بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان‌نامه

برای اخذ درجه کارشناسی ارشددر رشته مهندسی مکانیک

گرایش تبدیل انرژی

عنوان:

بررسی تجربی پایداری شعله در یک مشعل چرخشی پیش آمیخته

استاد راهنما:

دکتر سید عبدالمهدی هاشمی

استاد مشاور:

دکتر مجید سبزپوشانی

به‌وسیله:

مجید حاجی زاده

اردیبهشت ۱۳۹۱

چکیده

در این تحقیق، احتراق پیش آمیخته در یک مشعل چرخشی مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. ابتدا نحوه‌ی کارکرد مشعل چرخشی و وسائل به‌کار گرفته شده در آزمون‌های تجربی توضیح داده شده است. برای ایجاد شعله‌ی چرخشی از چرخاننده‌ای با زاویه‌ی چرخش۴۵ درجه در مسیر ورودی هوا،استفاده شده است.برای بررسی تشکیل شعله‌ی چرخشی Vشکل، خاموشی شعله و برگشت شعله که بیانگر محدوده پایداری است. نتایج آزمون‌ها بر حسب نرخ آتش، سرعت محوری جریان خروجی و نسبت هم ارزی ارائه شده است. بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته در نرخ آتش‌های مختلف و سرعت‌های مختلف ورودی مخلوط، شعله‌ی چرخشیV شکل در مخلوط رقیق سوخت و هوا (ϕ<۱) تشکیل می‌شود. همچنین مقادیر سرعت جریان مربوط به تشکیل شعله V شکل محاسبه شده و ملاحظه شد که با افزایش نرخ آتش این سرعت افزایش می‌یابد. زمانی که در اثر افزایش نرخ آتش شعله V شکل تشکیل می‌شود نسبت هم ارزی مربوط به خاموشی شعله نیز به طور ناگهانی افزایش می یابد. به عبارت دیگر محدوده پایداری شعله تا نسبت هم ارزی بیشتری افزایش می یابد. به جز در جهش مذکور نسبت هم ارزی مربوط به خاموشی تقریباً به نرخ آتش بستگی ندارد و تنها تابع سرعت مخلوط خروجی است.همچنین با افزایش نرخ آتش،مقادیر سرعت محوری جریان خروجی مربوط به خاموشی نیز در لحظه‌ی تشکیل شعله V شکل به طور ناگهانی کاهش می‌یابد و در موارد دیگر به طور تقریباً خطی افزایش می‌یابد. محدوده‌ی سرعت مربوط به خاموشی m/s ۱/۵ تا m/s ۷/۵ می‌باشد.

کلمات کلیدی: مشعل چرخشی-پایداری شعله-شعلهVشکل-شعله پیش‌آمیخته

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل ۱ :مفاهیم سوخت و احتراق	۱
۱-۱-مقدمه	۲
۱-۲-مروری بر کارهای انجام شده	۳
۱-۳-بیان مفاهیم مرتبط با احتراق	۷
۱-۳-۱-انواع احتراق	۷
۱-۳-۲-اختلاط سوخت و هوا	۸
۱-۳-۳-هوای استوکیومتری و هوای اضافه	۸
۱-۳-۴-پرش شعله	۹
۱-۳-۵-بازگشت شعله	۹
۱-۳-۶-شعله پایدار	۱۰
۱-۳-۷-نسبت سوخت به هوا	۱۰
۱-۳-۸-نسبت هم ارزی سوخت	۱۱
۱-۳-۹-ارزش حرارتی پایین سوخت	۱۲
۱-۳-۱۰-نرخ آتش	۱۳
۱-۳-۱۱-سرعت شعله	۱۳
۱-۳-۱۲-عدد چرخش	۱۴
فصل ۲:انواع شعله	۱۹
۲-۱-انواع شعله	۲۰
۲-۱-۱-شعله پیش آمیخته	۲۱
۲-۱-۱-۱-شعله پیش آمیخته آرام	۲۱
۲-۱-۲-شعله‌های غیر پیش آمیخته	۲۲
۲-۱-۲-۱- شعله‌های غیر پیش آمیخته آرام	۲۳
فصل ۳:معرفی دستگاه آزمایش	۲۴

۳-۱-اجزای مشعل چرخشی ۲۵
۳-۱-۱-چرخاننده ۲۷
۳-۱-۱-۱-زاویه‌ی چرخش پره‌های چرخاننده ۲۷
۳-۱-۱-۲-ابعاد چرخاننده ۳۰
۳-۱-۱-۳-انواع چرخاننده ۳۱
۳-۱-۱-۳-۱-دسته‌بندی بر مبنای عدد چرخش ۳۲
۳-۱-۱-۳-۲- دسته‌بندی بر اساس زاویه‌ی چرخش ۳۳
۳-۱-۲-قسمت‌های مخروطی سر مشعل ۳۳
۳-۱-۳-بدنه‌ی مشعل ۳۶
۳-۲-تجهیزات آزمایشگاهی لازم برای بررسی‌های تجربی ۳۷
۳-۲-۱-روتامتر ۳۷
۳-۲-۲-کمپرسور ۳۸
۳-۲-۳-رگلاتور ۳۸
۳-۲-۴-فیلتر(صافی) ۳۹
۳-۳-نحوه‌ی اختلاط سوخت و هوا ۴۰

فصل ۴:نتایج تجربی ۴۲
۴-۱- بررسی لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل ۴۴
۴-۱-۱- نتایج لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۳۰۷\ mm^2$ ۴۴
۴-۱-۲- نتایج لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۸۶\ mm^2$ ۴۸
۴-۱-۳- نتایج لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۵۰\ mm^2$ ۵۲
۴-۱-۴- نتیجه‌گیری کلی برای لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل ۵۶

۴-۲- بررسی تجربی لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی V شکل ۵۸
۴-۲-۱- نتایج لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر ۵۹

۳۰۷ mm^2
۴-۲-۲- نتایج لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر **۶۲**
۲۸۶ mm^2
۴-۲-۳- نتایج لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر **۶۵**
۲۵۰ mm^2
۴-۲-۴- نتیجه‌گیری کلی برای لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشیV شکل **۶۸**
۴-۳- بررسی تجربی لحظه‌ی خاموشی شعله **۷۰**
۴-۳-۱- نتایج لحظه‌ی خاموشی شعله برای مساحت جریان خروجی برابر ۳۰۷ mm^2 **۷۰**
۴-۳-۲- نتایج لحظه‌ی خاموشی شعله برای مساحت مقطع خروجی ۲۸۶ mm^2 **۷۲**
۴-۳-۳- نتایج لحظه‌ی خاموشی شعله برای مساحت مقطع خروجی ۲۵۰ mm^2 **۷۴**
۴-۳-۴- نتیجه‌گیری کلی برای لحظه‌ی خاموشی شعله **۷۵**

فصل ۵:جمع بندی و پیشنهادات **۷۸**
۵-۱-مقدمه **۷۹**
۵-۲-نتایج **۷۹**
۵-۳-پیشنهادات برای کارهای آتی **۸۱**

مراجع **۸۲**

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول۴-۱: مقادیر نرخ آتش، نسبت هم‌ارزی و سرعت محوری شعله برای لحظات مختلف برای مساحت جریان خروجی برابر $۳۰۷\ mm^2$ **۴۵**

جدول ۴-۲: مقادیر نرخ آتش، نسبت هم‌ارزی و سرعت محوری شعله برای لحظات مختلف برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۸۶\ mm^2$ **۴۸**

جدول۴-۳: مقادیر نرخ آتش، نسبت هم‌ارزی و سرعت محوری شعله برای لحظات مختلف برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۵۰\ mm^2$ **۵۲**

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل۱-۱: سمت راست:ایجاد چرخش با قراردادن چرخاننده سمت چپ:ایجاد چرخش با هدایت شعله	۳
شکل ۱-۲: نمایش سرعت شعله و جبهه شعله	۱۴
شکل ۱-۳: هندسه شماتیک یک چرخاننده جریان	۱۶
شکل ۱-۴: نمایش چرخش با قرار دادن تجهیز در مسیر ورودی گاز در حالت چرخش ضعیف و چرخش قوی	۱۷
شکل ۱-۵: نمایش عدد چرخش بر حسب پارامترهای مختلف	۱۸
شکل۲-۱: طرحواره‌ای از دو شعله آرام	۲۲
شکل۲-۲: تصویر طرحواره شعله غیر پیش آمیخته جریان‌های آرام متقابل(چپ) و شعله غیر پیش آمیخته جریان‌های آرام هم جهت(راست)	۲۳
شکل۳-۱: شماتیک مشعل چرخشی	۲۶
شکل۳-۲: نمونه مشعل ساخته شده	۲۶
شکل۳-۳: تاثیر چرخش روی طول شعله	۲۸
شکل۳-۴: تاثیر چرخش روی طول شعله:طول شعله بلندتر و امکان ناپایداری بیشتر(سمت راست) طول شعله کوتاه‌تر و امکان پایداری بیشتر(سمت چپ)	۲۸
شکل۳-۵: انواع چرخاننده با زاویه‌های مختلف	۲۹
شکل۳-۶:شکل کلی چرخاننده	۳۰
شکل۳-۷: شماتیک و ابعاد چرخاننده	۳۱
شکل۳-۸: سمت راست(مخروط خارجی) سمت چپ(مخروط داخل تراش)	۳۴
شکل۳-۹:شماتیکی از مخروط خارجی	۳۵
شکل ۳-۱۰: شماتیکی از مخروط داخل تراش	۳۶
شکل۳-۱۱: روتامتر بکاررفته برای(الف) هوا و (ب) گاز	۳۷
شکل۳-۱۲:شماتیکی از رگلاتور تنظیم فشار هوا	۳۸
شکل۳-۱۳: تنظیم کننده‌ی فشار	۳۹
شکل۳-۱۴:فیلتر	۳۹

شکل۳-۱۵:نحوه‌ی اتصال تجهیزات آزمایشگاه ۴۰
شکل۴-۱: مقادیر نسبت هم ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۳۰۷\ mm^2$ ۴۶
شکل۴-۲: مقادیر سرعت محوری شعله برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۳۰۷\ mm^2$ ۴۶
شکل۴-۳: تغییرات شکل شعله گاز طبیعی تا لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی v شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۳۰۷\ mm^2$ ۴۷
شکل۴-۴: مقادیر نسبت هم ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۸۶\ mm^2$ ۴۹
شکل۴-۵: مقادیر سرعت محوری شعله برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۸۶\ mm^2$ ۴۹
شکل۴-۶: تغییرات شکل شعله گاز طبیعی تا لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی v **شکل** برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۸۶\ mm^2$ ۵۱
شکل۴-۷: مقادیر نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۵۰\ mm^2$ ۵۳
شکل۴-۸: مقادیر سرعت محوری شعله برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۵۰\ mm^2$ ۵۳
شکل۴-۹: تغییرات شکل شعله گاز طبیعی تا لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی v شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۵۰\ mm^2$ ۵۵
شکل۴-۱۰: مقادیر نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل برای مقاطع شعله مختلف ۵۷
شکل۴-۱۱: مقادیر سرعت محوری شعله برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل برای مقاطع شعله مختلف ۵۷
شکل۴-۱۲: لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی vشکل ۵۸
شکل۴-۱۳: مقادیر نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۳۰۷\ mm^2$ ۵۹
شکل۴-۱۴: مقادیر سرعت محوری شعله برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی vشکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۳۰۷\ mm^2$ ۶۰

شکل۴-۱۵: تغییرات ارتفاع برخاستگی شعله‌ی چرخشی vشکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۳۰۷\ mm^2$ **۶۱**

شکل۴-۱۶: مقادیر نسبت هم ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی Vشکل برای قطر مخروط خارجی برابر ۶ میلی‌متر **۶۲**

شکل۴-۱۷: مقادیر سرعت محوری شعله برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۸۶\ mm^2$ **۶۳**

شکل۴-۱۸: تغییرات ارتفاع برخاستگی شعله‌ی چرخشی vشکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۸۶\ mm^2$ **۶۴**

شکل۴-۱۹: مقادیر نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۵۰\ mm^2$ **۶۵**

شکل۴-۲۰: مقادیر سرعت محوری شعله برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی V شکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۵۰\ mm^2$ **۶۶**

شکل۴-۲۱:تغییرات ارتفاع برخاستگی شعله‌ی چرخشی vشکل برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۵۰\ mm^2$ **۶۷**

شکل**۴-۲۲:** لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی V شکل **۶۸**

شکل۴-۲۳: مقادیر نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی V شکل برای مقاطع شعله مختلف **۶۹**

شکل۴-۲۴: مقادیر سرعت محوری شعله برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی V شکل برای مقاطع شعله مختلف **۶۹**

شکل۴-۲۵: مقادیر نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی خاموشی شعله برای مساحت جریان خروجی برابر $۳۰۷\ mm^2$ **۷۱**

شکل۴-۲۶: مقادیر سرعت محوری شعله برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی خاموشی شعله برای مساحت جریان خروجی برابر $۳۰۷\ mm^2$ **۷۱**

شکل۴-۲۷: مقادیر نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی خاموشی شعله برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۸۶\ mm^2$ **۷۲**

شکل۴-۲۸: مقادیر سرعت محوری شعله برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی خاموشی شعله برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۸۶\ mm^2$ **۷۳**

شکل۴-۲۹: مقادیر نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی خاموشی شعله برای **۷۴**

مساحت جریان خروجی برابر $۲۵۰\ mm^2$
شکل۴-۳۰: مقادیر سرعت محوری شعله برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی خاموشی شعله برای مساحت جریان خروجی برابر $۲۵۰\ mm^2$ **۷۵**
شکل۴-۳۱:مقادیر نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی خاموشی شعله برای مقاطع مختلف محل تشکیل شعله **۷۶**
شکل۴-۳۲:مقادیر سرعت محوری شعله برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی خاموشی شعله برای مقاطع مختلف محل تشکیل شعله **۷۷**

فهرست علائم اختصاری

نرخ انتقال حرارت (kW)	$\dot{Q}$
دبی حجمی (m^3/s)	$\dot{V}$
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
سرعت شعله (cm/s)	V
دما (^oC)	T
چرخش	S

فهرست علائم یونانی

چگالی (kg/m^3)	ρ
نسبت هم‌ارزی	φ

فهرست زیرنویس‌ها

هوا	a
سوخت یا نهایی	f
اشتعال	i
آرام	L
متوسط	m
مخلوط	mix
استوکیومتری	STO

فصل ۱

مفاهیم سوخت و احتراق

۱–۱–مقدمه

احتراق یکی از قدیمی‌ترین تکنولوژی‌های بشر است. در حال حاضر در حدود ۹۰ درصد انرژی جهان از سوختن سوخت‌های فسیلی حاصل می‌شود. لذا افزایش تقاضا و کاهش ذخیره سوخت فسیلی و همچنین کاهش سطح آلودگی‌ها نیاز به بهبودی بیشتر در سیستم‌های احتراق را امری غیر قابل انکار می‌کند. در پی چنین اهدافی، تکنولوژی احتراق در محیط چرخشی طرحی است که مزیت‌های زیادی را در سیستم احتراقی ایفا می‌کند. امروزه استفاده از جریان‌های چرخشی در طراحی سیستم‌های احتراقی با بازده بالا و کاهش آلاینده‌ها در آن‌ها بسیار مورد توجه است. جریان‌های چرخشی به منظور افزایش پایداری شعله‌ها در کوره ها، توربین‌های گازی، دیگ‌های بخار، مشعل‌ها و موتورهای احتراق داخلی کاربرد گسترده‌ای دارند. اثرات کلی چرخش بر ساختار جریان به خوبی شناخته شده‌اند. ساختار هندسی مشعل،اختلاط سوخت و هوا و مشخصات جریان بر شکل شعله،پایداری و توزیع دما در جریان‌های چرخشی تاثیر می‌گذارد [۱].

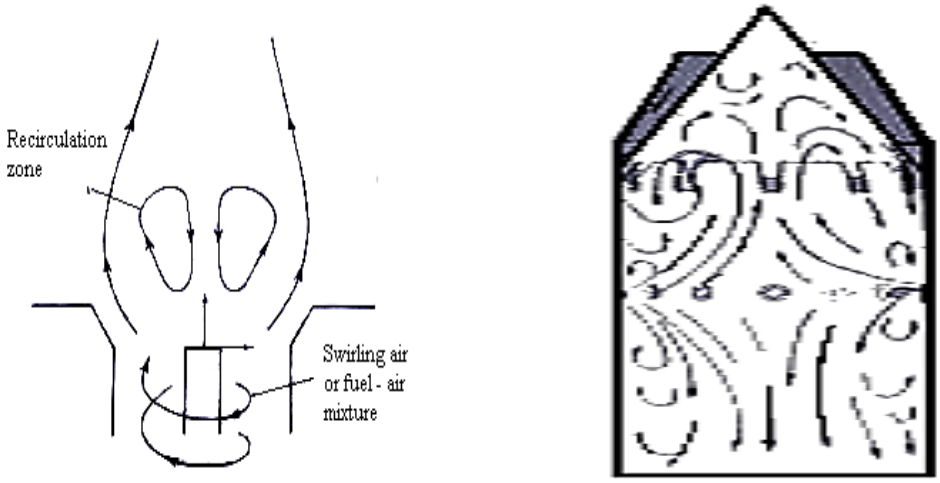
شعله‌ی چرخشی V شکل با توجه به کوتاهی طول، راندمان حرارتی بالا و کاهش آلاینده‌ها مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. از این شعله به‌طور گسترده در محفظه‌های احتراق توربین گاز، مشعل‌های چرخشی و محفظه‌های احتراق چرخشی استفاده می‌شود. دلیل اولیه و مقدماتی استفاده از چرخش، افزایش سطح شعله و افزایش پایداری شعله به واسطه کاهش نرخ سرعت محوری و به‌وجود آمدن مولفه‌ی سرعت شعاعی می‌باشد[۱]. هم‌چنین چرخش روشی برای بالا بردن کیفیت اختلاط سوخت و هوا بوده و ایجاد شعله چرخشی V شکل منجر به پایدار شدن شعله، کنترل احتراق و هم‌چنین افزایش بازده احتراق می‌شود[۲].

همان‌طور که گفته شد ایجاد یک منطقه‌ی بازگردش[1] می‌تواند باعث پایداری شعله شود. این منطقه‌ی بازگردش می‌تواند به وسیله‌ی یک چرخاننده جامد که در مسیر ورودی قرار می‌گیرد و یا

[1] recirculation

با هدایت شعله در مسیر مناسب در فضای احتراق ایجاد شود. شکل(۱-۱) ایجاد چرخش با قرار دادن چرخاننده در مسیر ورودی گاز و چند وضعیت از ایجاد چرخش به وسیله‌ی هدایت شعله را نشان می‌دهد[۲].

.



شکل ۱-۱: الف) ایجاد چرخش با قرار دادن چرخاننده ب) ایجاد چرخش با هدایت شعله[۲]

۱-۲-مروری بر کارهای انجام شده:

جریان‌های جت چرخشی سبب پایداری شعله و اختلاط خوب سوخت و هوا می‌شود. به همین دلیل مورد توجه محققین احتراق قرار گرفته اند. بررسی اولیه مطالعات احتراق جریان‌های چرخشی توسط سیرد[۳] صورت گرفته است. بیشتر تحقیقات جریان‌های چرخشی و تأثیر چرخش در تشکیل NO_X می‌باشد که اولین بار توسط کلایپل[۴] مورد بررسی قرار گرفت محدوده پایداری توسط راو [۵] محدوده انفجار توسط فیکما و همکاران [۶] و پایداری شعله توسط هیلمنز و همکاران [۷] مورد بررسی قرار گرفت.

کر[۸] با اندازه گیری مولفه‌های شعاعی و محوری سرعت نشان داد که اعمال چرخش موجب کاهش سرعت محوری شده، جبهه‌ی شعله به مشعل نزدیک شده و همچنین باعث افزایش پایداری شعله می‌شود. یوآسا و همکاران [۹] با چرخش دادن همزمان سوخت و هوا، حدود پایداری شعله غیر پیش آمیخته پروپان و هیدروژن را بررسی کردند آن‌ها مشاهده کردند که نتایج حالت کم چرخش بسیار مشابه حالت بدون چرخش است. اما در چرخش‌های بالاتر به دلیل پدید آمدن ناحیه بازگردش در نزدیکی خروجی نازل سوخت، محدوده پایداری شعله افزایش می‌یابد.

چوی و کیم[۱۰] در مطالعات تجربی خود به بررسی شعله‌های چرخشی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۵۷تا ۱ شعله‌های چرخشی، پایدار بوده و در نسبت‌های هم‌ارزی کم‌تر از ۰/۵ این شعله‌ها ایجاد نمی‌شوند. همچنین چائو و همکاران [۱۱] سرعت خاموشی شعله غیر پیش آمیخته متان، پروپان و هیدوژن با اکسید کننده هوا، همراه با رقیق سازی با نیتروژن و دی اکسید کربن را بررسی کردند و ضمن تاکید بر کاهش حدود پایداری همراه با رقیق‌سازی، سرعت‌های خاموشی را با نظریه‌های خاموشی شعله تخمین زدند. همچنین در بررسی‌های خود نتیجه گرفتند که در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸ تا ۱/۴ می‌توان یک شعله چرخشی آرام تشکیل داد.

هوبن[۱۲] به کمک همکاران خود بررسی‌هایی روی شعله‌ی چرخشی آشفته انجام داند.گوپتا و همکاران [۱۳] مطالعاتی را بر روی جریان‌های چرخشی انجام دادند و دریافتند که جریان چرخشی منجر به افزایش اختلاط جریان، پایداری شعله و کاهش طول شعله می‌گردد. بیر و چیگیر [۱۴] پس از انجام آزمایش‌های مختلف، جریان‌های چرخشی را به دو دسته‌ی جریان چرخشی ضعیف و جریان چرخشی قوی تقسیم بندی کردند. فیلیپ و همکاران [۱۵] نیز آزمایش‌های گسترده‌ای برای ایجاد شعله‌های پیش‌آمیخته و غیر پیش‌آمیخته انجام دادند. جزییات آزمایشگاهی بیش‌تری درمورد شعله‌های چرخشی اخیرا توسط[۱۶] ارائه شده است.بخشی از برنامه‌های تحقیقاتی شرکت

TECFLAM با هدف ایجاد و ارتقا مدل‌های عددی احتراق روی جریان‌های چرخشی صورت گرفته است[۱۷].

تامرزو همکاران [۱۸] نیز با ایجاد شعله‌ی چرخشی V شکل و مقایسه‌ی آن با شعله‌های معمولی به این نتیجه رسیدند که شعله‌های ایجاد شده در مقایسه با شعله‌های معمولی دارای طول کوتاه‌تر، توان بیش‌تر و آلودگی کم‌تری هستند. آن‌ها با استفاده از یک ترمومتر دمای شعله را به دست آورده و نتایج لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی را برحسب دما ارائه کردند. فیکما و همکاران [۶] در یک سری تحقیقات بر روی یک مشعل نفوذی چرخشی، تاثیر میزان چرخش بر افزایش پایداری شعله را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که چرخش می‌تواند شعله را تا حد بسیار بالاتری نسبت به حالت بدون چرخش پایدار سازد. رفتار جریان‌های کم چرخش را می‌توان با جریان بدون چرخش مقایسه کرد. در جریان‌های هم محور و بدون چرخش با افزایش سرعت سوخت، شعله ابتدا از فاز آرام وارد فاز مغشوش شده و با افزایش پیوسته‌ی سرعت سوخت،شعله از روی نازل بلند می‌شود[۱۶].

روآن و همکاران [۱۷] اثر رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن و دی اکسید کربن را بر پایداری شعله آرام متان به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آنها نشان دادند که اثر دی اکسید کربن بر روی پایداری شعله بیشتر از نیتروژن است. ویلسون و همکاران [۱۹] اثر رقیق سازی هوا را بر پایداری شعله غیر پیش آمیخته متان و اتیلن رقیق شده با نیتروژن بررسی کرده و دریافتند رقیق‌سازی موجب کاهش سرعت‌های پایداری شعله می‌شود. زیرا کاهش سرعت هوا موجب کم شدن مؤلفه‌های سرعت و کاهش شدت ناحیه بازگردش گوشه‌ای شده که در نهایت موجب کاهش پایداری شعله می‌شود. ژائو و همکاران [۲۰] راندمان حرارتی یک مشعل چرخشی پیش‌آمیخته را بررسی کردند و نشان دادند که در حالتی که چرخش وجود دارد احتراق بهتری صورت گرفته، در نتیجه بازده حرارتی بیشتر است. همچنین نشان دادند که هم در حالت چرخش و هم بدون

چرخش با افزایش عدد رینولدز مصرف سوخت کاهش می‌یابد.کک و همکاران [۲۱] با استفاده از عددهای چرخش مختلف،اثر عدد چرخش بر تولید آلاینده اکسید نیتروژن را بررسی کردند. آنها نشان دادند که با افزایش عدد چرخش به دلیل کاهش دمای محفظه احتراق، میزان NO_X تولیدی نیز کاهش می‌یابد. همچنین میر و همکارانش [۲۲] تاثیر چرخش بر کاهش آلاینده‌های هوا را مورد مطالعه قرار دادند. روحانی و همکاران [۱] اثر چرخش و رقیق سازی اکسید کننده بر پایداری احتراق غیر پیش آمیخته گاز طبیعی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند در جریان با چرخش ضعیف، با افزایش سرعت سوخت، شعله از روی نازل بلند شده و در سرعت‌های بالاتر دچار خاموشی می‌شود. همچنین آن‌ها نشان دادند که در جریان با چرخش قوی، شعله در فاصله کمی از نازل سوخت بلند شده و بسیار پایدار است.

شبیه سازی عددی برای انواع مختلف مدل‌های مشعل چرخشی ابتدا توسط ویدمن [۲۳] مورد مطالعه قرار گرفت. آنکاکلت [۲۴] روی محفظه احتراق با پره‌های مورب که توسط یک موتور چرخشی به حرکت درمی‌آید تحقیق کرده است. وانگ [۲۵] روی مشعل‌های چرخشی از نوع پیشروی جت[۲] تحقیق کرده که می‌تواند انتشار NO_X را تا حدود ۲۰ تا ۶۰ درصد کاهش دهد. راکس و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۰۵، ماسری و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۰۴، بیشتر آزمایش‌ها را روی تشکیل پدیده چرخش مجدد مرکزی و تاثیر آن روی پدیده‌ی پیشروی هسته‌ی گردابی یا جت گردابه پیشرو[۳] مشعل‌های چرخشی انجام دادند.

با توجه به اهمیت پایدار کردن شعله امروزه تلاش های بسیاری برای رسیدن به این مهم صورت می‌پذیرد. در صورت داشتن شعله‌ای ناپایدار و خاموشی، علاوه بر تولید دوده که منجر به آلودگی زیست محیطی می‌شود، زیان‌های ناشی از هدر رفت انرژی و از بین رفتن سرمایه‌های اقتصادی نیز از پیامد خاموشی نابهنگام شعله است. مطالعات مزبور در مجموع مربوط به شعله‌های

[2] Precessing Jet
[3] Precessing Vortex Jet

غیر پیش‌آمیخته بود. به خاطر اهمیت موضوع در پژوهش حاضر پایداری شعله پیش آمیخته گاز طبیعی با هوای چرخشی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. یعنی در مشعل مورد نظر پس از آنکه هوا ازکنار مشعل وارد شد به وسیله چرخاننده به چرخش درآمده و سوخت به آن اضافه می‌شود. بدین ترتیب یک مخلوط پیش‌آمیخته هوا و گاز برای احتراق ایجاد می‌شود.

در این تحقیق ابتدا اجزای مشعل چرخشی معرفی شده و نحوه‌ی انتخاب هریک از آن‌ها به طور کامل شرح داده شده است. پس از آن به بررسی شعله‌ی چرخشی و هم‌چنین تاثیر پارامترهای سرعت، نسبت هم‌ارزی و نرخ‌آتش بر روی شعله‌ی چرخشی V شکل پرداخته شده‌است. هم‌چنین به بررسی لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V شکل، لحظه‌ی برخاستگی شعله‌ی چرخشی V شکل و لحظه‌ی خاموشی پرداخته شده‌است.

۱-۳- بیان مفاهیم مرتبط با احتراق

۱-۳-۱- انواع احتراق

احتراق به دو دسته کلی کامل و ناقص دسته بندی می‌شود. احتراق کامل[۴] احتراقی است که در آن همه‌ی کربن و هیدروژن موجود در سوخت به CO_2 و H_2O تبدیل شده و در نتیجه حداکثر حرارت ممکن تولید شود. در حالی که در احتراق ناقص[۵] معمولاً تمام سوخت موجود نمی‌سوزد و اگر هم تمام آن بسوزد، به محصولات نهایی مثل H_2O و CO_2 به طور کامل تبدیل نمی‌شود، بلکه تعداد زیادی ترکیبات واسطه مانند CO و OH و ... در محصولات احتراق ایجاد می‌شود. احتراق کامل صرفاً یک حالت ایده‌آل بوده و در عمل احتراق به طور ناقص رخ می‌دهد. برخی از علل مهم ناقص بودن احتراق عبارتند از:

۱- کافی نبودن مقدار اکسیژن

---

[4] complete combustion
[5] incomplete combustion