بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

عنوان:

بررسی تجربی میدان دما در یک مشعل چرخشی پیش‌آمیخته

استاد راهنما:

دکتر سید عبدالمهدی هاشمی

به‌وسیله:

عادل حافظی حقانی

شهریور ۱۳۹۱

چکیده

در این تحقیق، میدان دما در یک مشعل چرخشی پیش‌آمیخته به طور تجربی مطالعه شده است. یک نمونه آزمایشگاهی از مشعل ساخته شده است و چهار نوع شعله‌ی چرخشی با سرعت کم، شعله‌ی چرخشی با سرعت متوسط، شعله‌ی V شکل در لحظه تشکیل و شعله‌ی V شکل در آستانه خاموشی در دبی ثابت هوا بررسی شده است. به کمک ترموکوپل‌های نوع B، دما در نقاط مختلف شعله اندازه‌گیری شده است. نمودارهای دما و نوسانات دما بر حسب زمان و موقعیت مکانی بدست آمده و کانتورهای دما ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله محوری از مرکز مشعل، دما و نوسانات دما تا یک مقدار ماکزیمم افزایش و پس از آن شروع به کاهش می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش توان حرارتی (نرخ آتش) دما و نوسانات دما هر دو افزایش می‌یابند. در شعله‌ی چرخشی کم‌سرعت، میانگین دما با افزایش فاصله شعاعی در فاصله محوری ثابت از مرکز شعله افزایش می‌یابد. در حالیکه در شعله‌های چرخشی V شکل، این دما کاهش می‌یابد. ناحیه‌ی شعله در شعله‌های چرخشی، با افزایش توان حرارتی، در فاصله نزدیک‌تری به مشعل قرار می‌گیرد. مقایسه نتایج بدست آمده برای توزیع دما با تصاویر شعله مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: مشعل چرخشی- میدان دما- شعله‌ی V شکل- توان حرارتی- دمای شعله

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل۱ مقدمه ۱

۱-۱- معرفی ۲

۱-۲- جریان چرخشی ۳

۱-۳- شعله پیش‌آمیخته ۷

۱-۳-۱- شعله پیش‌آمیخته مغشوش ۸

۱-۴- مشعل‌های پیش‌مخلوط چرخشی ۹

۱-۵- بیان مفاهیم مرتبط با مشعل چرخشی ۱۰

۱-۵-۱- نسبت هم‌ارزی ۱۰

۱-۵-۲- نرخ آتش(توان حرارتی) ۱۱

۱-۵-۳- سرعت شعله ۱۲

۱-۵-۴- حدود شعله‌وری ۱۳

۱-۶- مروری بر تحقیقات گذشته ۱۴

۱-۷- تحقیق حاضر و اهداف آن ۱۸

فصل۲ معرفی دستگاه آزمایش ۲۰

۲-۱- مقدمه ۲۱

۲-۲- اجزای مشعل چرخشی ۲۱

۲-۲-۱-چرخاننده جریان ۲۲

۲-۲-۱-۱- زاویه چرخش پره‌های چرخاننده جریان ۲۲

۲-۲-۱-۲- ابعاد چرخاننده جریان ۲۳

۲-۲-۱-۳- دسته بندی چرخش جریان ۲۴

۲-۲-۱-۳-۱-دسته‌بندی بر مبنای عدد چرخش ۲۴

۲-۲-۱-۳-۲-دسته‌بندی بر مبنای زاویه چرخش ۲۵

۲-۲-۲- قسمت‌های مخروطی سر مشعل ۲۶

۲-۲-۳- بدنه مشعل ۲۷

۲-۳- تجهیزات آزمایشگاهی لازم برای بررسی‌های تجربی ۲۷

۲-۳-۱- اندازه‌گیری دبی گاز و هوا ۲۷

۲-۳-۱-۱- روتامتر ۲۸

۲-۳-۲- سیستم تامین هوا ۲۹

۲-۳-۲-۱- کمپرسور ۲۹

۲-۳-۲-۲- رگلاتور ۲۹

۲-۳-۲-۳- رطوبت‌گیر ۳۰

۲-۴- نحوه اختلاط سوخت و هوا ۳۱

۲-۵- اندازه‌گیری دما ۳۲
۲-۵-۱- ترموکوپل‌ها ۳۲
۲-۵-۲- ثبت دما ۳۳

فصل۳ بررسی نتایج بدست آمده از آزمون ها ۳۴
۳-۱- مقدمه ۳۵
۳-۲- فرآیند راه‌اندازی آزمایش‌ها ۳۶
۳-۳- بررسی میدان دمایی بر حسب موقعیت مکانی ۳۸
۳-۳-۱- مقدمه ۳۸
۳-۳-۲- شعله‌ی چرخشی کم‌سرعت ۳۸
۳-۳-۳- شعله‌ی چرخشی سرعت متوسط ۴۰
۳-۳-۴- شعله‌ی V شکل در لحظه تشکیل ۴۱
۳-۳-۵- شعله‌ی V شکل در آستانه پرش ۴۲
۳-۴- نوسانات دما ۴۴
۳-۴-۱- مقدمه ۴۴
۳-۴-۲- نوسانات دما و نمودارهای T'_{rms} بر حسب مکان ۴۷
۳-۵- کانتورهای دمای آزمایش ۵۲
۳-۶- مباحث وجود خطا در آزمایشها ۵۵
۳-۶-۱- عدم قطعیت و آنالیز خطا ۵۵
۳-۶-۲- تکرارپذیری ۵۷

فصل۴ جمع‌بندی و نتایج ۵۹

مراجع ۶۲

پیوست‌ها ۶۶

پیوست الف ۶۷

پیوست ب ۶۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱.الف) ورود مماسی جریان ب) قرار گیری پره راهنما ج) دوران یک وسیله مکانیکی.....۴

شکل ۱-۲. مخلوط ایجاد شده و دمای تولیدی الف) مشعل بدون چرخش ب) مشعل چرخشی ۵

شکل ۱-۳. توزیع مولفه‌های سرعت محوری و دورانی در خروجی یک مشعل ۷

شکل ۱-٤. مشعل پیش‌آمیخته‌ی گازی ساده.....۸

شکل ۱-۵. شماتیک مشعل چرخشی.....۹

شکل ۱-٦.توصیف مالارد-لوشاتلیه برای موج دمایی شعله‌ی آرام ۱۲

شکل ۲-۱. چرخاننده جریان با زوایای چرخش ۳۰ ، ۴۵ و۶۰ درجه ۲۲

شکل ۲-۲. شکل کلی چرخاننده جریان ۲۳

شکل ۲-۳. سمت راست: مخروط خارجی سمت چپ: مخروط داخل تراش ۲۶

شکل ۲-٤. روتامتر بکار رفته برای (الف) گاز و (ب) هوا ۲۸

شکل ۲-۵. شماتیکی از رگلاتور تنظیم فشارهوا.....۲۹

شکل ۲-٦. (الف) کمپرسور هوا، (ب) تنظیم‌کننده‌ی فشار ، (پ) رطوبت‌گیر ۳۰

شکل ۲-۷. نصب روتامترها، رگلاتور و رطوبت‌گیر بر روی بورد..... ۳۱

شکل ۲-۸.نحوه قرارگیری ترموکوپل‌ها..... ۳۳

شکل ۳-۱. (الف)شعله‌ی چرخشی سرعت کم(ب) شعله چرخشی سرعت متو سط (ج)شعله‌ی Vشکل در لحظه‌ی تشکیل (د) شعله‌ی Vشکل در آستانه‌ی پرش ۳۷

شکل ۳-۲. نمودار دما بر حسب موقعیت مکانی برای توان حرارتی $۲/۶kw/m^2$..... ۴۰

شکل ۳-۳. نمودار دما بر حسب موقعیت مکانی برای توان حرارتی $۳/۲kw/m^2$..... ۴۱

شکل ۳-٤. نمودار دما بر حسب موقعیت مکانی برای توان حرارتی $۳/۵kw/m^2$..... ۴۲

شکل ۳-۵. نمودار دما بر حسب موقعیت مکانی برای توان حرارتی $۳/۹kw/m^2$..... ۴۳

شکل ۳-٦.نوسانات سرعت بر حسب زمان در یک نقطه ثابت جریان توربولانت ۴۴

شکل ۳-۷. چهار نمودار از نمودارهای دما بر حسب زمان برای سوخت با توان حرارتی $۳/۲kw/m^2$ الف) r=۰/۵ cm ,y=۰cm ب) r=۰/۵ cm ,y=۲cm ج) r=۱ cm ,y=۳cm د) r=۰/۵ cm ,y=۲cm ۴۶

شکل ۳-۸. نمونه قرارگرفتن ترموکوپل‌ها در شعله چرخشی کم‌سرعت با موقعیت r=۰/۵cm ,y=۳cm ۴۷

شکل ۳-۹. نمودار نوسانات دمایی بر حسب موقعیت مکانی برای توان حرارتی $۲/۶kw/m^2$..... ۴۹

شکل۳-۱۰. نمودار نوسانات دمایی بر حسب موقعیت مکانی برای توان حرارتی $3/2 kw/m^2$ ۵۰
شکل۳-۱۱. نمودار نوسانات دمایی بر حسب موقعیت مکانی برای توان حرارتی $3/5 kw/m^2$ ۵۱
شکل۳-۱۲. نمودار نوسانات دمایی بر حسب موقعیت مکانی برای توان حرارتی $3/9 kw/m^2$ ۵۱
شکل۳-۱۳. مقایسه کانتور دما با شکل واقعی شعله با توان حرارتی $2/6 kw/m^2$ ۵۳
شکل۳-۱٤. مقایسه کانتور دما با شکل واقعی شعله با توان حرارتی $3/2 kw/m^2$ ۵۳
شکل۳-۱۵.مقایسه کانتور دما با شکل واقعی شعله با توان حرارتی $3/5\ kw/m^2$ ۵۴
شکل۳-۱٦.مقایسه کانتور دما با شکل واقعی شعله با توان حرارتی $3/9\ kw/m^2$ ۵۴
شکل۳-۱۷. نمودار عدم قطعیت برای یک نمونه آزمایش ۵۷
شکل۳-۱۸. تکرارپذیری برای آزمایش با توان حرارتی $3/9 kw/m^2$ در مبدا مختصات ۵۸

فهرست علائم اختصاری

سطح مقطع مشعل (cm^2)	A
قطر (m)	D
نسبت (مولی یا جرمی) سوخت به هوا	FAR
نرخ آتش (kW/m^2)	FR
ارزش حرارتی پایین (kJ/m^3)	LHV
اکسید نیتروژن	NOx
نرخ انتقال حرارت(kW)	$\dot{Q}$
ثانیه	Sec
دبی حجمی (m^3/s)	$\dot{V}$

فهرست علائم یونانی

نسبت هم‌ارزی	Φ
زاویه پره	ß

فهرست زیرنویس‌ها

هوا	A
مؤثر	Eff
سوخت یا نهایی	F
اشتعال	I
آرام	L
متوسط	M
مخلوط	Mix
استوکیومتری	STO
سطح	Surf
محیط اطراف	Surr
نهایی	U

فصل ۱
مقدمه

مقدمه

۱-۱- معرفی

علیرغم جستجوی فراوان برای منابع انرژی جدید، احتراق همچنان روش رایج تولید انرژی در صنایع می‌باشد. از این‌رو عمده تلاش‌ها بر روی بهینه‌سازی طراحی تجهیزات احتراقی جدید، شامل نمونه‌های مختلف مشعل، متمرکز شده است. کاربرد چرخش در احتراق به طور گسترده به عنوان ابزاری برای احتراق پایدار و موثر در کوره‌های صنعتی، بویلرها، توربین‌های گازی با نواحی چرخشی، توربوفن‌ها با افزاینده‌های چرخشی و موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود. دلیل اولیه و مقدماتی استفاده از چرخش، افزایش سطح شعله و افزایش پایداری شعله به‌واسطه کاهش نرخ سرعت محوری و به وجودآمدن مولفه‌ی سرعت شعاعی می‌باشد. گردابه‌ها یا جریان‌های چرخشی[۱] اثرات قابل توجهی بر احتراق و اختلاط دارند. جریان چرخشی در محفظه احتراق می‌تواند نرخ آزادسازی انرژی و بازده احتراق را افزایش دهد و همچنین امکان آزادسازی انرژی را کنترل کند و باعث کاهش طول شعله شود. همچنین چرخش روشی برای بالابردن کیفیت اختلاط سوخت و هوا بوده و سبب کنترل احتراق می‌شود [۱].

[۱] Swirl flows

۱-۲- جریان چرخشی

جریان چرخشی در نتیجه یک حرکت مارپیچی با یک مولفه سرعت مماسی می‌تواند بوسیله یکی از روش‌های زیر تولید شود که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.

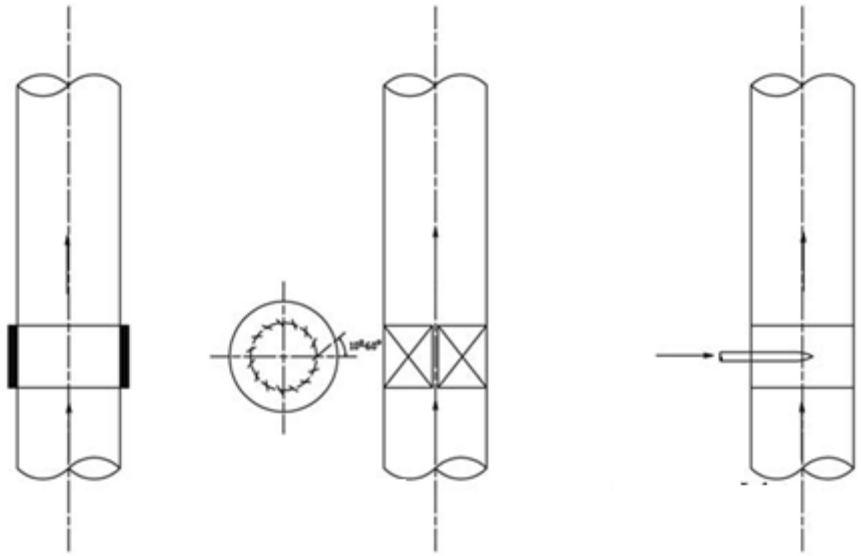
الف- حالتی که تمام یا قسمتی از جریان به صورت مماسی[۲] به کانال استوانه‌ای (لوله‌شکل) وارد می‌شود.

ب- قرارگرفتن پره‌های راهنما[۳] در مسیر جریان، که این روش به طور کلی در کوره‌ها و مشعل‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش دارای راندمان بالایی از لحاظ تولید سطوح چرخشی می‌باشد.

پ- دوران یک وسیله مکانیکی[۴] همراه با سیال عبوری از آن سبب چرخش جریان می‌شود. در عمل این وسیله می‌تواند یک لوله و یا یک شبکه دورانی باشد. در مورد مشعل‌های کوچک معمولی پره‌ها در دهانه خروجی لوله قرار می‌گیرند و چرخش کمی تولید می‌کنند. ولی برای تولید چرخشی قوی، پره‌ها در داخل لوله قرار می‌گیرند و با یک وسیله مکانیکی خارجی می‌توان زاویه پره و شدت چرخش (عدد چرخش) را تغییر داد [۲].

---

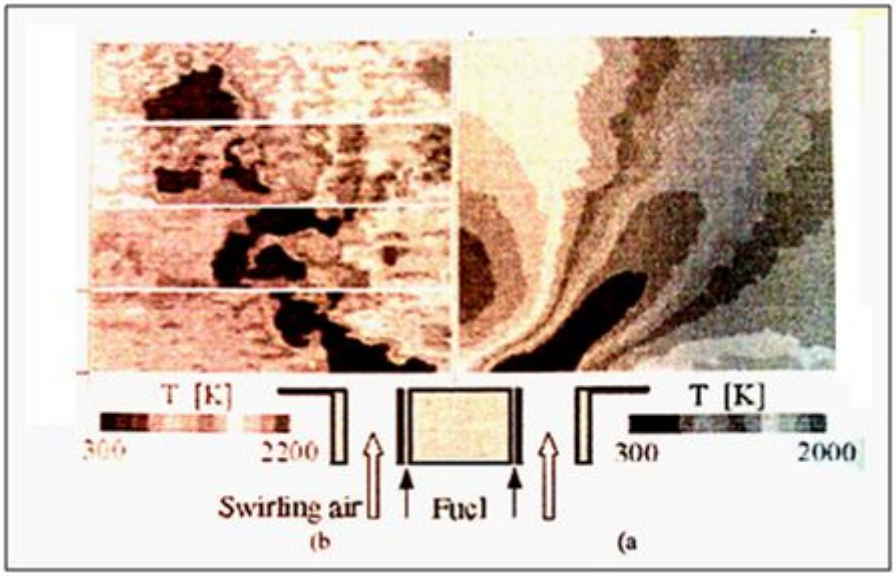
[۲] Tangential Inlet
[۳] Vane swirler
[۴] Rotating cylinder



(پ) (ب) (الف)

شکل۱-۱ الف) ورود مماسی جریان ب) قرار گیری پره راهنما ج) دوران یک وسیله مکانیکی[۲]

چرخش سبب آشفته‌شدن مخلوط جریان می‌شود و باعث می‌شود تا رونـد تبـدیل انـرژی جنبشی متوسط به انرژی توربولانسی افزایش یابد و در نتیجه، اختلاط مخلوط سوخت و هوا بـا سرعت بیشتری انجام شود. شکل ۱-۲ مخلوط ایجاد شده و دمای تولیدی از سوخت و هوا را در دو مشعل نشان می‌دهد. اغتشاشات ناشی از چرخش در مشعل چرخشی، سبب شده که احتـراق سوخت و هوا به خوبی صورت گرفته و دمای احتراق تا ۲۲۰۰ درجه کلـوین بـالا رود و در عـین حال در طول محفظه احتراق توزیع شود. ولی در مشعل بدون چـرخش همـانطور کـه مشـخص است اغتشاشات در مخلوط داخل محفظه احتراق اتفاق نیفتاده و دمـای احتـراق حـدود ۲۰۰۰ درجه کلوین بوده و فقط در منطقه ورود سوخت به محفظه، احتـراق ایجـاد شـده اسـت. تولیـد جریان چرخشی با قدرت زیاد، یک منطقه گردش داخلی برای جریان‌های احتراقی و ایزوترمـال بوجود می‌آورد [۲].



شکل۱-۲ مخلوط ایجاد شده و دمای تولیدی الف) مشعل بدون چرخش ب) مشعل چرخشی[۲]

معمولا مشخصات جریان چرخشی بیشتر بوسیله عدد بدون بعد S که توسط Beer تعیین شده است بیان می‌شود.

$$S=\frac{G_\theta}{G_z \times L} \qquad (۱-۱)$$

که در آن L، یک طول مشخصه می‌باشد که در اینجا شعاع خارجی مشعل می‌باشد. ترمهای G_θ و G_z به ترتیب عبارتند از شار محوری ممان زاویه‌ای و شار محوری ممان محوری که به صورت معادله‌های ۱-۲ و ۱-۳ بیان می‌شوند.

$$G_\theta=\int_0^\infty \rho u_z u_\theta r^2 .dr \qquad (۱-۲)$$

$$G_z=\int_0^z \rho u_z^2 dr \qquad (۱-۳)$$

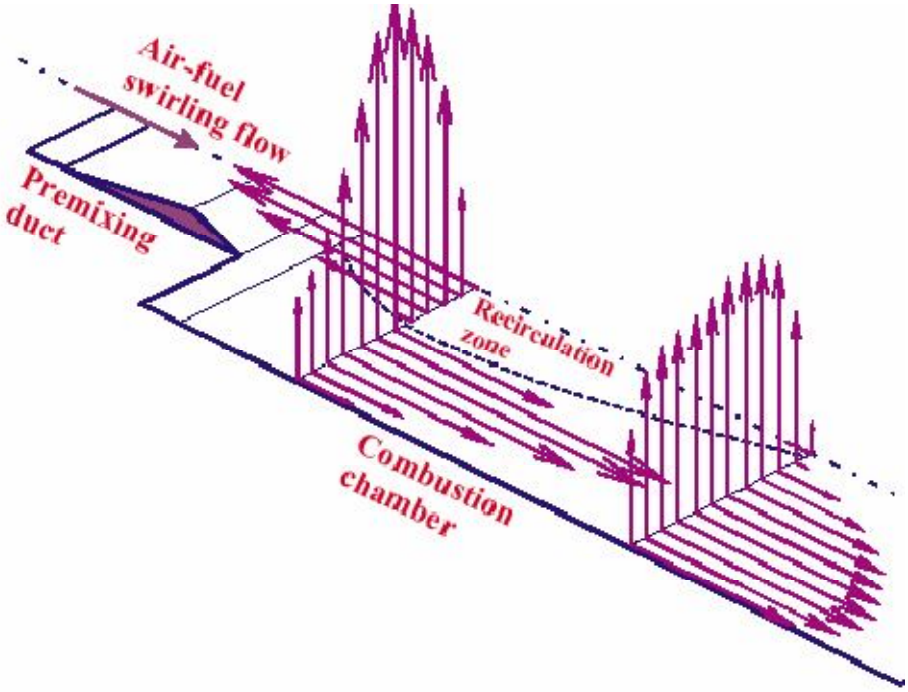
که u_z و u_θ به ترتیب مولفه‌های محوری و مماسی سرعت می‌باشند [۳].

فرم ساده‌تری از عدد چرخش که با زاویه پره در ارتباط می‌باشد عبارت است از:

$$S = \frac{2}{3} \times \left(\frac{1-(\frac{d_i}{do})^2}{1-(\frac{d_i}{do})^3} \right) \tan\beta \qquad (۴-۱)$$

d_i در رابطه‌ی (۴-۱) قطر داخلی چرخاننده و d_o قطر خارجی آن می‌باشد. زاویه چرخش پره نیز با β نشان داده شده است [۳].

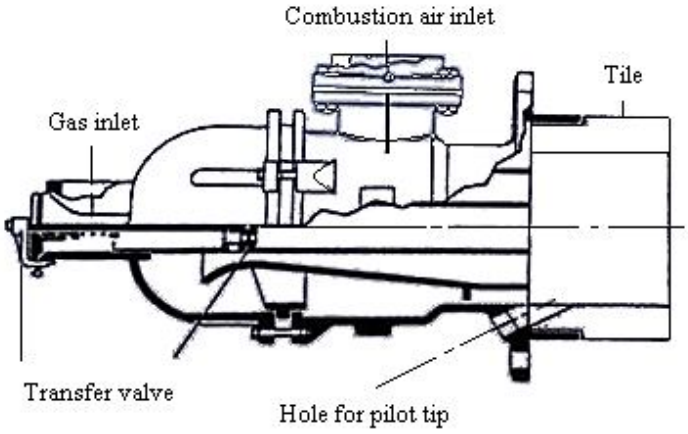
با افزایش عدد چرخش شدت احتراق و نرخ اختلاط سوخت و هوا افزایش یافته، طول شعله کوتاه‌تر شده و نرخ استهلاک مولفه‌های سرعت محوری جریان چرخشی افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود سرعت دارای دو مولفه‌ی محوری و شعاعی می‌باشد که مولفه شعاعی از رابطه $v = r\omega$ پیروی می‌کند، لذا افزایش سرعت شعاعی با افزایش شعاع قابل توجیه می‌باشد و در انتها نیز به دلیل واگرا شدن خطوط جریان، سرعت شروع به کاهش می‌کند. با توجه به رابطه‌ی برنولی در جاهایی که سرعت بیشینه است فشار کمینه می‌باشد و بالعکس، به دلیل اختلاف فشار، سیال از نواحی پرفشار به سمت نواحی کم‌فشار در جریان می‌باشد. در شکل ۱-۳ در ناحیه‌ی بالایی ناحیه چرخش، به دلیل قابل ملاحظه بودن سرعت محوری، نیروی اینرسی اجازه برگشت جریان را نمی‌دهد ولی در ناحیه درون منحنی، به دلیل کم بودن سرعت محوری این اجازه به جریان داده می‌شود تا از ناحیه پرفشار به ناحیه کم‌فشار حرکت کند و به دلیل برقراری قانون بقای جرم، چرخش در این ناحیه مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۳ .توزیع مولفه‌های سرعت محوری و دورانی در خروجی یک مشعل[۲]

۱– ۳ – شعله پیش‌آمیخته

در شعله پیش آمیخته مانند احتراق در موتورهای بنزینی و شعله‌ی اجاق گاز ابتدا سوخت و هوا کاملا با هم مخلوط می‌شوند و بعد محترق می‌شوند. شکل ۱-۴ یک مشعل پیش‌آمیخته‌ی گازی ساده را نشان می‌دهد که برای تولید شعله‌ای بلند و درخشان طراحی شده است. در این نوع خاص، هوای مورد نیاز از طریق جداره‌ی بین ورودی گاز و پوسته تامین می‌شود. با کم کردن سرعت نسبی سوخت و هوا و همچنین سرعت اختلاط آن‌ها، طول شعله افزایش می‌یابد. چنین شعله‌هایی در وسایلی استفاده می‌شوند که در آن‌ها به تشعشع یکنواخت در یک محیط وسیع نیاز است.



شکل۱-۴مشعل پیش آمیخته‌ی گازی ساده[۲]

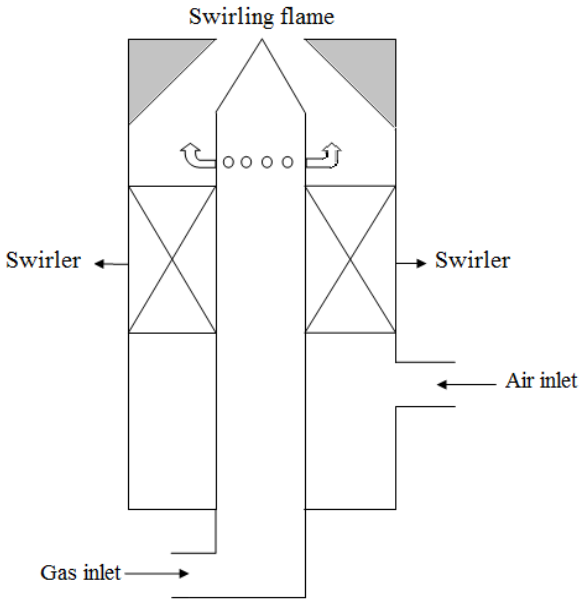
در شعله‌های پیش‌آمیخته اگر شدت اغتشاش زیاد نباشد جبهه‌ی شعله‌ی پیش‌آمیخته، آرام و منحنی‌شکل تشکیل می‌شود. در این صورت می‌توان دید که شعله‌های مغشوش از تجمع تعداد زیادی شعله‌های پیش‌آمیخته‌ی آرام تشکیل می‌شوند. امتیاز احتراق پیش‌آمیخته این است که امکان کنترل احتراق بسیار بیش‌تر است. پیش‌آمیختگی در شرایط سوخت کم از ایجاد دماهای بالا جلوگیری کرده و در نتیجه احتراق با تولید NO_x کم انجام می‌شود. به‌علاوه در این شرایط فقط مقدار کمی دوده تشکیل می‌شود.

۱-۳-۱-شعله پیش‌آمیخته مغشوش

در این حالت سوخت و اکسیدکننده پیش‌آمیخته به سمت بالا حرکت می‌کنند. از طریق گردش مجدد گازهای داغ پشت یک جسم پایدار کننده‌ی شعله، شعله به طرف مخلوط سوخت و هوای نسوخته نزدیک‌شونده انتشار پیدا می‌کند. اگر جریان نزدیک شونده آرام باشد، شعله‌ی پیش‌آمیخته به صورت V شکل تشکیل می‌شود. اما اگر جریان نزدیک‌شونده مغشوش باشد، در این صورت زاویه شعله بسته به سرعت نزدیک شدن واکنش دهنده‌ها تغییر می‌کند.

۱-۴-مشعل‌های پیش‌مخلوط چرخشی

سوخت و هوا به صورت جداگانه از دو مسیر متفاوت وارد مشعل شده و پس از ترکیب با هم از پره‌های ثابت عبور کرده و به چرخش درمی‌آیند و عمل احتراق انجام می‌شود. در مشعل چرخشی ساخته شده که شماتیکی از آن در شکل ۱-۵ نشان داده شده، قسمت‌های مختلفی در نظر گرفته شده است که در فصل ۲ به تشریح آنها می‌پردازیم.



شکل ۱-۵ شماتیک مشعل چرخشی[۴]

مزایای مشعل‌های پیش‌مخلوط چرخشی عبارتند از:

۱. رسیدن به نسبت استوکیومتری در این مشعل‌ها بسیار آسان است.

۲. کنترل نسبت سوخت به هوا بسیار آسان ودقیق خواهد بود.

۳. چنانچه فشار گاز برابر اتمسفر باشد، در تمامی مراحل نسبت سوخت به هوا خود به خود کنترل خواهد شد.

۴. در این مشعل‌ها به دلیل مخلوط بسیار خوب هوا و گاز، طول شعله بسیار کوتاه بوده که منجر به کوتاه شدن فضای محفظه‌ی احتراق می‌شود.

۵. به سادگی می‌توان مشعل را از یک سوخت گازی به سوخت گازی دیگر تبدیل کرد.

۶. کاهش آلودگی محیط به واسطه NO_x تولیدی کمتر

۷. کاهش CO تولیدی در خروجی مشعل

۱–۵– بیان مفاهیم مرتبط با مشعل چرخشی

۱–۵–۱– نسبت هم‌ارزی

نسبت هم‌ارزی[5] در احتراق سوخت، عبارت است از نسبت سوخت به هوا بر پایه جرمی (مولی) در حالت واقعی به نسبت سوخت به هوای استوکیومتری و عبارت است از:

$$\varphi = \frac{FAR}{FAR_{STO}} \qquad (۵-۱)$$

بسته به مقدار نسبت هم‌ارزی، دو اصطلاح رقیق و غنی بودن مخلوط تعریف می‌شود. مخلوط رقیق، مخلوطی است که میزان نسبت سوخت به هوای آن از این نسبت در حالت استوکیومتری کمتر است و $\varphi<1$ می‌باشد. برعکس اگر میزان نسبت سوخت به هوای آن از این نسبت در حالت استوکیومتری بیشتر باشد، مخلوط غنی و $\varphi>1$ می‌باشد. نهایتاً $\varphi=1$ مربوط به مخلوط استوکیومتری می‌باشد.

از آنجا که واحدهای دبی جریان گاز و هوای مربوط به روتامترها به ترتیب برحسب lit/min و m^3/hr بیان می شوند، برای تبدیل واحدها، دبی‌های گاز و هوا را به ترتیب

[5] Equivalence Ratio