



## بررسی تجربی پایداری شعله V شکل در یک مشعل چرخشی پیش آمیخته

سید عبدالمهدی هاشمی<sup>۱\*</sup>، مجید حاجی زاده<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان  
۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

(دریافت: ۱۳۹۲/۸/۲۶ پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۲۳)

### چکیده

در این تحقیق پایداری شعله V شکل در یک مشعل چرخشی پیش آمیخته مطالعه شده است. اثر نرخ آتش (نرخ انرژی ورودی بر واحد سطح)، نسبت هم‌ارزی و سرعت محوری جریان مخلوط سوخت و هوا بر پایداری شعله‌ی چرخشی V شکل بررسی شده است. برای ایجاد چرخش از چرخاننده‌ای با زاویه‌ی چرخش ۴۵ درجه در مسیر هوای ورودی استفاده شده که منجر به ایجاد یک جریان چرخشی با عدد چرخش برابر ۰/۷۸ شده است. مشاهدات نشان می‌دهد که شعله‌ی چرخشی V شکل در مخلوط رقیق سوخت و هوا ( $\Phi < 1$ ) تشکیل می‌شود. با افزایش نرخ آتش، سرعت جریان مخلوط در لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی V مستقل از دبی جریان بوده و در محدوده‌ی ۱ m/s تا ۵ m/s به صورت خطی نسبت به نرخ آتش افزایش می‌یابد. برخاستگی شعله نیز با افزایش نرخ آتش در سرعت جریان و نسبت هم‌ارزی بالاتری رخ می‌دهد. بررسی خاموشی شعله نشان می‌دهد که با افزایش سرعت مخلوط ورودی خاموشی در نسبت هم‌ارزی کمتر و نرخ آتش بیشتری اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب محدوده پایداری شعله V با افزایش دبی جریان افزایش می‌یابد.

### کلمات کلیدی:

مشعل چرخشی، پایداری شعله، شعله‌ی V شکل، شعله پیش آمیخته.

Please cite this article using:

Hashemi, S. A., Hajizade, M., 2016. "Experimental Study of Stability of V-shaped Flame in a Pre-mixed Swirl Burner". *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(3), pp. 315-322.  
URL: [http://mej.aut.ac.ir/article\\_619.html](http://mej.aut.ac.ir/article_619.html)

نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات: Email: [hashemi@kashanu.ac.ir](mailto:hashemi@kashanu.ac.ir)



## ۱- مقدمه

در حال حاضر حدود ۹۰ درصد انرژی جهان از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. با توجه به افزایش تقاضا و کاهش ذخایر سوختی و به منظور کاهش سطح آلودگی‌های ناشی از احتراق، بهبود سیستم‌های احتراقی مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این راستا استفاده از جریان‌های چرخشی به عنوان یک راهکار مطرح شده است. چرخش جریان ورودی با ایجاد مؤلفه‌ی مماسی سرعت، باعث ایجاد گرادیان فشار منفی و در نتیجه القای یک جریان داخلی چرخشی می‌شود. برای بررسی بهتر جریان‌های چرخشی و طبقه‌بندی قدرت چرخاننده‌ها، پارامتر بی‌بعد عدد چرخش تعریف می‌شود که با توجه به آن جریان‌های چرخشی به دو دسته‌ی ضعیف و قوی تقسیم می‌شوند [۱].

بالا بودن سرعت دورانی در جریان‌های چرخشی، باعث ایجاد نواحی کم‌فشار در مرکز جریان و در نتیجه کاهش سرعت محوری شده که این موضوع با افزایش عدد چرخش، منجر به بازگشت جریان نیز می‌شود. بازگشت محصولات داغ احتراق از مرکز جریان به جریان نسوخته موجب تشدید اشتعال مخلوط نسوخته می‌شود که این امر موجب می‌شود شکل شعله معمولی که مخروطی است تبدیل به شکل V شود [۲]. با استهلاک شدت چرخش در پایین‌دست جریان که ناشی از تلفات اصطکاکی و همچنین پخش اندازه حرکت دورانی در محیط آزاد است، ناحیه برگشتی به تدریج محو می‌شود [۳]. چرخش با افزایش کیفیت اختلاط سوخت و هوا و ایجاد مؤلفه‌ی شعاعی سرعت سبب افزایش راندمان سیستم، کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، افزایش پایداری شعله و کوتاهی طول شعله می‌شود. به همین دلایل از این فن‌آوری به طور گسترده در محفظه احتراق توربین‌های گازی، کوره‌ها، موتورهای احتراق داخلی و دیگ‌های بخار استفاده می‌شود.

مطالعات گسترده‌ای در زمینه جریان‌های چرخشی احتراقی صورت گرفته که شامل دو دسته‌ی تجربی و عددی می‌شود. به منظور به کارگیری موثر شعله‌های چرخشی، بخشی از مطالعات تجربی به موضوع محدوده پایداری و رژیم شعله تشکیل شده معطوف شده است. پارامترهای مورد بررسی اغلب عبارت‌اند از نسبت هوا به سوخت، سرعت هوا و سوخت (در حالت غیر پیش‌مخلوط) و سرعت مخلوط هوا و سوخت (در حالت پیش‌مخلوط)، میزان چرخش، محدوده پایداری رژیم‌های مختلف شعله و میزان آلاینده‌های احتراق. گفتنی است که عمده مطالعات صورت‌گرفته روی شعله‌های چرخشی مربوط به شعله‌های غیر پیش‌مخلوط است. به منظور بررسی یک نمونه شعله پیش‌مخلوط چرخشی، این تحقیق به مطالعه یک نمونه شعله از این نوع می‌پردازد. در ادامه برخی مطالعات انجام‌شده با زمینه مشابه ارائه می‌شود.

چوی و کیم [۴] در مطالعات تجربی خود نشان دادند که در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۵۷ تا ۱ شعله‌های چرخشی پایدار بوده و در نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از ۰/۵ این شعله‌ها ایجاد نمی‌شوند. تامرز و همکاران [۵] نیز با ایجاد شعله‌ی V شکل و مقایسه‌ی آن با شعله‌های

معمولی به این نتیجه رسیدند که شعله‌های ایجادشده در مقایسه با شعله‌های معمولی دارای طول کوتاه‌تر، توان بیشتر و آلودگی کمتری هستند. آن‌ها با استفاده از یک دماسنج دمای شعله را به دست آورده و نتایج لحظه‌ی تشکیل شعله‌ی چرخشی را برحسب دما ارائه کردند. بیر و چیگیر [۱] پس از انجام آزمایش‌های مختلف، با استفاده از عدد چرخش<sup>۱</sup>، جریان‌های چرخشی را به دو دسته‌ی جریان چرخشی ضعیف و جریان چرخشی قوی تقسیم کردند.

یوآسا و همکاران [۶] با چرخش همزمان سوخت و هوا، حدود پایداری شعله غیر پیش‌آمیخته پروپان و هیدروژن را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که پایداری شعله در حالتی که هم سوخت و هم هوا همزمان چرخشی باشند خیلی بیشتر از حالتی است که فقط هوا در چرخش باشد. آن‌ها همچنین دریافتند که حالت کم‌چرخش بسیار مشابه حالت بدون چرخش است، اما در حالت چرخش بالا به دلیل پدید آمدن ناحیه بازگردش در نزدیکی خروجی نازل سوخت، محدوده پایداری شعله افزایش می‌یابد. چائو و همکاران [۷] سرعت خاموشی شعله غیر پیش‌آمیخته متان، پروپان و هیدروژن با اکسیدکننده هوا، همراه با رقیق‌سازی با نیتروژن و دی‌اکسیدکربن را بررسی کردند و ضمن تأکید بر کاهش حدود پایداری همراه با رقیق‌سازی، سرعت‌های خاموشی را با نظریه‌های خاموشی شعله تخمین زدند. فیکما و همکاران [۸] در یک سری تحقیقات بر روی یک مشعل نفوذی چرخشی، تأثیر میزان چرخش بر افزایش پایداری شعله را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که چرخش می‌تواند شعله را تا حد زیادی در مقایسه با حالت بدون چرخش پایدار سازد. روحانی و همکاران [۹] اثر چرخش و رقیق‌سازی اکسیدکننده بر پایداری احتراق غیر پیش‌آمیخته 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.

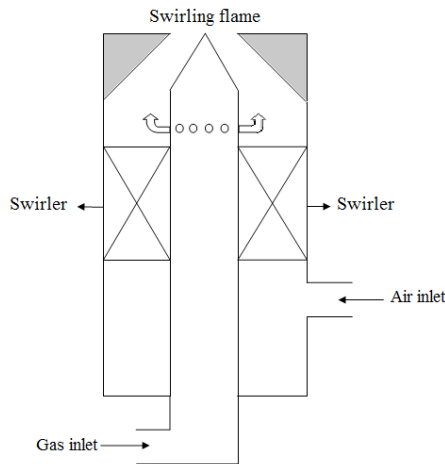
ژائو و همکاران [۱۰] راندمان حرارتی یک مشعل چرخشی پیش‌آمیخته را بررسی کردند و نشان دادند در حالتی که چرخش وجود دارد احتراق بهتری صورت گرفته، در نتیجه بازده حرارتی بیشتر است. همچنین نشان دادند که هم در حالت چرخش و هم بدون چرخش با افزایش عدد رینولدز، مصرف سوخت کاهش می‌یابد.

این تحقیق به بررسی تجربی نحوه شکل‌گیری و خاموشی شعله V شکل در یک مشعل پیش‌آمیخته چرخشی می‌پردازد. بدین منظور تأثیر پارامترهای سرعت محوری جریان خروجی، نسبت هم‌ارزی و نرخ آتش در لحظات تشکیل، برخاستگی و خاموشی VSF بررسی شده است.

1 Swirl number

## ۲- دستگاه آزمایش

دستگاه ساخته شده برای این منظور از اجزای مختلف از جمله کمپرسور هوا، ریگلاتور، فیلتر هوا، روتامتر و مشعل تشکیل شده است. برای تأمین هوای مورد نیاز برای احتراق از کمپرسوری با قابلیت فشرده کردن هوا تا ۱۰ bar استفاده شده است. به منظور کاهش و تثبیت فشار هوا، یک تنظیم کننده فشار به کار رفته است و برای جلوگیری از ورود قطرات آب و ذرات گرد و غبار در مسیر هوا یک فیلتر نصب شده است تا از بروز خطای احتمالی در روتامتر جلوگیری شود. با توجه به شکل ۱، برای اندازه گیری دبی هوا و دبی سوخت دو روتامتر تعبیه شده است که روتامتر هوا قابلیت اندازه گیری دبی حداکثر  $7 \text{ m}^3/\text{hr}$  با دقت اندازه گیری  $0.14 \text{ m}^3/\text{hr}$  را دارد و روتامتر سوخت نیز دبی را تا حداکثر  $10 \text{ lit}/\text{min}$  با دقت  $0.2 \text{ lit}/\text{min}$  اندازه گیری می کند.



شکل ۲: طرحواره ی مشعل چرخشی پیش آمیخته



شکل ۳: قسمت های مشعل  
(الف) چرخاننده (ب) مخروط داخل تراش (ج) مخروط خارجی



شکل ۱: روتامترهای هوا و سوخت

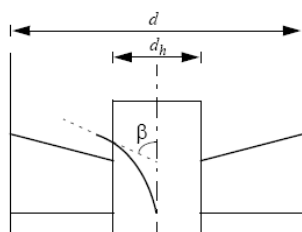
### ۲-۱- عدد چرخش

عدد چرخش به صورت نسبت شار محوری تکانه چرخشی بر شار محوری تکانه محوری تعریف می شود [۲]:

$$S = \frac{G_\theta}{G_X(d/2)} \quad (1)$$

$G_\theta$  شار اندازه حرکت چرخشی،  $G_X$  شار اندازه حرکت محوری و  $d$  قطر کانال عبور جریان است.

شکل ۴ هندسه شماتیک یک چرخاننده ی جریان را نشان می دهد. پره ها به واسطه زاویه  $\beta$  سبب ایجاد جریان چرخشی می شوند. خط منحنی در وسط شکل شمای یک پره بدون ضخامت را از نمای جانبی نشان می دهد که هوا را از یک زاویه کوچک در ورودی تا زاویه  $\beta$  تغییر جهت می دهد که موجب القای مؤلفه زاویه ای و چرخشی به جریان می شود.



شکل ۴: طرحواره هندسه یک چرخاننده ی جریان

در این آزمایش از یک مشعل پیش آمیخته چرخشی استفاده شده که در شکل ۲ طرحواره ای از آن نشان داده شده است. مطابق شکل ۲، هوا از ورودی تعبیه شده روی بدنه وارد چرخاننده می شود. برای چرخش هوا از چرخاننده ای با زاویه ی چرخش ۴۵ درجه و با ابعاد  $70 \times 50 \times 50$  میلی متر استفاده شده و سوخت نیز از طریق استوانه ای با قطر  $30 \text{ mm}$  وارد سرمشعل می شود. با توجه شکل ۳، سرمشعل از دو قسمت مخروطی شکل و رویه ای آن (قسمت پررنگ) تشکیل شده است. در این قسمت تزریق سوخت در مسیر هوا صورت گرفته و ضمن اختلاط سوخت و هوا سطح مقطع های مختلف برای خروجی مخلوط سوخت و هوا با پچاندن رویه ی مخروط ایجاد می شود. سوخت از طریق سوراخ هایی با قطر  $2 \text{ mm}$  که روی مخروط تعبیه شده وارد رویه شده (مسیر ورود گاز با فلش توخالی نشان داده شده است) و در آنجا با هوایی که از چرخاننده خارج می شود، برخورد می کند و سپس مخلوط سوخت و هوا از سرمشعل در قسمت بالایی شکل خارج می شود.

عدد چرخش که با زاویه پره در ارتباط است به صورت معادله‌ی (۲) بیان می‌شود [۱۲]:

$$S = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - \left[ \frac{R_1}{R_2} \right]^3}{1 - \left[ \frac{R_1}{R_2} \right]^2} \right] \tan(\beta) \quad (2)$$

در معادله‌ی (۲)  $R_1$  قطر داخلی چرخاننده و  $R_2$  قطر خارجی آن و  $\beta$  زاویه چرخش پره است. چنانچه عدد چرخش کمتر از  $0/6$  باشد چرخش ضعیف و اگر از  $0/6$  بیشتر باشد چرخش قوی محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر از چرخاننده‌ای با قطر داخلی  $25 \text{ mm}$ ، قطر خارجی  $50 \text{ mm}$  و زاویه چرخش  $45^\circ$  استفاده شده است. با استفاده از معادله‌ی ۲ عدد چرخش برابر با  $0/78$  بوده و بنابراین جریان از نوع چرخشی قوی تلقی می‌شود [۱].

### ۳- نتایج

در آزمایش‌ها دبی سوخت، دبی هوا و سطح مقطع خروجی مخلوط سوخت و هوا به عنوان متغیر مدنظر قرار گرفته و به بررسی نتایج بر حسب نسبت هم‌ارزی، نرخ آتش و سرعت شعله در لحظات تشکیل VSF، برخواستگی VSF از سرمشعل و خاموشی آن پرداخته شده است. نسبت هم‌ارزی عبارت است از نسبت سوخت به هوا بر پایه جرمی در حالت واقعی به نسبت سوخت به هوای استوکیومتری که به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\phi = \frac{FAR}{FAR_{STO}} \quad (3)$$

نرخ آتش عبارت است از ارزش حرارتی سوخت در دبی جرمی آن به واحد سطح مشعل که به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$FR = \frac{LHV \times Q_f}{A} \quad (4)$$

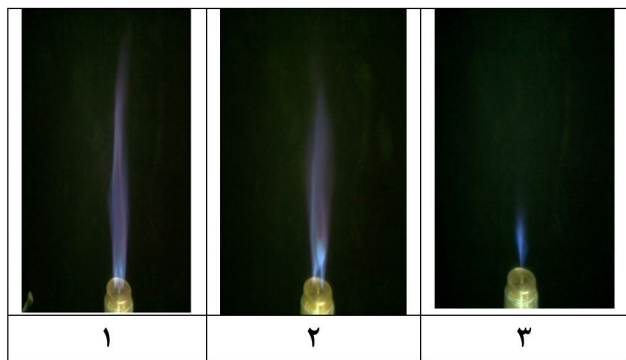
که در آن  $LHV$  ارزش حرارتی گاز طبیعی بر حسب  $\text{kJ/m}^3$ ،  $Q_f$  دبی حجمی گاز بر حسب  $\text{kJ/m}^3$  و  $A$  سطح مقطع مشعل بر حسب  $\text{m}^2$  است. با استفاده از داده‌های استعلامی از شرکت گاز منطقه ارزش گرمایی پایین گاز طبیعی برابر  $8400 \text{ kcal/m}^3$  و چگالی گاز طبیعی  $0/727 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است. در تحلیل فرایندهای احتراقی از پارامتر توان حرارتی یا نرخ آتش استفاده می‌شود که نرخ آتش همان توان حرارتی بر واحد سطح است. به همین دلیل نرخ آتش بیانگر نوعی چگالی انرژی خروجی از مشعل خواهد بود و نسبت به توان حرارتی پارامتر مفیدتری است. در عمده تحلیل‌هایی که سطح مقطع نیز اهمیت دارد مانند احتراق در محیط‌های متخلخل از پارامتر نرخ آتش استفاده می‌شود. سرعت مخلوط از تقسیم مجموع دبی سوخت و هوا بر سطح مقطع عبور جریان به دست می‌آید.

با توجه به شکل ۲ برای ایجاد مقاطع مختلف از یک سطح حلقوی استفاده شده که قطر خارجی آن ثابت و برابر با  $20 \text{ mm}$  و قطر داخلی آن با استفاده از رویه قابل تنظیم است. آزمایش‌ها برای مقاطع  $250$ ،  $280$  و  $310$  میلی‌متر مربع انجام شده است. با توجه به این که در مقاطع کمتر از  $250 \text{ mm}^2$  نتایج گستردگی نداشته و تنها در یک یا دو دبی سوخت، VSF تشکیل شده بنابراین آزمایش‌ها در مقاطع بیش از آن انجام شده است.

بدین ترتیب پارامترهای اصلی آزمایش عبارت‌اند از دبی سوخت، دبی هوا و سطح مقطع خروجی که آزمون‌ها با تغییر این پارامترها انجام می‌شوند. اما پارامترهایی که نتایج آزمون‌ها بر حسب آنها ارائه می‌شوند عبارت‌اند از نرخ آتش (تابع دبی سوخت)، نسبت هم‌ارزی (تابع دبی سوخت و هوا) و سرعت سوخت و هوا (تابع دبی سوخت، دبی هوا و سطح مقطع). در هر مرحله از آزمایش دبی سوخت ثابت نگه داشته شده و دبی هوا به صورت تدریجی افزایش می‌یابد و بدین ترتیب نرخ آتش ثابت و نسبت هم‌ارزی کاهش می‌یابد. با افزایش دبی هوا ابتدا VSF تشکیل یافته و در ادامه مشاهده می‌شود که در یک سرعت بحرانی که به آن سرعت برخواستگی گفته می‌شود، شعله از سر سطح مشعل جدا شده و با افزایش هرچه بیشتر دبی هوا شعله فاصله‌ی بیشتری از سطح مشعل گرفته تا در نهایت خاموش می‌شود. در مرحله‌ی بعدی دبی سوخت افزایش داده می‌شود و آزمایش برای دبی سوخت جدید انجام می‌گیرد.

#### ۳-۱- نسبت هم‌ارزی و سرعت محوری در لحظه‌ی تشکیل VSF

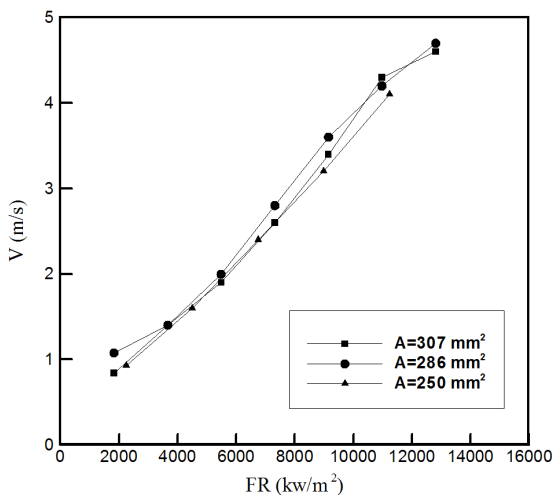
در شکل ۵ تصاویری از نحوه‌ی تشکیل VSF در یک دبی ثابت سوخت نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش دبی هوا طول شعله کاهش یافته و در نهایت VSF تشکیل می‌شود. ویژگی مهم VSF که تشخیص آن را با دیدن امکان‌پذیر می‌سازد کوتاهی طول و شکل V آن است که در نتیجه بازگشت گازهای داغ احتراق در ناحیه بازگردش داخلی به ناحیه مخلوط سوخت و هوا و اشتعال آنها است.



شکل ۵: نحوه‌ی تشکیل VSF با افزایش دبی هوا

شکل ۶ نسبت هم‌ارزی مخلوط در لحظه‌ی تشکیل VSF را بر حسب نرخ آتش در مقاطع مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است در تمامی مقاطع VSF در مخلوط رقیق سوخت و هوا



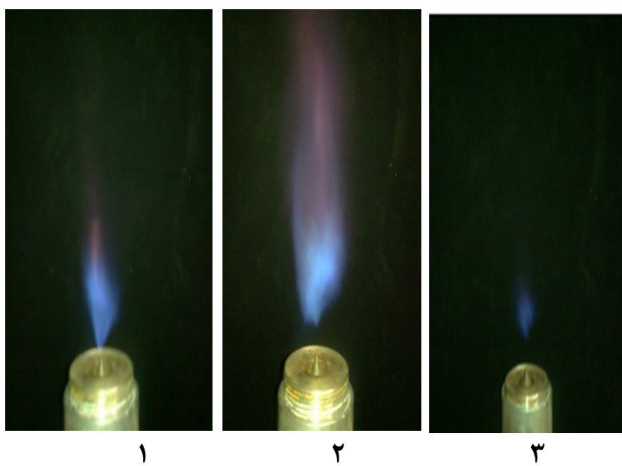


شکل ۷: مقادیر سرعت محوری برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی تشکیل VSF برای مقاطع مختلف

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان دریافت که تشکیل VSF به طور مشخص وابسته به نرخ آتش و سرعت مخلوط است اما ارتباط مشخصی به نسبت هم‌ارزی ندارد هرچند به طور تقریبی در محدوده ۰/۸ تا ۰/۹ صورت می‌گیرد.

۳-۲- نسبت هم‌ارزی و سرعت محوری در لحظه‌ی برخاستگی VSF برخاستگی (پرش) شعله به حالتی گفته می‌شود که با افزایش سرعت مخلوط سوخت و هوا شعله از دهانه مشعل جدا شده و در فاصله بالاتری تشکیل می‌شود.

در شکل ۸ تصاویری از زمان برخاستگی VSF نشان داده شده است. با افزایش سرعت خروجی مخلوط، شعله از سطح مشعل جدا شده و با افزایش بیشتر سرعت، این فاصله افزایش می‌یابد و در نهایت شعله خاموش می‌شود.

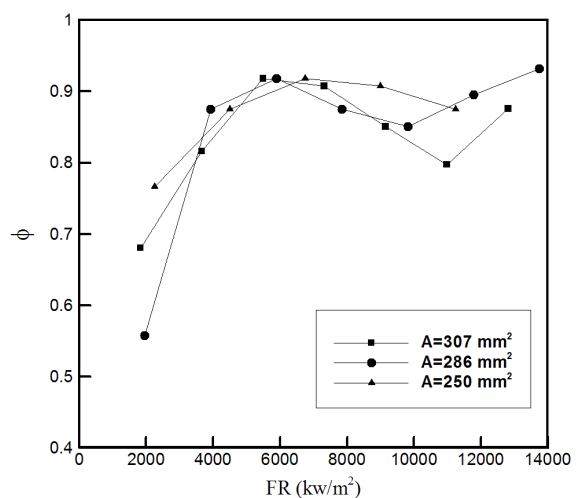


شکل ۸: لحظات برخاستگی و خاموشی VSF با افزایش دبی هوا در نرخ آتش  $FR=4700 \text{ kW/m}^2$  و نسبت هم‌ارزی به ترتیب ۰/۹۶، ۰/۵۶ و ۰/۵۴

در شکل ۹ نرخ آتش در زمان برخاستگی VSF روی محور افقی و

تشکیل شده است. با توجه به شکل ۶ در سطح مقطع  $280 \text{ mm}^2$  در نسبت هم‌ارزی ۰/۵۶ اولین VSF تشکیل شده و با افزایش نرخ آتش تا حدود  $5500 \text{ kW/m}^2$  نسبت هم‌ارزی افزایش یافته و در ادامه تغییرات نسبت هم‌ارزی در لحظه تشکیل VSF اندک است. برای دیگر مقاطع نیز همین رویه وجود داشته و با افزایش نرخ آتش تا حدود  $5500 \text{ kW/m}^2$  نسبت هم‌ارزی تا حدود ۰/۹ افزایش می‌یابد و بعد از آن نسبت هم‌ارزی در محدوده ۰/۸ تا ۰/۹ تغییر می‌کند.

توجه به این نکته ضروری است که ناحیه بالایی منحنی شکل ۶ جایی است که VSF تشکیل نشده و قسمت زیرین منحنی ناحیه‌ای است که VSF به حالت برخاستگی و در نهایت خاموش می‌شود.



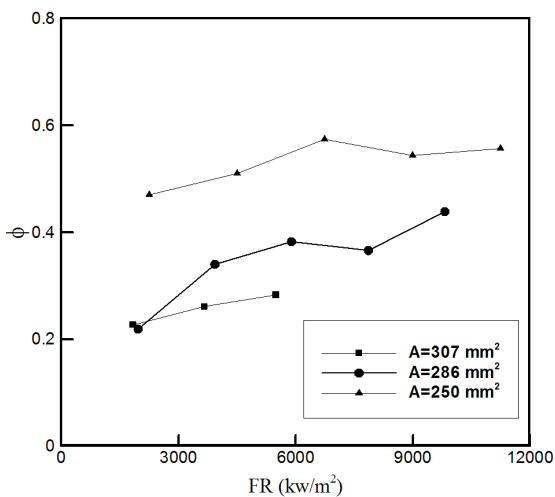
شکل ۶: مقادیر نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی تشکیل VSF برای مقاطع مختلف

در شکل ۷ برای مقاطع مختلف، مقادیر سرعت محوری در لحظه تشکیل VSF بر حسب نرخ آتش ارائه شده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، برای تمامی مقاطع خروجی، VSF در نرخ آتش  $2000 \text{ kW/m}^2$  در سرعت محوری حدود  $1 \text{ m/s}$  تشکیل شده و با افزایش نرخ آتش، تشکیل VSF در سرعت‌های بالاتری رخ داده است. همان‌طور که دیده می‌شود، رابطه‌ای خطی بین نرخ آتش و سرعت جریان هوا و سوخت خروجی برای لحظه تشکیل VSF وجود دارد. از آنجا که عامل اصلی در تشکیل VSF وجود ناحیه بازگردش در مرکز شعله است و عامل ایجاد این ناحیه بازگردش وجود اندازه حرکت زاویه‌ای است که به سرعت جریان بستگی دارد، بنابراین شکل ۷ نشان می‌دهد که تشکیل این شعله به سرعت جریان بستگی دارد و نه دبی آن. به همین ترتیب با افزایش نرخ آتش و حجم شعله، نیاز به ناحیه بازگردش بزرگ‌تری است و در سرعت بالاتری این ناحیه بازگردش بزرگ‌تر ایجاد می‌شود.

۳-۳- نسبت هم‌ارزی و سرعت محوری در لحظه‌ی خاموشی VSF

شکل ۱۱ مقادیر نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی در زمان خاموشی را نشان می‌دهد. با افزایش سطح مقطع، خاموشی در نسبت هم‌ارزی‌های کمتری رخ می‌دهد. در مقطع  $250 \text{ mm}^2$  خاموشی در محدوده نسبت هم‌ارزی  $0/5$  تا  $0/6$  رخ داده است در حالی که در مقطع  $280 \text{ mm}^2$  خاموشی در نسبت هم‌ارزی بین  $0/2$  تا  $0/4$  رخ داده است. از آنجا که آزمون‌ها در یک دبی ثابت سوخت و با افزایش دبی هوا انجام شده است، نتایج برای نسبت هم‌ارزی نشان می‌دهد که خاموشی می‌تواند نتیجه کاهش نسبت هم‌ارزی تا حد خاموشی شعله باشد. در این نسبت هم‌ارزی دمای شعله به شدت کاهش می‌یابد و بنابراین مکانیزم پایدارسازی شعله که پیش‌گرم شدن مخلوط سوخت و هوا توسط گازهای داغ احتراق است تضعیف می‌شود.

در مقطع  $310 \text{ mm}^2$  در نرخ آتش بیش از  $5000 \text{ Kw/m}^2$  به دلیل پایین بودن نسبت هم‌ارزی و افزایش شدید دبی هوا و محدودیت در اندازه‌گیری دبی هوا مقادیر مربوطه به دست نیامد.

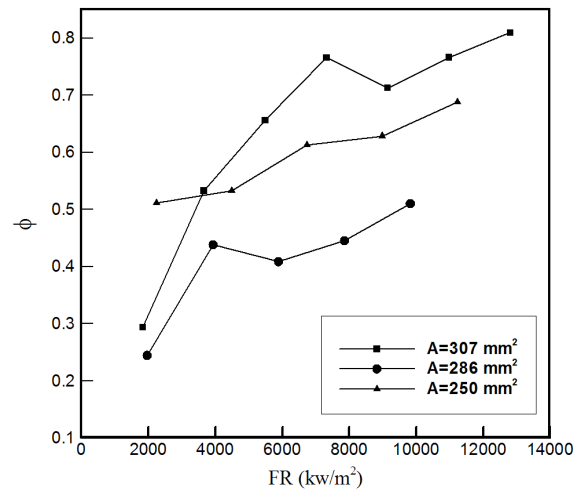


شکل ۱۱: مقادیر نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی خاموشی شعله‌ی برای مقاطع مختلف

شکل ۱۲ مقادیر سرعت خاموشی روی محور عمودی و نرخ آتش روی محور افقی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، خاموشی در محدوده‌ی سرعت جریان خروجی  $2 \text{ m/s}$  تا  $7 \text{ m/s}$  رخ داده است و در هر سطح مقطع با شبیهی تقریباً ثابت در حال افزایش است. با توجه به شکل با افزایش سطح مقطع، خاموشی در سرعت‌های بالاتری ایجاد شده است.

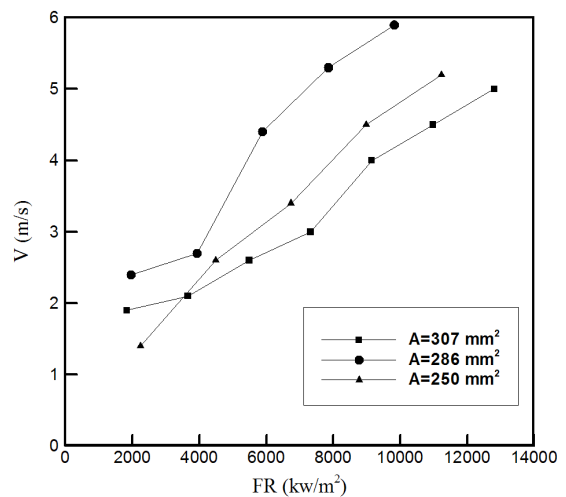
با مقایسه شکل ۱۲ و شکل ۱۱ می‌توان دریافت که در یک نرخ آتش ثابت هرچه سرعت مخلوط بیشتر باشد، خاموشی در نسبت هم‌ارزی کمتری اتفاق می‌افتد. دلیل این امر می‌تواند رقابت دو عامل هم‌زمان باشد که یکی موجب تقویت پایداری و دیگری موجب تضعیف پایداری شعله می‌شود. عامل اول افزایش سرعت است که موجب افزایش قدرت ناحیه باز چرخش و افزایش پایداری می‌شود و عامل دوم کاهش نسبت هم‌ارزی

مقادیر نسبت هم‌ارزی روی محور عمودی نشان داده شده است. با توجه به شکل در تمامی مقاطع با افزایش نرخ آتش، نسبت هم‌ارزی روند تقریباً روبه‌رشد داشته است. آنچه قابل توجه است این است که رابطه بین نسبت هم‌ارزی و نرخ آتش در لحظه برخاستگی با سطح مقطع خروجی رابطه مستقیمی ندارد. به گونه‌ای که سطح مقطع میانی  $280 \text{ mm}^2$  در کمترین نسبت هم‌ارزی دچار برخاستگی شده است.



شکل ۹: مقادیر نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی برخاستگی شعله برای مقاطع مختلف

شکل ۱۰ نمودار مربوط به سرعت خروجی مخلوط بر حسب نرخ آتش در لحظه برخاستگی VSF را نشان می‌دهد. با افزایش نرخ آتش، سرعت محوری جریان خروجی در محدوده  $2 \text{ m/s}$  تا  $6 \text{ m/s}$  همواره روند صعودی دارد. برخاستگی شعله نتیجه فاصله گرفتن ناحیه بازگردش از کف مشعل است. به طور طبیعی انتظار می‌رود که با افزایش سرعت قدرت جریان ورودی افزایش یابد و ناحیه بازگردش در فاصله بالاتری از کف مشعل تشکیل شود. بدین ترتیب بالا رفتن این ناحیه که عامل پایداری شعله است موجب می‌شود که شعله در فاصله بیشتری از سطح پایدار شود.



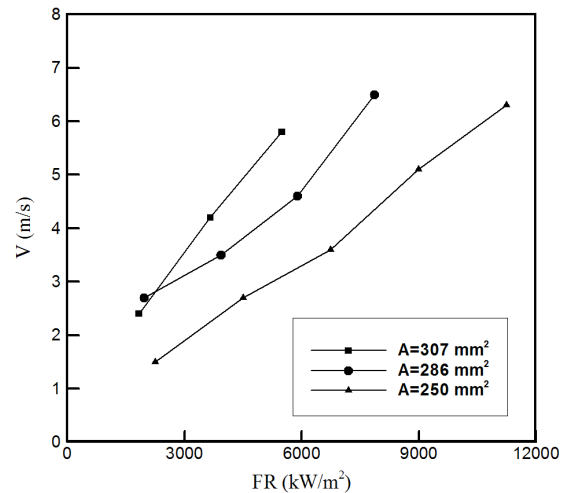
شکل ۱۰: مقادیر سرعت محوری جریان خروجی برحسب نرخ آتش در لحظه‌ی برخاستگی شعله برای مقاطع مختلف

قدردانی را دارند.

#### ۵- مراجع

- [1] Beer, J.M., Chigier, N.A., 1972. "Combustion Aerodynamics". Applied science publishers Ltd.
- [2] Pollard, A., Ozem, H. L. M., and Grandmaison, E. W., 2000. "Turbulent, swirling flow over an axisymmetric, constant radius surface". *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29, pp. 493-509.
- [3] Anacleto, P. M., Fernandes, E. C., Heitor and Shtork, S. I., 2002. "Characterization of a Strong Swirling Flow with Processing Vortex Core Based on measurements of Velocity and Local Pressure Fluctuations". Proc. 11th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal.
- [4] Choi. B., Kim. H. T., 2003. "Flame stability of CO/H<sub>2</sub> syngas in the diffusion flame by using lab-scale burner". *Korean society of environmental Engineers*, 8, pp. 193-201.
- [5] Thummers. M.J., hubner. A.W., Van reen. E.h. and Hanjalick. V.M., 2008. "Hysteresis and transition in swirling nonpremixed flames". *Combustion and flame*, 256 (2), pp. 447-459.
- [6] Yuassa.S., 1986. "Effects of swirl on stability of jet Diffusion Flames". *Combustion and Flame*, 66, pp.181-192.
- [7] Chao, Y. C., Wu, C. Y., and Lee. k. Y., 2004. "Effects of Dilution on Blow-Out Limits of Turbulent Jet Flames". *Combustion Science and Technology*, 176, pp. 1735-1753.
- [8] Feikema, D., Chen, R. H., and Driscoll, J. F., 1990. "Enhancement of Blowout Limits by the Use of Swirl". *Combustion and Flame*, 80, pp. 183-195
- [9] Javarehshkian, A., Sarrafan Sadeghi, S., and TabeJamaat, S. 2013. Experimental study of the effect of swirl on the stability of non-premixed combustion of propane/oxygen. *12th Conference of Iranian Aerospace Society*, Tehran (In Persian).
- [10] Zhao. Z., Yuen. D.W., Leung. C.W and Wong T.T., 2009, "Thermal performance of a premixed impinging circular flame jet array with induced-swirl". *Applied Thermal Engineering*, 29, pp.159-166.
- [11] Frassoldatia. A., Frigerrioa. S., Colombob. E., Inzolib. F., Faravellia. T., 2005. "Determination of Nox emissions from strong swirling confined flame With an integrated CFD-base Procedure". *Chemical engineering Science*, 60, PP.2851-2869.

که موجب کاهش دمای شعله و کاهش پایداری می‌شود. باید به این نکته توجه داشت که با افزایش سطح مقطع خروجی، محدوده تشکیل VSF تا خاموشی آن روبه‌رشد بود که این امر نشان از افزایش بازه عملکرد مشعل با سطح مقطع بالاتر و دبی بیشتر است.



شکل ۱۲: مقادیر سرعت محوری جریان خروجی بر حسب نرخ آتش در لحظه خاموشی شعله برای مقاطع مختلف

#### ۴- نتیجه‌گیری

- این تحقیق به بررسی لحظه‌ی تشکیل VSF، لحظه‌ی برخاستگی و لحظه‌ی خاموشی آن پرداخته است. نتایج به‌دست‌آمده عبارت‌اند از:
- با توجه به مشاهدات صورت‌گرفته، VSF در مخلوط‌های رقیق سوخت و هوا در نسبت هم‌ارزی ۰/۵۶ تا ۰/۹۲ تشکیل شده است.
  - در VSF در مقادیر سرعت محوری جریان بین ۱ m/s تا ۵ m/s تشکیل شده است.
  - مقادیر سرعت محوری جریان در لحظه‌ی تشکیل VSF با افزایش نرخ آتش به طور خطی افزایش یافته و مستقل از دبی جریان است.
  - با افزایش سطح مقطع خروجی محدوده بین سرعت جریان در لحظه تشکیل VSF تا سرعت در لحظه برخاستگی VSF افزایش یافته است.
  - با کم شدن دبی جریان، خاموشی در نسبت هم‌ارزی‌های بزرگ‌تری اتفاق افتاده است.
  - مقادیر سرعت محوری جریان در لحظه خاموشی با افزایش نرخ آتش به‌صورت پیوسته با یک شیب تقریباً ثابت افزایش یافته است.
  - محدوده‌ی پایداری VSF (بر حسب نسبت هم‌ارزی یا سرعت جریان) که نشان‌دهنده لحظه تشکیل تا خاموشی این شعله است با افزایش سطح مقطع جریان افزایش یافته است.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان از پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان به دلیل حمایت از این تحقیق طی پژوهانه به شماره ۳۶۳۴۷۷ تشکر می‌نمایند. همچنین از آقای احسان نوری به دلیل همکاری در این تحقیق نهایت تشکر و

