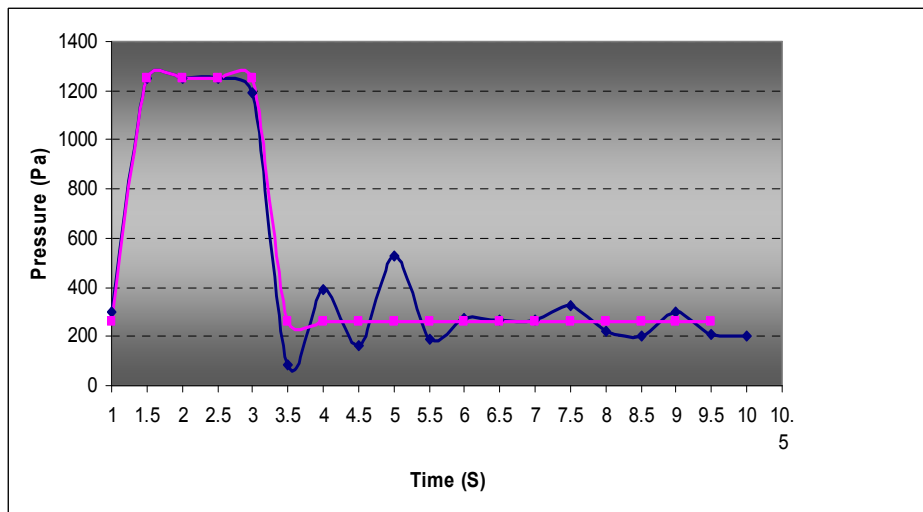
شکل ۹: اندازه و موقعیت نصب بافل در محفظه احتراق در حالت ۲



شکل ۱۰: نمودار فشار در حالت گذرا با استفاده از بافل ۲۰ cm در صفحه مشعلها



شکل ۱۱: اندازه و موقعیت نصب بافل در محفظه احتراق در حالت ۳



شکل ۱۲: نمودار فشار در حالت گذرا با استفاده از بافل ۱۰ cm در دیواره محفظه احتراق

## ۷- نتیجه گیری

در این کار تحقیقی، پایداری احتراق پس از اعمال پالس فشاری در یک محفظه احتراق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عددی نشان می‌دهد که در حالتی که محفظه احتراق از هیچگونه بافلی استفاده نمی‌کند، نوسانات فشار تقویت شده و شرایط ناپایداری را برای محفظه احتراق ایجاد می‌کند. حال آنکه در حالت وجود بافلی به اندازه ۱۰ سانتی متر، نتایج عددی نشان می‌دهد که نوسانات فشار پس از اعمال پالس فشاری سریعاً میرا شده و شرایط احتراقی درون موتور به حالت پایداری رسیده است. برای بافلی به اندازه ۲۰ سانتی متر، نوسانات فشاری کوچکی در زمان طولانی تری ادامه می‌یابد ولی پالس فشاری اولیه سریعاً محدود و منقطع می‌شود. تقریباً همین نتایج را برای بافل‌هایی بر روی دیواره موتور به طول ۱۰ سانتیمتر می‌توان مشاهده کرد. به طور کلی مشاهده می‌گردد که استفاده از بافل در دیواره مشعلها علاوه بر پایداری احتراقی باعث بهبود شعله نیز خواهد شد. اما استفاده از بافل در بدنه محفظه احتراق مشکل اورهیت شدن بافل را ایجاد خواهد کرد. لازم به ذکر است که اندازه بافل بکار رفته در محفظه احتراق در سرعت میرایی ارتعاشات ایجاد شده تاثیر مهمی خواهد داشت.

## مراجع

- [1] Lee, H. I. and Stewart, D. S., "Calculation of linear detonation stability: one dimension instability on plan detonation", J. Fluid Mech., Vol 216, PP 103-132, 1990.
- [2] Shert, M. and Quirk, J.J., " On the nonlinear stability and detonation of a detonation wave for a model three step chain-branching reaction", J. Fluid Mech., 319, PP. 89-119, 1997.
- [3] Kim, J.S. and Williams, F.A., "Effects of Non-Homogeneities on The Eigenmodes of Acoustic Pressure in Combustion Chambers", Journal of Sound and Vibration, 209 ,PP 821-843, 1998.
- [4] Dobrego, K.V. and Zhdanok, S.A., "Experimental and analytical investigation of the gas filtration combustion inclination instability " International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 44, Issue 11, pp 2127-2136, 2001.
- [5] Chien, C.C. and Steve D. H., "Contributions of atomization to F-1 engine combustion instabilities" Engineering Analysis with Boundary Elements, Volume 28, Issue 9, pp 1045-1053, 2004.

[۶] مظاهری و هاشمی " تحلیل خطی ناپایداری دتونیشن با استفاده از مدل سینتیکی چهار مرحله ای " سیزدهمین کنفرانس مکانیک اصفهان، ۱۳۸۳.

[۷] رستمی و ابراهیمی " مدل سازی اثر بافل بر پایداری احتراق سوخت مایع " نهمین کنفرانس دینامیک شاره ها، شیراز، ۱۳۸۳.

- [8] Bilger, R.W., "Turbulent diffusion flame", Annual Rev. Fluid Mech, 21, pp 101-135, 1989.
- [9] Habbad, M. and Leonessa, A., "State space modeling and robust order control of combustion instabilities", Journal of the Franklin Institute, 336, pp 1283-1307, 1999.
- [10] J. Anthoine, M. Mettenleiter, O. Repellin, J. , M. Buchlin and S. Candel "Influence of adaptive control on vortex-driven instabilities in a scaled model of solid propellant motors", Journal of Sound and Vibration, Volume 262, Issue 5, pp 1009-1046, 2003.