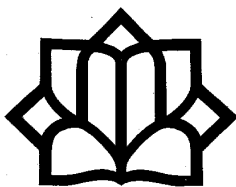


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

## پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مکانیک - تبدیل انرژی

## عنوان:

بررسی عددی و تجربی احتراق پیش آمیخته آشفته در مشعل های سرعت بالا

## استاد راهنما:

دکتر عبدالمهدی هاشمی

## استاد مشاور:

مهندس ایوب عادل

## به وسیله:

حامد علی زاده نودهی

## تاییدیه اساتید

تقدیم به همسر م

## تشکر و قدردانی

در ابتدا بر خود لازم می‌دانم مراتب تشکر و قدردانی خود را از استاد ارجمند آقای دکتر هاشمی، استاد راهنما، اعلام دارم که با بهره‌مندی از راهنمایی‌های علمی ایشان درک صحیح جوانب مختلف این پایان‌نامه امکان‌پذیر گشت و همکاری صمیمانه ایشان در تمام طول پروژه بود که مسیر ادامه این تحقیق را هموار می‌نمود

همچنین از زحمات و راهنمایی‌های استاد ارجمند آقای مهندس عادل، استاد مشاور، نهایت سپاس را دارم که بدون حمایت‌های بی‌دریغ ایشان انجام این پروژه میسر نبود. امید است که در فرصتی دوباره، شرایط برای استفاده هرچه بیشتر از شخصیت علمی ایشان ایجاد گردد.

در پایان از زحمات اساتید ممتحن، آقای دکتر عباسیان و آقای دکتر رحمتی نهایت سپاس را دارم.

## چکیده:

این تحقیق به بررسی و مطالعه تجربی و عددی یک نمونه مشعل پیش‌آمیخته با سرعت بالا می‌پردازد. بررسی تجربی شامل اندازه‌گیری طول شعله، بدست آوردن میدان دما و بررسی محدوده پایداری می‌شود. میدان دما به کمک 8 عدد ترموکوپل که در موقعیت‌های مختلف قرار گرفته اند اندازه‌گیری می‌شود. شبیه‌سازی عددی توسط روش حجم محدود و با استفاده از معادلات متوسط گیری شده ناویر استوکس (RANS) به کمک نرم افزار *FLUENT* صورت می‌گیرد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی شامل میدان دما، میدان سرعت و تغییرات متغیر پیشرفت واکنش هستند. به منظور مدل‌سازی آشفستگی، مدل‌های  $k-\varepsilon$  استاندارد،  $RNG k-\varepsilon$ ،  $k-\varepsilon$  تحقق‌پذیر و دو روش دیگر که با تغییر ثابت‌های تجربی مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد، توسط تورپین و ترویس و مورگانس استفاده شده‌اند، بررسی و مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد، بعنوان بهترین مدل برای مدل‌سازی مشعل سرعت بالا تعیین شد. برای مدل‌سازی احتراق از مدل زی‌مونت استفاده شده است و به منظور اعتبارسنجی این روش با استفاده از روش‌های عددی، نتایج تجربی موجود در دیگر مقالات بدست آمد. سپس شبیه‌سازی مکانیزم اختلاط سوخت و هوا در سیستم اختلاط مشعل به صورت سه بعدی انجام شد. براساس نتایج بدست آمده، جریان خروجی از سیستم اختلاط مخلوط کامل است. شبیه‌سازی مشعل سرعت بالا در دو هندسه محفظه احتراق و فضای باز انجام شد. در هندسه اول، مقایسه تغییرات متغیر پیشرفت واکنش روی محور محفظه در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف نشان داد که با افزایش نسبت هم‌ارزی، شیب تغییرات افزایش می‌یابد و متغیر پیشرفت واکنش سریعتر افزایش می‌یابد. همچنین، در محفظه احتراق، با افزایش فاصله محوری، نواحی چرخشی در کنار دیواره جانبی محفظه شکل می‌گیرند و در حدود  $x/D=20$  به بالاترین قدرت می‌رسند. نتایج عددی میدان دما در فضای باز با نتایج تجربی این تحقیق مقایسه شد. نتایج نشان دادند که در فاصله بزرگتر از  $x/D=5/5$  نتایج از همخوانی خوبی برخوردار هستند و در فواصل کوچکتر از  $x/D=5/5$  نتایج قابل قبول هستند. در نهایت، عملکرد مدل زی‌مونت رضایت بخش است و جریان احتراقی در مشعل سرعت بالا به خوبی توسط این مدل شبیه‌سازی می‌شود.

**کلمات کلیدی:** مشعل پیش‌آمیخته سرعت‌بالا، شبیه‌سازی عددی میدان دما، احتراق

پیش‌آمیخته، مدل زی‌مونت

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
1	فصل 1 مقدمه
2	1-1-1- مقدمه .....
3	2-1-2- احتراق .....
5	2-2-1- آشفته‌گی .....
11	3-1-3- مشعل‌های صنعتی .....
13	1-3-1- مشعل‌های نفوذی .....
13	2-3-1- مشعل‌های اتمسفریک .....
14	3-3-1- مشعل‌های دمشی .....
18	5-3-1- مشعل‌های مخلوط ماشینی .....
18	6-3-1- مشعل‌های سرعت پایین .....
20	7-3-1- مشعل‌های سرعت متوسط .....
21	8-3-1- مشعل‌های سرعت بالا .....
24	4-1-4- تاریخچه تحقیق .....
27	5-1-5- هدف این تحقیق .....
29	فصل 2 روش‌های عددی
30	1-2-1- مقدمه .....
31	2-2-2- نرم‌افزار فلوئنت .....
33	2-2-2-2- مراحل حل مسئله در فلوئنت .....
34	3-2-2-3- حل‌کننده‌های فلوئنت .....
38	3-2-3-2- مدلسازی احتراق .....
38	1-3-2-1- مدل زی‌مونت .....
42	4-2-4- مدلسازی آشفته‌گی .....
46	5-2-5- مدلسازی تشعشع .....
47	6-2-6- جمع‌بندی .....
49	فصل 3 معرفی دستگاه آزمایش

50.....	1-3-1- مقدمه
50.....	2-3-2- معرفی مشعل سرعت بالا
51.....	2-2-3- مکانیزم‌های پایدارسازی مشعل
54.....	3-3-3- ابزارهای اندازه‌گیری
54.....	1-3-3- اندازه‌گیری دما
55.....	2-3-3- اندازه‌گیری طول شعله
55.....	3-3-3- اندازه‌گیری دبی

## 58 فصل 4 نتایج تجربی

59.....	1-4-1- مقدمه
59.....	2-4-2- میدان دما
61.....	3-4-3- طول شعله
63.....	4-4-4- حدپایداری شعله
64.....	5-4-5- نمونه کاربرد
66.....	6-4-6- جمع‌بندی

## 67 فصل 5 نتایج عددی

68.....	1-5-1- مقدمه
68.....	2-5-2- اعتبارسنجی حل (مطالعه اول)
68.....	1-2-5- مقایسه مدل‌های زی‌مونت و ائتلاف ادی‌ها
74.....	2-2-5- تاثیر مدل آشفستگی
77.....	3-5-3- شبیه‌سازی سیستم اختلاط (مطالعه دوم)
80.....	4-5-4- مدلسازی مشعل سرعت بالا در محفظه احتراق (مطالعه سوم)
80.....	1-4-5- انتخاب شبکه مناسب
82.....	2-4-5- میدان دما
85.....	3-4-5- میدان سرعت
87.....	5-5-5- مدلسازی مشعل سرعت بالا در فضای باز (مطالعه چهارم)
87.....	1-5-5- انتخاب شبکه
89.....	6-5-6- مقایسه نتایج عددی و تجربی
92.....	7-5-7- جمع بندی

## 93 فصل 6 نتیجه‌گیری نهایی



94.....نتایج 1-6-1

94 .....نتایج تجربی 1-1-6

94 .....نتایج عددی 2-1-6

95.....پیشنهادات 2-6-2

97 منابع

101 پیوست ((الف)): مدل ائتلاف ادی‌ها

103 پیوست ((ب)): جزییات نقشه مشعل سرعت بالا

## فهرست شکل‌ها

### صفحه

### عنوان

- شکل 1-1-1- تاریخچه و پیش‌بینی تولید انرژی جهان از منابع انرژی مختلف ..... 2
- شکل 1-2- خصوصیات شعله آرام پیش‌آمیخته ..... 4
- شکل 1-3- توزیع گونه‌ها و دما در شعله آرام نفوذی ..... 5
- شکل 1-4- طیف انرژی آشفستگی ..... 6
- شکل 1-5- دیاگرام رژیم احتراق پیش‌آمیخته کلاسیک ..... 9
- شکل 1-6- برهمکنش شعله و ادی ..... 10
- شکل 1-7- عکسی از یک مشعل اتمسفریک ..... 14
- شکل 1-8- برشی از یک مشعل اتمسفریک ..... 14
- شکل 1-9- برشی از یک مشعل پیش‌آمیخته دمشی ..... 15
- شکل 1-10- برشی از یک مشعل گازسوز غیرپیش‌آمیخته دمشی ..... 16
- شکل 1-11- مشعل پکیج ..... 17
- شکل 1-12- برشی از یک مشعل گسترده ..... 17
- شکل 1-13- مشعل پکیج گازوئیل سوز ..... 18
- شکل 1-14- شعله گاز مشعل سرعت پائین ..... 19
- شکل 1-15- شعله گازوئیل مشعل سرعت پائین ..... 19
- شکل 1-16- شعله گاز مشعل سرعت متوسط ..... 20
- شکل 1-17- شعله گازوئیل مشعل سرعت متوسط ..... 21
- شکل 1-18- شعله گاز مشعل سرعت بالا ..... 21
- شکل 1-19- شعله گازوئیل مشعل سرعت بالا ..... 22
- شکل 2-1- میدان جریان لوله که به تعدادی حجم کنترل تقسیم شده است. .... 31
- شکل 2-2- ساختمان کلی نرم‌افزار فلونت ..... 33
- شکل 2-3- مراحل الگوریتم حل‌کننده براساس فشار جداشده ..... 36
- شکل 2-4- مراحل الگوریتم حل‌کننده براساس فشار وابسته ..... 37
- شکل 3-1- اجزاء مشعل سرعت بالا ..... 51
- شکل 3-2- نازل مشعل سرعت بالا ..... 52
- شکل 3-3- نمونه ای از اندازه‌گیری دما در بازه زمانی 260 ثانیه ..... 55
- شکل 3-4- ابزارهای اندازه‌گیری ..... 57
- شکل 4-1- نمودار تغییرات دما در نسبت هم‌ارزی 1/96 ..... 60
- شکل 4-2- نمودار تغییرات دما در مکان‌های مختلف در نسبت هم‌ارزی 1/05 ..... 60
- شکل 4-3- طول شعله الف-نسبت هم‌ارزی 0/96،  $L=23.6$ ، ب-نسبت هم‌ارزی  $L=24$ ، 1/05 ..... 61

- شکل 4-4- خطوط هم‌دما در نسبت هم‌ارزی های الف-0/96 و ب-1/05..... 61
- شکل 4-5- تغییرات طول شعله با قدرت مشعل ..... 62
- شکل 4-6- تغییرات حد پایداری با قدرت مشعل ..... 63
- شکل 4-7- تغییرات دما در جهت شعاعی در فاصله 5 سانتیمتر از دیوار قائم ... 65
- شکل 4-8- الف-نسبت هم‌ارزی 0/96، طول شعله 23.6 میلیمتر، ب-نسبت هم‌ارزی 1/4، طول شعله 52.2 میلیمتر ..... 66
- شکل 5-1- هندسه مسئله بن‌هاوی ..... 69
- شکل 5-2- بررسی استقلال از شبکه نتایج برای مدل زیمونت ..... 71
- شکل 5-3- نمودار تغییرات دما در مقطع‌های مختلف در نسبت هم‌ارزی 0/77. 72
- الف- $x/h=3/5$ ، ب- $x/h=10$  ..... 72
- شکل 5-4- مقایسه شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی میدان دما در نسبت هم- 73
- ارزی 0/95 ..... 73
- شکل 5-5- پیش‌بینی مولفه افقی سرعت توسط مدل زیمونت در نسبت هم‌ارزی 0/9 ..... 74
- شکل 5-6- پیش‌بینی تغییرات دمای مرکز محفظه توسط مدل‌های مختلف آشفستگی ..... 76
- شکل 5-7- شدت آشفستگی،  $I$ ، در میدان حل،  $I_{max}$  در ناحیه چرخشی بعد از پله بوجود می‌آید ..... 76
- شکل 5-8- شبکه سیستم اختلاط مشعل سرعت‌بالا ..... 78
- شکل 5-9- نتایج بررسی استقلال از شبکه سیستم اختلاط ..... 78
- شکل 5-10- تغییرات کسر حجمی متان در هنگام عبور از سیستم اختلاط ..... 79
- شکل 5-11- شبکه 3 بعدی مشعل سرعت‌بالا و محفظه احتراق ..... 81
- شکل 5-12- شبکه هندسه متقارن محوری مشعل و محفظه احتراق ..... 81
- شکل 5-13- نتایج مطالعه استقلال از شبکه در  $x/D=1$  ..... 82
- شکل 5-14- تغییرات منحنی دما با افزایش فاصله محوری در نسبت هم‌ارزی 0/77 ..... 84
- شکل 5-15- تغییرات منحنی دما با افزایش فاصله محوری در نسبت هم‌ارزی 0/9 ..... 84
- شکل 5-16- تغییرات متغیر پیشرفت واکنش بر روی محور ..... 85
- شکل 5-17- تغییرات منحنی سرعت محوری با افزایش فاصله محوری الف- نسبت هم‌ارزی 0/77 ب-نسبت هم‌ارزی 0/9 ..... 86
- شکل 5-18- هندسه مدلسازی مشعل در فضای باز ..... 88
- شکل 5-19- نتایج مطالعه استقلال از شبکه در  $x/D=1$  ..... 88
- شکل 5-20- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی در نسبت هم‌ارزی 0/96. تغییرات دما در جهت شعاع در  $x/D=2$  ..... 89

- شکل 5-21- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی در نسبت هم‌ارزی  
 0/96 تغییرات دما در جهت شعاع در  $x/D=5/5$  ..... 90
- شکل 5-22- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی در نسبت هم‌ارزی  
 0/96 تغییرات دما در جهت شعاع در  $x/D=7/7$  ..... 90
- شکل 5-23- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی در نسبت هم‌ارزی  
 0/96 تغییرات دما در جهت شعاع در  $x/D=13/5$  ..... 91
- شکل 5-24- تغییرات سرعت با افزایش فاصله محوری در نسبت هم‌ارزی 0/96  
 در فضای باز ..... 91
- شکل ب-1- نقشه سرمشعل ..... 104
- شکل ب-2- نقشه نازل ..... 105

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
44	جدول 1-2- مدل‌های آشفتگی <i>RANS</i> .....
45	جدول 2-2- رفتار و موارد استفاده مدل‌های آشفتگی <i>RANS</i> .....
47	جدول 3-2- مدل‌های تشعشع.....
70	جدول 1-5- اطلاعات ورودی مدل زیمونت.....
70	جدول 2-5- اطلاعات ورودی مدل اتلاف ادی‌ها.....
75	جدول 3-5- اصلاح ضرایب مدل استاندارد $k-\epsilon$ .....
77	جدول 4-5- پارامترهای جریان آشفته واکنشی مدل‌های مختلف.....

## فهرست علائم و اختصارات

$\rho$	چگالی
$T$	دما
$p$	فشار
$S$	سرعت پیشروی شعله
$C$	متغیر پیشرفت واکنش
$k$	انرژی جنبشی آشفته
$E$	انرژی
$u'$	سرعت آشفته
$v$	سرعت محوری
$l$	طول مقیاس انتگرالی آشفته
$\tau$	زمان مقیاس
$U_t$	سرعت شعله آشفته
$l_F$	ضخامت شعله آرام
$\varepsilon$	نرخ اضمحلال آشفته
$x$	راستای محوری، راستای افقی
$r$	راستای شعاعی
$y$	راستای عمودی
$\mu_{str}$	ضریب کشیدگی اتلاف
$Da$	عدد دامکولر
$Ka$	عدد کارلوویتز
$Re_T$	عدد رینولدز آشفته
$Y$	کسر جرمی
$\sigma$	انحراف استاندارد توزیع

$U_t$	سرعت شعله آشفته
$\dot{w}_c$	نرخ واکنش
$n$	تعداد گونه ها
$h$	آنتالپی
$B$	ضریب ثابت
$C_D$	ضریب ثابت
$erfc$	تابع خطا مکمل
$V$	حجم
$A$	سطح
$K$	ضریب انتقال حرارت هدایتی
$c_p$	گرمای ویژه
$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$	ضریب پخش حرارت
$\mu$	لزجت
$\nu$	لزجت سینماتیک
$\dot{Q}_{Air}$	دبی خوانده شده
$\dot{Q}_{Fuel}$	دبی تصحیح شده
$H_{comb}$	گرمای احتراق
$D$	قطر خروجی مشعل
$\eta$	طول مقیاس کولموگروف
$G$	ضریب کشیدگی
$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$	ضرایب ثابت مدل $k-\varepsilon$
$g_{cr}$	فاکتور کشیدگی بحرانی
$\phi$	کمیت عمومی
	<b>زیر نویسها</b>
$0$	اندازگیری شده در دمای مرجع

<i>x</i>	مربوط به آشفستگی
<i>u</i>	مربوط به گازهای نسوخته
<i>t</i>	مربوط به آشفستگی
<i>c</i>	مربوط به واکنش شیمیایی
<i>L0</i>	مربوط به شعله آرام در شرایط استاندارد
<i>L</i>	مربوط به شعله آرام
<i>k</i>	مربوط به طول مقیاس کولموگروف
<i>str</i>	مربوط به کشیدگی
<i>axial</i>	در جهت محوری
<i>radial</i>	در جهت شعاعی
<i>eq</i>	حالت تعادل
<i>Air</i>	شرایط کالیبراسیون
<i>Fuel</i>	شرایط اندازه‌گیری
<i>mix</i>	مربوط به مخلوط شدن کامل

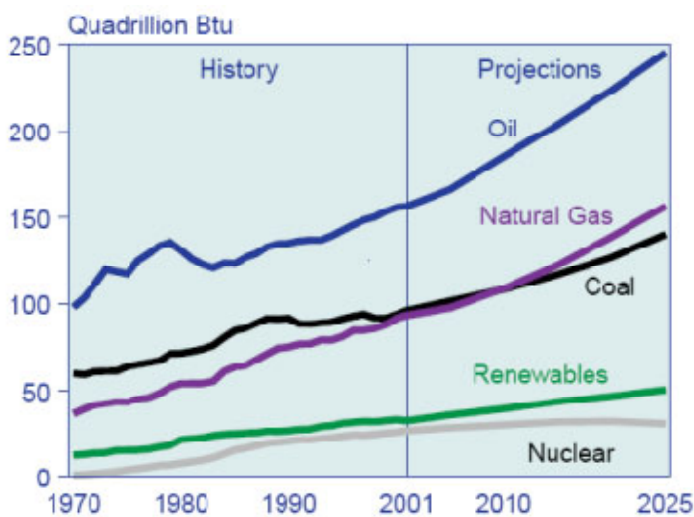


# فصل اول

## مقدمه

## 1-1 - مقدمه

در یک نگاه کلی، احتراق، اکسیداسیون سریع هیدروکربن‌ها و مواد کربن‌دار همراه با تولید حرارت و نور به شکل شعله است. احتراق یکی از قدیمی‌ترین تکنولوژی‌ها و مهم‌ترین منبع انرژی برای فعالیت‌های بشر می‌باشد. سهم احتراق در تولید کلی انرژی در حدود 90% است (شکل 1-1). تقاضا برای انرژی، علاوه بر کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، با توجه به کشورهای بزرگ در حال توسعه مانند چین و هند و کشورهای جنوب‌شرقی آسیا، در حال افزایش می‌باشد.



شکل 1-1- تاریخچه و پیش‌بینی تولید انرژی جهان از منابع انرژی مختلف [1]

انرژی حاصل از احتراق معمولاً برای ایجاد گرما و قدرت بکار می‌رود. در نتیجه، طراحی سیستم‌های تولید حرارت و قدرت ارتباط مستقیمی با بهینه‌سازی مصرف انرژی دارد. بدلیل نقش مهم مشعل‌های صنعتی در تولید حرارت و قدرت بعنوان یکی از بزرگترین مصرف‌کننده‌های سوخت‌های فسیلی، تلاش‌های بسیاری برای بهبود کارایی این تجهیزات صورت گرفته‌است. یکی از جنبه‌های بهبود کارایی، طراحی مشعل براساس نوع کاربری آن می‌باشد. طراحی مشعل‌های صنعتی جنبه‌های متفاوتی دارد که می‌توان به کاهش مصرف سوخت، کنترل آلاینده‌ها و پایداری عملکرد اشاره کرد. در این پایان‌نامه به بررسی مشعل‌های پیش‌آمیخته

سرعت بالا بعنوان یکی از تکنولوژی های جدید مشعل سازی پرداخته می شود. در فصل حاضر، ویژگی های احتراق در این مشعل ها و تحقیقات علمی انجام شده در مورد آنها ارائه می شود.

## 1-2- احتراق

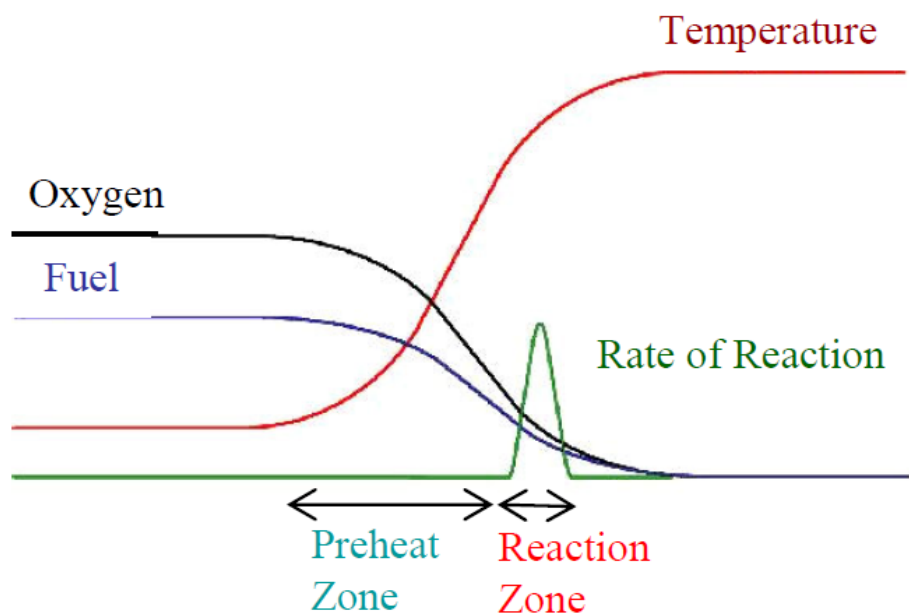
فرآیند احتراق براساس مکان اختلاط واکنش دهنده ها به دو دسته شعله پیش آمیخته و غیرپیش آمیخته یا نفوذی تقسیم می شوند. در شعله های نفوذی، سوخت و اکسیدکننده در ابتدا مجزا می باشند و فرآیند اختلاط و اکسیدشدن بطور هم زمان در سطح مشترک سوخت و اکسیدکننده اتفاق می افتد. در مقابل در شعله های پیش آمیخته، سوخت و اکسیدکننده قبل از واکنش باهم مخلوط می شوند.

احتراق براساس رژیم جریان به احتراق آرام و آشفته تقسیم می شود. در هر دو شعله آرام و آشفته، فرآیند فیزیکی مشابهی صورت می گیرد و بسیاری از تئوری های شعله آشفته، بر اساس پیکربندی شعله آرام بنا شده اند.

### 1-2-1 - شعله آرام

#### شعله آرام پیش آمیخته

در شعله های پیش آمیخته، یک ناحیه نازک، گازهای نسوخته و سوخته شده را از هم جدا می کند. خصوصیات کلی شعله آرام پیش آمیخته در شکل 1-2 نشان داده شده است. شعله پیش- آمیخته توانایی حرکت به سمت گازهای نسوخته را دارد. بر اثر گرادیان دما و شار گرمایی حاصل از شعله، گازهای نسوخته ابتدا گرم می شوند و سپس می سوزند. تعادل مکانی بین نفوذی حرارت و مصرف واکنش دهنده ها منجر به پیشروی پیشانی شعله می شود. سرعت پیشروی شعله آرام،  $S_{L0}$ ، به پارامترهای مختلفی از جمله نسبت اختلاط، دمای گازهای نسوخته و فشار بستگی دارد.



شکل 1-2- خصوصیات شعله آرام پیش‌آمیخته

شعله پیش‌آمیخته می‌تواند توسط یک متغیر پیشرفت  $C$  تعریف شود، که  $C=0$  در ناحیه گازهای نسوخته و  $C=1$  در ناحیه گازهای سوخته قرار می‌گیرد.

### شعله آرام نفوذی

در شعله نفوذی، سوخت و اکسیدکننده در حالت اولیه جدا از هم هستند و فرآیند اختلاط همزمان با احتراق صورت می‌پذیرد. ناحیه واکنش در فصل مشترک سوخت و اکسیدکننده قرار می‌گیرد. میدان دما، توزیع سوخت و اکسیدکننده در شعله در شکل 1-3 نشان داده شده است. واکنش دهنده‌ها از روبرو به هم برخورد می‌کنند و در حدود نسبت استوکیومتری حداکثر نرخ واکنش اتفاق می‌افتد.