

## بررسی عددی اثر مقدار پیچش جریان بر احتراق پیش آمیخته کم پیچش

محمد شهسواری<sup>۱\*</sup>، محمدحسین عرب نژاد<sup>۲</sup>، محمد فرشچی<sup>۳</sup>

تهران - دانشگاه صنعتی شریف  
Shahsavari@ae.sharif.ir

### چکیده

احتراق کم پیچش یکی از روش‌های نوین برای پایدارسازی شعله‌های پیش مخلوط کم سوخت است. شناخت پدیده‌های فیزیکی و نحوه پایدارسازی این نوع شعله‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. به همین منظور در این مقاله پدیده‌های فیزیکی و نحوه پایدارسازی شعله و همچنین بررسی اثر پیچش بر مشخصات شعله با استفاده از شبیه‌سازی به روش گردابه‌های بزرگ و روش شعله ضخیم شده، انجام شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که شعله با فاصله مشخصی از لبه مشعل پایدار می‌شود و پایداری آن وابسته به تشکیل ناحیه بازگردشی داخلی در جریان نیست. همچنین افزایش عدد پیچش باعث حرکت ناحیه بازگردشی به سمت بالادست جریان شده و همچنین موجب کاهش ارتفاع شعله از لبه مشعل و کاهش غلظت سوخت در نواحی غیر شعله می‌شود.

واژه‌های کلیدی: احتراق کم پیچش، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، روش شعله ضخیم شده و ناحیه بازگردشی

### ۱- مقدمه

احتراق پیش مخلوط امروزه، به منظور کاهش تولید آلاینده‌های حاصل از احتراق، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشکل این نوع احتراق ناپایداری شعله در مناطق حالت کم سوخت است. یکی از روش‌های کنترل پایداری در شعله‌های پیش مخلوط استفاده از جریان‌های پیچشی است. این نوع شعله‌ها به شعله‌های پیچشی مشهورند [۱]. شعله‌های پیچشی با استفاده از عدد بی بعدیه نام عدد پیچش ( $S$ )، که توسط ساید و بیبر در سال ۱۹۷۴ پیشنهاد شد، دسته‌بندی می‌شوند. این عدد بر اساس حاصل تقسیم شار تکانه زاویه‌ای در جهت محور ( $G_\theta$ ) بر حاصل ضرب شار تکانه محوری در جهت محور ( $G_x$ ) در شعاع مشعل ( $R$ ) تعریف می‌شود [۲].

$$S = \frac{G_\theta}{RG_x} = \frac{\int_0^R U_z U_\theta r^2 dr}{R \int_0^R U_z^2 r dr} \quad (1)$$

که در این رابطه  $U_z$  و  $U_\theta$  به ترتیب سرعت‌های محوری و پیچشی است. شعله‌های پیچشی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. شعله‌هایی که در آن‌ها پدیده شکست گردابه و ناحیه بازگردشی باعث پایداری شعله می‌شود را شعله‌های پر پیچش می‌نامند و شعله‌هایی که در آن‌ها پدیده شکست گردابه نقش پایدارکننده را ندارد شعله‌های کم پیچش نام‌گذاری می‌شوند [۳]. سازوکار پایداری شعله‌های کم پیچش به این صورت است که وقتی جریان کم پیچش سوخت و هوا از مشعل خارج می‌شود، نیروهای گریز از مرکز ناشی از حرکت پیچشی جریان باعث منبسط شدن جریان محوری می‌شوند و آن را به سمت خارج واگرا

۱- دانشجوی دکترای مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

۳- استاد دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

می‌کنند. این واگرایی باعث کاهش سرعت محوری جریان می‌شود. سرعت شعله پیش مخلوط آشفته هر جا با سرعت جریان محلی برابر شد، شعله به صورت پایدار می‌ایستد. این سازوکار باعث می‌شود که شعله در فاصله کمی از دهانه مشعل بدون هیچ‌گونه نقطه اتکایی روی بدنه مشعل پایدار شود [۴].

در سال‌های اخیر با پیشرفت سامانه رایانه‌هایمدل‌سازی احتراق پیچشی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. بیشتر تحقیقات انجام‌شده در سال‌های اخیر مربوط به شعله‌هایی است که در آن‌ها پدیده شکست گردابه و ناحیه بازگردشی و وظیفه پایداری شعله را بر عهده دارد.

Huang در سال ۲۰۰۵ اثر عدد پیچش برای دینامیک احتراق پیچشی را با استفاده از روش شبیه‌سازیگردابه‌های بزرگ با مدل زیر شبکه اسماکورینسکی مرتبه ۲ و مدل احتراق فلیلمت<sup>۱</sup> بررسی کرده است [۵]. مشعل استفاده‌شده از یک قسمت خارجی و یک قسمت داخلی تشکیل شده است. قسمت داخلی مسدود است و جریان پیچشی از قسمت خارجی خارج می‌شود بنابراین در تمام‌اعداد پیچش یک ناحیه بازگشتی در خروجی مشعل شکل می‌گیرد که وظیفه پایداری شعله را بر عهده دارد. در این تحقیق از دو جریان با اعداد پیچش ۰.۴۴ و ۱.۱ با عدد رینولدز ۳۵۰۰۰ و نسبت هم ارزی ۰.۵۷ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در جریان با عدد پیچش ۰.۴۴، ساختارهای گردابه‌ای بزرگ از لایه برشی ناشی می‌شود اما در جریان با عدد پیچش ۱.۱، علاوه بر لایه برشی، ناحیه بازگشتی نیز این ساختارها را تولید می‌کند. افزایش عدد پیچش باعث می‌شود که شدت آشفته‌گی جریان افزایش یابد که در پی آن سرعت شعله آشفته زیاد شده و سطح شعله کاهش می‌یابد.

Galpin در سال ۲۰۰۸ با استفاده از روش شبیه‌سازیگردابه‌های بزرگ با مدل زیر شبکه والی<sup>۲</sup> و مدل احتراق فلیلمت شعله پریپچش در نسبت هم ارزی‌های ۰.۷۵ و ۰.۸۳ بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که شعله به صورت V شکل است. که زاویه باز شدن آن در روش گردابه‌های بزرگ کمتر از روش تجربی پیش‌بینی می‌شود. همچنین روش عددی، احتراق را سریع‌تر پیش‌بینی کند که دلیل آن می‌تواند پیش مخلوط نشدن سوخت و هوا به صورت کامل در آزمایش تجربی باشد [۶].

Duwig در سال ۲۰۰۷ با استفاده از روش شبیه‌سازیگردابه‌های بزرگ و مدل احتراق فلیلمت پدیده شکست گردابه را در شعله‌های پیچشی بررسی کرده است. این بررسی‌ها در نسبت هم ارزی ۰.۵، عدد رینولدز ۸۱۰۰۰، عدد ماخ ۰.۱۲ و عدد پیچش ۰.۴۵ و ۱.۳۵ انجام شده است [۷]. نتایج نشان می‌دهد که در اعداد پیچش زیر ۰.۵ شکست گردابه‌ای اتفاق نمی‌افتد. در اعداد بین ۰.۵ تا ۰.۹ ناحیه بازگشتی وجود دارد و با افزایش عدد پیچش این ناحیه به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. با افزایش عدد پیچش بیش از ۰.۹ ناحیه بازگردشی به سمت بالادست جریان حرکت می‌کند. البته این اعداد تنها در این مسئله صادق هستند.

Sommerer در سال ۲۰۰۴ با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با مدل زیر شبکه والی و مدل احتراقی شعله ضخیم شده دینامیکی<sup>۳</sup> (به همراه معادله تک مرحله احتراق پروپان- هوا برای شناسایی میدان شیمیایی) دمش و پش شعله‌های پیچشی را بررسی کرده است. نسبت هم ارزیانتخاب‌شده ۰.۸ می‌باشد. بررسی‌ها به خوبی این پدیده‌ها را شناسایی نموده و نشان می‌دهد که پش شعله در اثر ناحیه وجودناحیه بازگردشی در داخل لوله مشعل رخ می‌دهد. این ناحیه بازگردشی شعله را به داخل مشعل بازمی‌گرداند و پس از پایداریسازی شعله در مشعل، ناحیه بازگردشی حذف می‌شود [۸].

Nogenmyr در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ دینامیک شعله پیش مخلوط کم پیچش را با استفاده از روش شبیه‌سازیگردابه‌های بزرگ با مدل زیر شبکه اسماکورینسکی مدل‌سازی کرد [۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲]. در این بررسی از دو مدل احتراقی مختلف استفاده‌شده که شامل مدل معادله G و مدل واکنش شیمیایی نرخ محدود می‌باشد. مدل واکنش شیمیایی

<sup>1</sup>Flamelet

<sup>2</sup>Wale

<sup>3</sup>Dynamic Thickened Flame (DTF)

<sup>4</sup>Finite Rate Chemistry (RF)

نرخ محدود استفاده شده نیز خود شامل دو مدل است، مدل شعله ضخیم شده<sup>۱</sup> و مدل راکتور نیمه آمیخته<sup>۲</sup>. عدد جریان ۰.۵۵ و نسبت هم ارزی شعله ۰.۶۲ در نظر گرفته شده است. همچنین برای حداقل کردن اثر محفظه بر شعله قطر محفظه ۶ برابر قطر مشعل انتخاب شده است [۹ و ۱۰]. از آنجا که نتایج حل متقارن نیستند از آن‌ها میانگین‌گیری شعاعی شده است [۱۰]. نتایج نشان می‌دهد که شعله در فاصله‌ای معادل ۰.۶ قطر مشعل در پایین دست پایدار می‌شود و همچنین در فاصله ۱.۲ قطر مشعل یک ناحیه بازگردشی وجود دارد [۱۰]. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که مکانیزم پایداری شعله بر اساس گردابه‌های جدا شده از لایه برشی می‌باشد، یعنی شعله در لایه برشی داخلی پایدار می‌شود. اگر عدد رینولدز افزایش یابد، فرکانس شسته شدن گردابه‌ها از لایه برشی مستقل از عدد رینولدز خواهد شد، بنابراین محل شعله با تغییر رینولدز ثابت باقی می‌ماند [۱۲].

نتایج نشان می‌دهد که مدل  $G$  نسبت به مدل‌های شعله ضخیم شده و مدل راکتور نیمه آمیخته شعله را پهن‌تر و با چروکیدگی‌های بیشتری شناسایی می‌کند ولی از طرفی شعله در مدل‌های شعله ضخیم شده و راکتور نیمه آمیخته ضخیم‌تر است. همچنین مصرف سوخت در مدل‌های شعله ضخیم شده و مدل راکتور نیمه آمیخته کندتر است بنابراین افزایش دما به کندی انجام می‌شود. مقایسه نتایج با نتایج تجربی نشان می‌دهد که پروفیل‌های سرعت و دما در مدل‌های شعله ضخیم شده و مدل راکتور نیمه آمیخته دقیق‌تر پیش‌بینی می‌شود در حالی که  $ims$  سرعت‌ها در مدل  $G$  دقیق‌تر است [۹ و ۱۰]. همچنین مدل شعله ضخیم شده غلظت سوخت را در دامنه حل دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کند [۱۰]. بررسی ارتفاع شعله با روش  $G$  نشان می‌دهد که فاصله شعله از لبه مشعل در نسبت هم ارزی‌های پایین با نتایج تجربی اختلاف دارد اما در نسبت هم ارزی‌های بالاتر این اختلاف بسیار کم می‌شود [۱۱].

Strakey در سال ۲۰۱۰ با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مرتبه ۲ با مدل زیر شبکه انرژی جنبشی دینامیکی محلی شده<sup>۳</sup> و مدل احتراقی دینامیکی شعله ضخیم شده (به همراه معادله تک مرحله و چهار مرحله‌ای احتراق پروپان- هوا برای شناسایی میدان شیمیایی) میدان شعله پیشگی را مورد بررسی قرار داد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برتری مدل ۴ مرحله پیش‌بینی رادیکال  $OH$  است که می‌تواند نشان‌دهنده محل شعله باشد. مقادیر پارامتر ضخیم سازی شعله و تابع بازدهی در ناحیه شعله معمولاً به ترتیب ۴-۱۰ و ۱-۲ می‌باشد [۱۳].

همان طور که از مراجع بالا مشخص است، بیشتر کارهای عددی در سال‌های اخیر بر روی شعله‌های پر پیچش انجام شده است و مراجع کمی ساختار شعله‌های کم پیچش را بررسی نموده‌اند. در مقاله حاضر هدف شبیه‌سازی شعله کم پیچش در دو عدد پیچش مختلف به کمک روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل احتراقی شعله ضخیم شده می‌باشد.

## ۲- روش عددی

برای انجام این تحقیق از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (به همراه مدل زیر شبکه‌ای اسمال‌گورینسکی) و روش شعله ضخیم شده استفاده شده است. در این قسمت مشخصات کلی روش مدل سازی احتراق توضیح داده می‌شود. به علت حجیم بودن روابط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و با فرض آشنا بودن خواننده به این روش، از تکرار آن‌ها خودداری شده است و علاقه‌مندان می‌توانند جزئیات این روش را در فصل ۴ و ۵ مرجع ۱۴ مطالعه فرمایند.

مشکل اساسی در استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای تحلیل احتراق آشفته این است که ضخامت شعله از سائز شبکه کوچک‌تر است بنابراین قابل شناسایی نیست. در روش شعله ضخیم شده برای شناسایی شعله، ضخامت شعله را با یک ضریب  $F$  ضخیم می‌کنند و سرعت شعله را ثابت نگاه می‌دارند. مقدار ضریب  $F$  به نحوی انتخاب می‌شود که شعله به اندازه‌ای

<sup>1</sup> Thickened Flame (TF)

<sup>2</sup> Partially Striated Reactor (PaSR)

<sup>3</sup> Localized Dynamic Kinetic Energy

ضخیم فرض شود که در سایز شبکه روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ‌قابل‌شناسایی شود. در این روش برای یافتن نرخ واکنش از قانون ارنیوس<sup>۱</sup> استفاده می‌شود [۱۴]. در مطالعه حاضر از واکنش دو مرحله‌ای متان استفاده شده و نرخ واکنش‌ها از قانون اورینیوس محاسبه شده است. از آنالیز ابعادی می‌توان سرعت و ضخامت شعله آرام را به صورت زیر نشان داد.

$$s_L^0 \quad \overline{D_{th}\dot{\omega}} \quad ; \quad \delta_L^0 \quad \frac{D_{th}}{s_L^0} = \frac{\overline{D_{th}}}{\dot{\omega}} \quad (2)$$

که در این رابطه  $D_{th}$ ،  $\dot{\omega}$ ،  $s_L^0$  و  $\delta_L^0$  به ترتیب نفوذ حرارتی، نرخ واکنش، سرعت شعله آرام و ضخامت شعله آرام می‌باشد. حال اگر  $D_{th}$  با ضریب  $F$  افزایش و  $\dot{\omega}$  با ضریب  $F$  کاهش یابد، ضخامت شعله به اندازه  $F$  افزایش می‌یابد و سرعت شعله ثابت باقی می‌ماند.

یکی از مشکلات این روش این است که با ضخیم شدن شعله تداخلات بین جریان آشفته و واکنش شیمیایی تغییر می‌کند. برای این منظور از یک تابع بهینه  $E$  (فاکتور چروکیدگی زیر شبکه) استفاده می‌شود. این فاکتور وابسته به  $(u'_\Delta/S_L)$  و  $(\Delta/\delta_L^0)$  می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$E = \frac{\Xi \delta_F^0}{\Xi \delta_F^1} = \frac{1 + \alpha \cdot 0.75 \exp\left(-\frac{1.2}{\frac{u'_\Delta}{S_L}}\right) \frac{\Delta}{\delta_F^0} \frac{u'_\Delta}{S_L}^{2/3}}{1 + \alpha \cdot 0.75 \exp\left(-\frac{1.2}{\frac{u'_\Delta}{S_L}}\right) \frac{\Delta}{\delta_F^1} \frac{u'_\Delta}{S_L}^{2/3}} \quad (3)$$

که در این رابطه  $\delta_F^0$ ،  $\delta_F^1$  و به ترتیب ضخامت شعله پیش از ضخیم‌سازی، پس از ضخیم‌سازی و پهنای فیلترگیری می‌باشند. برای یافتن  $u'_\Delta$  می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد.

$$u'_\Delta = \frac{v_t}{C_s \Delta} = C_s \sqrt{2\overline{S_{ij}}\overline{S_{ij}}} \quad (4)$$

این مدل به دلیل پیش‌بینی مناسب احتراق، خاموشی شعله و تداخلات شعله و دیواره مدل مناسبی می‌باشد.

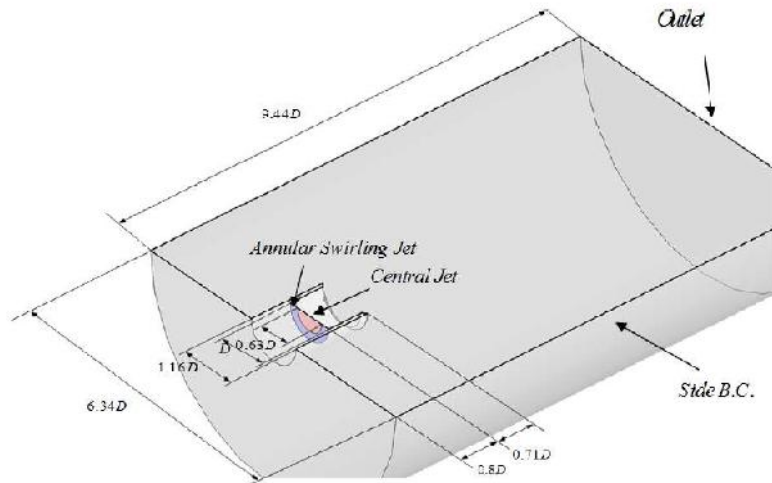
در مطالعه عددی حاضر، برای گسسته‌سازی زمانی معادلات از روش مرتبه دوم پسر و برای ترم‌های مکانی از روش مرتبه ۲ مرکزی استفاده می‌شود. همچنین برای گسسته‌سازی ترم‌های زمانی از روش اویلر و برای ترم‌های مکانی از روش TVD مرتبه دوم استفاده می‌شود.

برای افزایش سرعت همگرایی و کاهش هزینه محاسباتی از حل‌کننده مولتی‌گرید هندسی برای دستگاه معادلات استفاده شده است. در این روش از یک شبکه درشت‌تر برای از بین بردن خطا و یافتن حل اولیه استفاده می‌شود. این فرآیند می‌تواند به دو صورت انجام شود: روش هندسی و روش جبری. فرق این دو روش در نحوه به دست آوردن شبکه درشت است که در روش هندسی به صورت هندسی به دست می‌آید و در روش جبری با یک سری اعمال اوپراتوری [۱۵]. در پروژه حاضر از کد منبع باز OpenFOAM که به زبان C++ نوشته شده استفاده شده است [۱۶].

<sup>1</sup>Arrhenius

### ۳- هندسه مورد بررسی

برای انجام شبیه‌سازی عددی از محفظه مورد استفاده در مرجع ۱۷ استفاده شده است. در این مرجع برای تولید جریان پیچشی از یک مشعل پره دار استفاده شده است. این مشعل از دو قسمت مرکزی و پیچشی تشکیل شده، قسمت مرکزی شامل یک مجرا به همراه یک صفحه مسدود کننده و قسمت پیچشی از یک سری پره تشکیل شده است. جریان در عبور از این قسمت‌ها به ترتیب بدون پیچش و با پیچش همراه است. در مطالعه حاضر جریان داخل مشعل مدل‌سازی نشده است و جریان داخل محفظه بررسی شده است. به این صورت که پروفیل سرعت جریان سرد محوری و پیچشی در خروجی مشعل پیچشی (ورودی محفظه) استخراج شده و از آن به عنوان شرط مرزی در مدل‌سازی استفاده شده است. هندسه مورد استفاده در شکل زیر آمده است. در این شکل  $D$  برابر ۶۴ میلی‌متر است.



شکل ۱ - هندسه مورد استفاده برای شبیه‌سازی عددی و شروط مرزی آن

### ۴- شبکه و شروط مرزی

تعداد سلول به کاررفته برای حل عددی ۲۲۰۵۷۵۰ می‌باشد. شبکه در نزدیکی دیواره‌ها و لایه برشی‌ها ریزتر شده است. همچنین از فشردگی شبکه در راستای جریان کاهش می‌یابد. سوخت و اکسندنه مورد استفاده به ترتیب متان و هوا می‌باشد که در ورودی نسبت هم ارزی آن ۰.۶ می‌باشد. شرط مرزی ورودی سرعت ورودی است. میزان آشفته‌گی در ورودی ۱۰ درصد سرعت روی خط مرکزی در ورودی انتخاب شده است. جت پیچشی نیز به صورت آرام فرض شده است. برای بررسی اثر پیچش بر مشخصات شعله از دو آرایش جریان ورودی مختلف استفاده شده است که در جدول زیر آمده است.

جدول ۱ - اطلاعات ورودی برای شبیه‌سازی جت پیچشی

عدد پیچش	سرعت میانگین محوری قسمت مرکزی (m/s)	سرعت میانگین محوری قسمت پیچشی (m/s)	سرعت میانگین پیچشی قسمت پیچشی (m/s)
۰.۵	۶.۸	۷.۸	۷.۵
۰.۶۵	۴	۷.۸	۷.۵

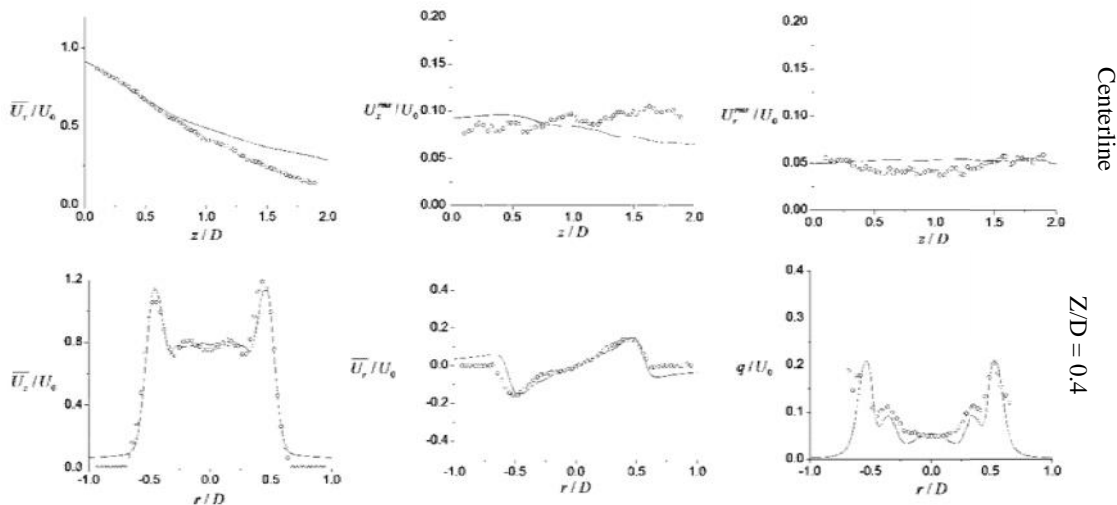
در خروجی محفظه از شرط مرزی همرفتی استفاده شده است. در این شرط مرزی فلاکس فشار، سرعت و غلظت با سرعت همرفتی به صورت زیر رابطه دارد. سرعت همرفتی بر اساس قانون بقای جرم در مرز به دست می‌آید [۱۸].

$$\frac{\partial F}{\partial t} + V \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

شرط مرزی دیواره‌ها از نوع نیومن انتخاب شده است. به این صورت که مرز به حدی دور فرض شده که سرعت در نزدیکی آن تغییرات چندانی نداشته باشد. همچنین برای افزایش پایداری حل عددی از یک جریان هم محور که از کف محفظه تزریق می‌شود استفاده شده است. میزان سرعت این جریان ۳ درصد سرعت روی خط مرکزی در ورودی می‌باشد. همچنین برای افزایش پایداری حل گام زمانی حل عددی به نحوی انتخاب شده که عدد کورانت بیشینه ۰.۳۵ باشد.

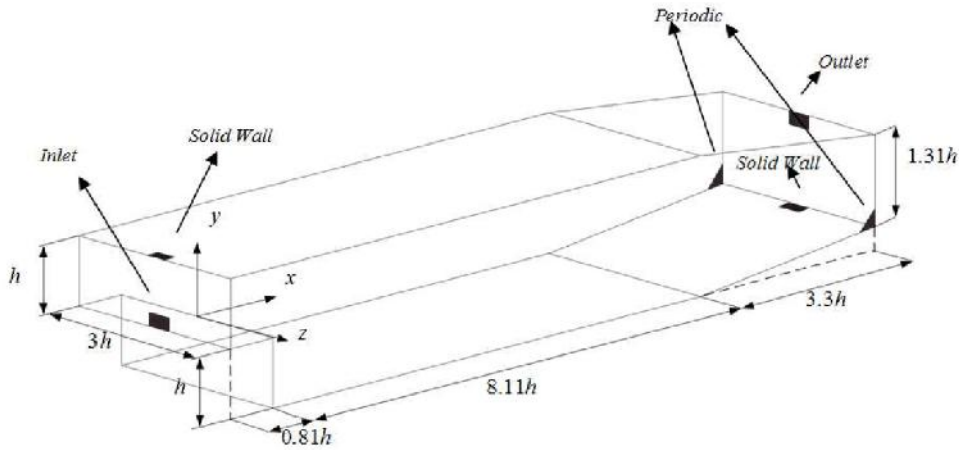
### ۳- اعتبارسنجی

برای صحت‌سنجی نتایج حل عددی سرد از نتایج تجربی جت پیچشی با عدد پیچش ۰.۵ مرجع ۱۷ استفاده شده است. مشخصات هندسی، شبکه و شروط مرزی در قسمت‌های قبل آورده شده است. در شکل ۲ نتایج سرعت محوری میانگین، سرعت شعاعی میانگین و انرژی آشفتگی حاصل از حل عددی با نتایج تجربی مقایسه شده است. این مقایسه روی محور مرکزی محفظه و در فاصله‌ای معادل ۰.۴ قطر مشعل از سر مشعل انجام شده است. تمامی سرعت‌ها در این اشکال با سرعت جریان در خروجی از قسمت مرکزی  $U_c$  بی بعد شده است.

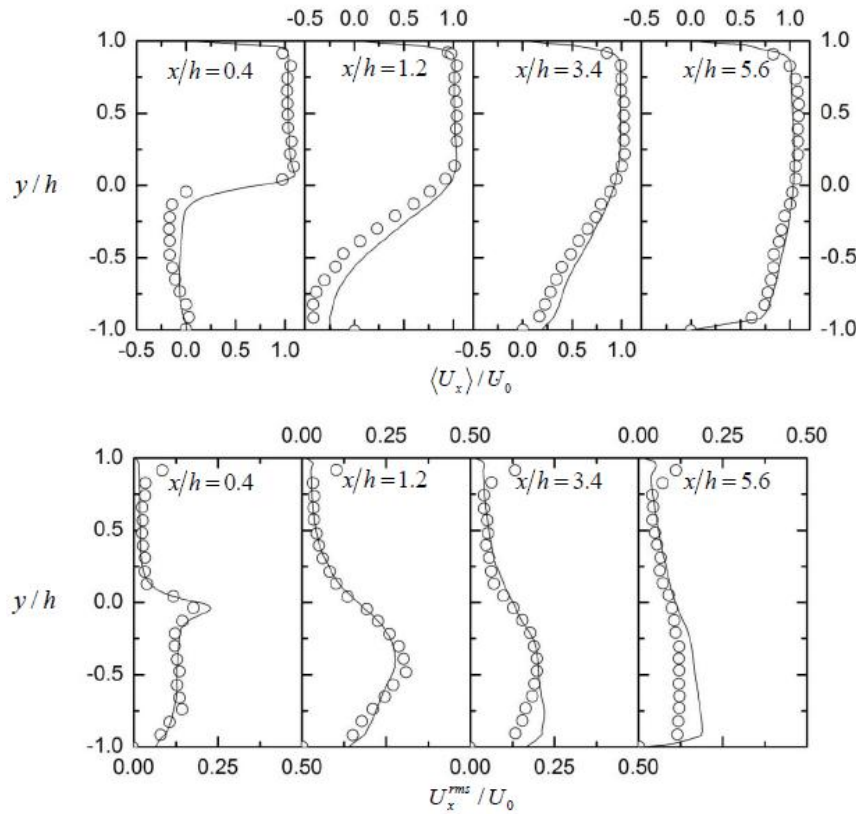


شکل ۲ - مقایسه نتایج حل عددی با نتایج تجربی جریان سرد - خطوط پیوسته حل عددی و دایره‌ها نتایج تجربی

برای صحت‌سنجی مدل احتراق نیز از نتایج تجربی جریان سه بعدی در عبور از یک پله که توسط پیتز انجام شده [۱۹]، استفاده شده است. هندسه پله در شکل ۳ نشان داده شده است. برای حل این جریان از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل شعله ضخیم شده استفاده شده است. همچنین از ۸۱۱۲۰۰ سلول استفاده شده که در نزدیکی دیواره‌ها و لایه برشی ریزتر شده است. شرط مرزی ورودی سرعت و شرط مرزی خروجی فشار خروجی در نظر گرفته شده است. جریان ورودی با سرعت ۱۳.۳ متر بر ثانیه و دمای ۲۹۸ و نسبت هم ارزی ۰.۵۷ وارد محفظه می‌شود. در مدل شعله ضخیم شده از فاکتور ضخیم شدگی ۲ استفاده شده است. در ادامه نتایج مربوط به صحت‌سنجی ارائه می‌شود. این صحت‌سنجی‌ها بر روی پارامترهای سرعت میانگین و اغتشاشی محوری، دما و غلظت مونواکسید کربن در فواصل مختلف از پله انجام شده است. این بررسی نشان می‌دهد که نتایج حل عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد.

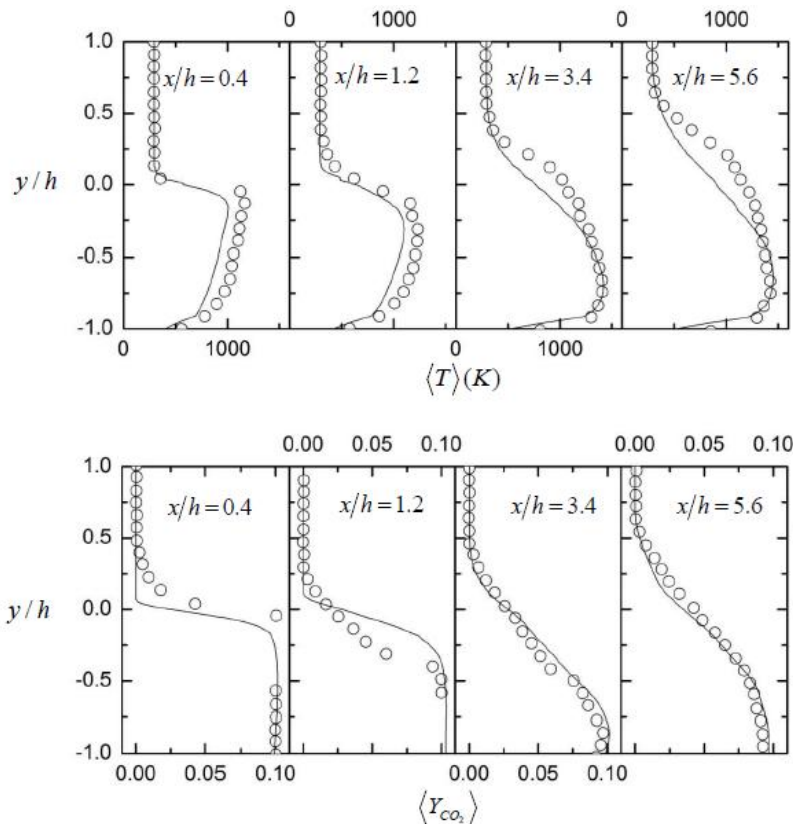


شکل ۳ - هندسه پله استفاده شده برای صحت‌سنجی مدل احتراقی



شکل ۴ - مقایسه نتایج حل عددی با نتایج تجربی جریان سرد - خطوط پیوسته حل عددی و دایره‌ها نتایج تجربی



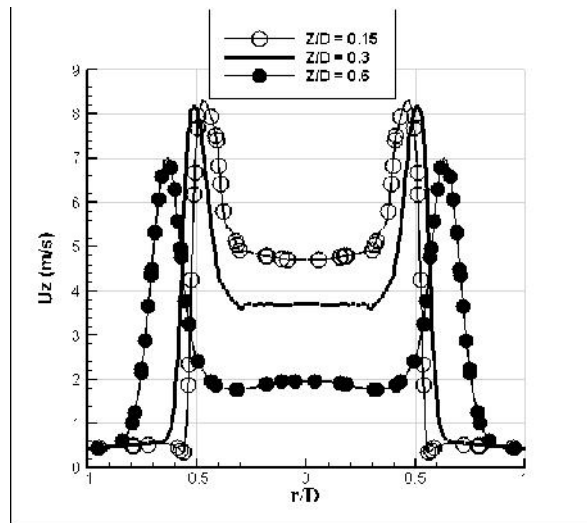


شکل ۵ - مقایسه نتایج حل عددی با نتایج تجربی جریان گرم - خطوط پیوسته حل عددی و دایره‌ها نتایج تجربی

#### ۴- نتایج و بحث

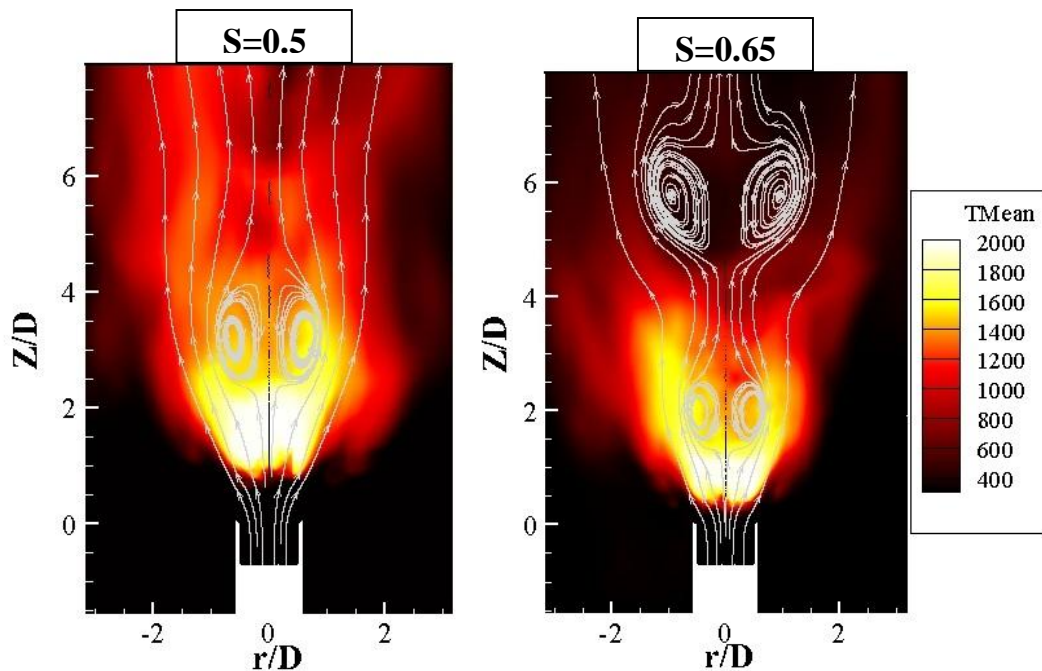
در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی دو شعله کم پیچش با اعداد پیچش متفاوت ارائه می‌شوند. برای تغییر عدد پیچش مقدار سرعت جت مرکزی تغییر داده شده است. بنابراین جت حلقوی در هر دو حالت یکسان است. همان طور که در قسمت مقدمه ذکر شد، پایداری شعله‌های کم پیچش وابسته به وجود ناحیه بازگردشی در جریان نیست و شعله در محلی پایدار می‌شود که سرعت جریان محلی با سرعت شعله آشفته برابر شود. در جریان‌های پیچشی، با خروج جت از مشعل و به دلیل وجود نیروهای گریز از مرکز، جت پیچشی شروع به باز شدن می‌کند. این باز شدن جت باعث به وجود آمدن یک گرادیان فشار شعاعی در جت می‌شود که خود این گرادیان فشار شعاعی باعث بروز گرادیان فشار مخالف در جهت محوری می‌شود. بنابراین گرادیان سرعتی در جهت جریان ایجاد شده که موجب کاهش سرعت محوری جت می‌شود. بنابراین انتظار است که سرعت محوری جریان تا رسیدن به شعله کاهش یابد. این مهم در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل (که نمودار سرعت محوری در فواصل مختلف پایین‌دست مشعل را نشان می‌دهد)، با فاصله گرفتن از لبه مشعل سرعت محوری کاهش می‌یابد. حال هر جا سرعت شعله با سرعت جریان محلی برابر شود، شعله معلق می‌ماند. با توجه به شکل ۶ سرعت محوری در مرکز جت حداقل و در اطراف آن حداکثر است. بنابراین شعله در ابتدا در ناحیه مرکزی پایدار می‌شود و در پایین‌دست تر به نواحی کنار کشیده می‌شود. به همین علت است که شکل این شعله‌ها کاسه‌ای می‌باشد.





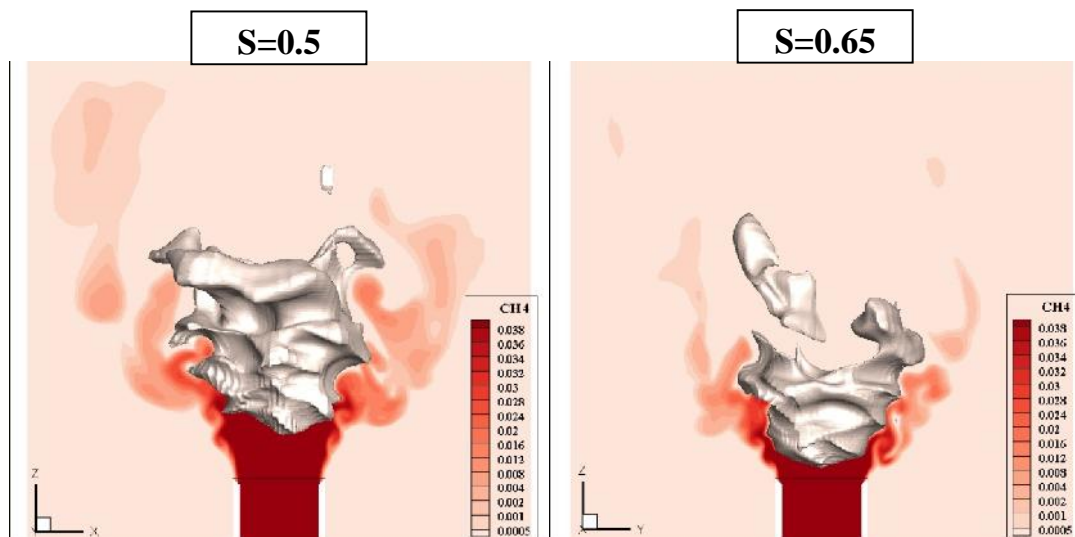
شکل ۶ - تغییرات سرعت محوری در جهت شعاعی در فواصل مختلف از سر مشعل برای جریان با عدد پیچش ۰.۵

همان طور که تحقیقات تجربی پیشین اشاره کرده‌اند [۳]، در این نوع شعله‌ها یک ناحیه بازگردشی در پایین دست شعله به وجود می‌آید که البته نقشی در پایدارسازی شعله ندارد. با توجه به شکل ۷ ملاحظه می‌شود که با افزایش عدد پیچش (کاهش سرعت محوری جریان جت مرکزی) ناحیه شکست گردابه به سمت بالادست جریان حرکت می‌کند. از طرفی با کاهش سرعت جت مرکزی شرط برابری سرعت جریان با سرعت شعله آشفته در فاصله نزدیک‌تری از سر مشعل برقرار شده که در پی آن فاصله شعله از مشعل کاهش می‌یابد. نتیجه دیگری که می‌توان از این شکل گرفت این است که با افزایش عدد پیچش ناحیه بازگردشی داخلی کوچک تر می‌شود. دلیل این کاهش شتاب گرفتن جریان در اثر وجود شعله در این ناحیه می‌باشد.



شکل ۷ - کانتور دما به همراه خطوط جریان

برای درک بهتر تأثیر عدد پیچش بر ساختار شعله و نحوه مصرف سوخت در شکل ۸ سطوح هم تراز دما و میدان غلظت متان نشان داده شده است. دمای سطوح هم تراز برابر با دمای تقریبی آدیاباتیک شعله متان در نسبت هم ارزی ۰.۶ انتخاب شده است. با توجه به این شکل نیز می توان ملاحظه کرد که با افزایش عدد پیچش فاصله شعله از لبه مشعل کاهش می یابد. با توجه به شکل همچنین ملاحظه می شود که در هر دو حالت مقداری از سوخت از ناحیه واکنش به محیط نفوذ می کنند. این مقدار سوخت در جت پیچشی با پیچش کمتر، بیشتر است، زیرا در این حالت با علت فاصله گرفتن شعله از لبه مشعل زمان بیشتری برای نفوذ سوخت به محیط فراهم می شود.

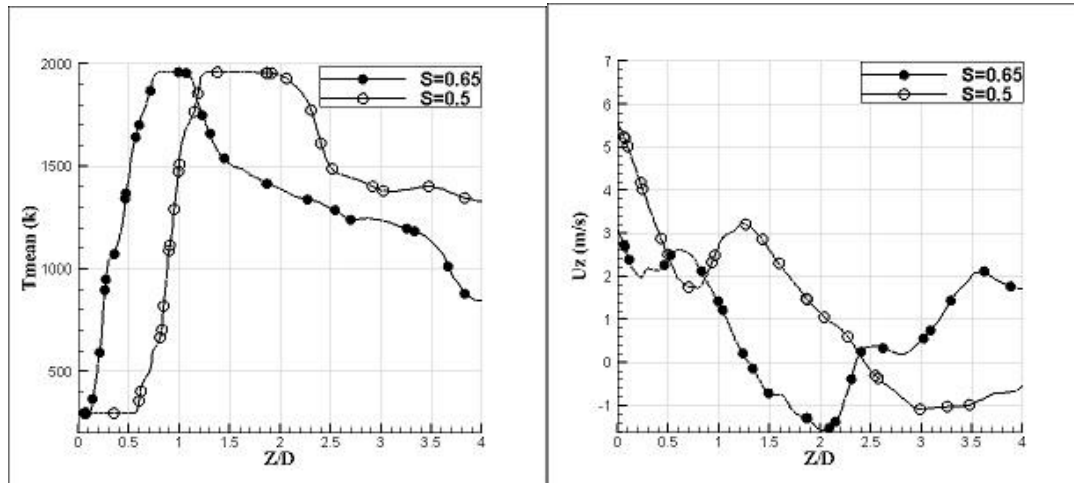


شکل ۸ - کانتور غلظت متان به همراه سطوح هم تراز دمای ۱۷۰۰ درجه کلوین

پس از بررسی کلیت جریان و میدان احتراقی، لازم است پدیده های فیزیکی موجود در این جریان ها بررسی شوند. به همین منظور پروفیل های سرعت و دما روی خط مرکزی جت در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به نمودار سرعت می توان مفاهیم فیزیکی موجود در این جریان ها را به صورتی که در ادامه می آید بررسی نمود. با توجه به شکل ۶ و توضیحات گفته شده، در جریان های پیچشی، گرادیان فشار شعاعی باعث به وجود آمدن گرادیان سرعت محوری می شود. بنابراین در جهت جریان، سرعت محوری کاهش می یابد. بنابراین انتظار است که سرعت محوری جریان تا رسیدن به شعله کاهش یابد. سپس با رسیدن جریان به شعله، جریان شروع به شتاب گرفتن می کند و پس از آن به علت وجود ناحیه بازگردشی در پشت جت پیچشی سرعت مجدداً کاهش می یابد. تا اینکه جریان ناحیه بازگردشی را که همانند یک سد می باشد رد می کند. پس از این مرحله جریان مجدداً شتاب می گیرد. با دقت در نمودار سرعت می توان به نتایجی که در اشکال قبل ذکر شد رسید. به طور مثال سرعت جت با عدد پیچش بیشتر در فواصل نزدیک تری به مشعل منفی می شود. این مهم نشان می دهد که ناحیه بازگردشی در این جت فاصله کمتری با مشعل دارد. همچنین جریان در جت با پیچش بیشتر زودتر شروع به شتاب گیری می کند که دلیل آن فاصله نزدیک تر شعله با مشعل در این حالت است.

با توجه به نمودار دما روی خط مرکزی نیز می توان دریافت که دما با رسیدن به شعله به یکباره افزایش می یابد سپس به صورت پیوسته با فاصله گرفتن از ناحیه احتراقی کاهش می یابد. گرادیان دما قبل و پس از شعله تقریباً برای هر دو حالت یکسان است. اما در جت با عدد پیچش کمتر، ناحیه بیشتری با دمای بالا وجود دارد که نشان دهنده این است که ارتفاع شعله

در آن بیشتر است. دلیل این اختلاف این است که، با افزایش عدد پیچش ناحیه بازگردشی کوچکتر شده و به شعله نزدیکتر می شود در نتیجه شعله فشردهتر می شود.



شکل ۹ - تغییرات سرعت محوری و دمای میانگین روی خط مرکزی محفظه برای اعداد پیچش مختلف

## ۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر پدیده‌ها و نحوه پایداری شعله کم پیچش بررسی شده است. این نتایج تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی ارائه شده توسط افراد دیگر دارد. نتایج این شبیه‌سازی عددی که به روش گردابه‌های بزرگ و مدل احتراقی شعله ضخیم شده انجام شده نشان می‌دهد که، مکانیزم پایداری شعله کم پیچش مستقل از شکل‌گیری ناحیه بازگردشی است و ناحیه بازگردشی در پایین دست شعله شکل می‌گیرد. افزایش عدد پیچش باعث می‌شود که این ناحیه به سمت بالادست حرکت کند. افزایش عدد پیچش همچنین باعث می‌شود که طول نواحی با دمای بالا و همچنین نفوذ سوخت به نواحی با دمای پایین کاهش یابد.

## مراجع

1. Dunn-Rankin, D., *Lean Combustion: Technology and Control*, London, Academic Press, 2008.
2. Syred, N., and Beer, J. M., *Combustion in Swirling Flows: A Review*, *Combustion and Flame*, 123, pp. 143-201, 1974.
3. Jahson, M. R., Littlejohn, D., Nazeer, W. A., Smith, K. O., Cheng, R.K., *A Comparison of the Flowfields and Emissions of High-Swirl Injectors and Low-Swirl Injectors for Lean Premixed Gas Turbines*, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 30, pp.2867-2874, 2005.
4. Chan, C., Lau, K., Chin, W., and Cheng, R., *Freely Propagating Open Premixed Turbulent Flames Stabilized by Swirl*, *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 24, pp. 511-518, 1991.
5. Huang, Y., and Yang, V., *Effect of Swirl on Combustion Dynamics in a Lean Premixed Swirl Stabilized Combustor*, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 1775-1782, 2005.
6. Galpin, J., Naudin, A., Vervisch, L., Angelberger, Ch., Colin, O., and Domingo, P., *Large Eddy Simulation of a Fuel Lean Premixed Turbulent Swirl Burner*, *Combustion and Flame*, Vol. 155, pp. 247-266, 2008.



7. Duwig, Ch., and Fuchs, L., *Large Eddy Simulation of Vortex Breakdown/Flame Interaction*, Physics of Fluids, Vol. 19, pp. 075103 pp.1-20, 2007.
8. Sommerer, Y., Galley, D., Poinso, T., Ducruix, S., Lacas, F., and Veynante, D., *Large Eddy Simulation and Experimental Study of Flashback and Blow off in a Lean Partially Premixed Swirled Burner*, Journal of Turbulence, Vol. 37, pp. 1-21, 2004.
9. Nogenmyr, K. J., Fureby, C., Bai, X. S., Petersson, P., Collin, R., and Linne, M., *Large Eddy Simulation and Laser Diagonestic Studies on a Low Swirl Stratified Premixed Flame*, Combustion and Flame, Vol. 156, pp. 25-36, 2009.
10. Nogenmyr, K. J., and Bai, X. S., *A Comparative Study of LES Turbulent Combustion Models Applied to a Low Swirl Lean Premixed Burner*, 46th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 513, 2008.
11. Nogenmyr, K. J., Petersson, P., Bai, X. S., Nauret, A., Olofsson, J., Brackman, C., Seyfried, H., Zetterberg, J., Li, Z. S., Richter, M., Dreizler, Linne, M., Alden, M., *Large Eddy Simulation and Experiments of Stratified Lean Premixed Methane Air Turbulent Flames*, Proceeding of the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 1467-1475, 2007.
12. Nogenmyr, K. J., Petersson, P., Bai, X. S., Fureby, C., Collin, R., Lantz, A., Linne, M., Alden, M., *Structure and Stabilization Mechanism of a Stratified Premixed Low Swirl Flame*, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 33, pp. 1567-1574, 2011.
13. Strakey, P.A., and Eggenpieler, G., *Development and Validation of a Thickened Flame Modeling Approach for Large Eddy Simulation of Premixed Combustion*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 132, pp. 1-9, 2010.
14. Poinso, Th., and Veynante, D., *Theoretical and Numerical Combustion*, Second Edition, R.T.Edwards, Philadelphia, USA, 2005.
15. Saad, Y., *Iterative methods for sparse linear systems*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2003.
16. *OpenFOAM site*: <http://www.openfoam.com>.
17. Sommerfeld, M., and Qiu, H.H., *Characterization of Particle Laden, Confined Swirling Flows by Phase Doppler Anemometry and Numerical Calculation*, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 19, No. 6, pp. 1093-1127, 1993.
18. Pierce, C.D., and Moin, P., *Progress-variable approach for large eddy simulation of turbulent combustion*, Rep. TF-80, Mech. Eng. Department, Stanford University, 2001.
19. Pitz, R.W., and Daily, J.W., *Experimental Study of Combustion in a Turbulent Free Shear Layer Formed at a Rearward Facing Step*, AIAA 19<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting, Missouri, 1981.