

مطالعه عددی احتراق-آشفتگی-تشنش در شعله های نفوذی متان-هیدروژن همراه با حضور جسم جداکننده

بابک کشیر^{۱*}، صادق تابع جماعت^۲

تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوافضا، آزمایشگاه تحقیقاتی سوخت و احتراق

* babak_kt62@aut.ac.ir

چکیده

مدل کوپل شده تشنش/Flamelet پایا برای شبیه سازی شعله های غیر پیش آمیخته و آشفته متان-هیدروژن (نسبت برابر حجمی) و در حضور جسم جداکننده بکار رفته است. مشعل تحت پژوهش توسط مصری و همکاران بصورت تجربی مطالعه شده است. تمرکز مطالعه حاضر بر میدان جریان و توزیع اسکالرها همراه با توزیع افت تشنش حرارتی و اثر آن بر اسکالره های واکنشی است. تشنش بوسیله روش "نازک نوری" مدل میشود. سینتیک احتراق بوسیله یک مکانیزم گسترده تایید شده توصیف میشود. محاسبات عددی با استفاده از یک الگوریتم حجم محدود انجام شده است. مقایسه ها نشان میدهد که اثر افت تشنش روی توزیع درجه حرارت برای شعله در نظر گرفته شده ناچیز است. پیش بینی توزیع رادیکال OH در تطابق مناسبی با اندازه گیریهاست. این امر توانایی مدل Flamelet پایا را در توصیف سطح تعادلی ویژه رادیکال OH نشان میدهد. در مجموع، داده های میدان جریان و گونه ها هماهنگی رضایت بخشی با اندازه گیریهای تجربی دارند؛ اگر چه کیفیت تطبیق در پایین دست کاهش می یابد. این امر به وجود پدیده های خاموشی و اشتعال مجدد در نواحی دور دست نسبت داده میشود که شعله را از حالت سوزش پایدار دور میکنند.

واژه های کلیدی: احتراق آشفته- نفوذی- جسم جداکننده- تشنش

۱- مقدمه

شعله های همراه با جسم جداکننده^۳ بواسطه اندرکنش بین احتراق و آشفتگی در ناحیه پشت جسم جداکننده دشواریهایی را در حل عددی اعمال میکنند. در کاربردهای صنعتی همانند موتورهای احتراق داخلی و کوره ها، این میدان جریان پیچیده که شامل نواحی باز چرخش است؛ به وفور یافت میشود [۱-۳]. در این موارد، اختلاط شدید جریانهای سوخت و اکسیدکننده در پایین دست جسم جداکننده اتفاق می افتد. کاربرد این مانع در مسیر واکنش دهنده ها سطح آشفتگی را از طریق ایجاد گردابه ها و جدایش جریان افزایش میدهد که این مسئله خود سبب افزایش اختلاط میشود. علاوه بر این، محصولات احتراق که در ناحیه باز چرخش محصور میشوند؛ به عنوان منبع اشتعال سازی برای مخلوط عبوری بکار میروند. در یک توزیع متقارن محوری، جریان خروجی از انژکتور تا اندازه ای به صورت شعاعی منحرف میشود و ناحیه باز چرخش را در بر میگیرد. سطح اغتشاش در این منطقه از طریق دریافت پیوسته انرژی از جریان ورودی حفظ میشود. در پایین دست، یک ناحیه گلوگاهی سطوح بالایی از خاموشی و اشتعال مجدد را نشان میدهد و در پی آن یک ساختار جت مانند مشاهده میشود [۴]. مصری [۵] و دالی [۶-۷] پژوهشهای جامعی را روی یک رشته شعله های همراه با جسم جداکننده از مواردی با احتراق پایدار تا درجات بالایی از خاموشیهای محلی، انجام دادند. میدان جریان و ساختار اسکالره های واکنشی به علاوه خاموشی محلی و

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

³ Bluff-body

اشتعال مجدد و گسیل NO_x مورد پژوهش ایشان قرار گرفته اند. مجموعه ای کمی و کیفی از داده های تجربی اجازه یک مقایسه کمی مناسب با نتایج عددی را فراهم میکند. با بکار بردن مشعل آزمایشگاهی سیدنی به عنوان نمونه استاندارد، محققان متعددی شعله های همراه با جسم جداکننده را با روشهای احتراقی مختلفی مورد مطالعه قرار داده اند. رن و همکاران [۸] روشی را برای تسریع محاسبات شیمیایی در حل عددی بکار بردند. این روش، جدولبندی تطبیق پذیر مکانی^۱ برای تسریع محاسبات شیمیایی بوسیله جدولبندی داده های سیستم کاهش یافته است. ایشان از مدلسازی مفهوم استهلاک گردابه^۲ و توابع توزیع احتمال انتقال یافته استفاده کردند و گزارش کردند که مدلهای احتراقی اتخاذ شده توصیف کاهش یافته ای از سیستمهای واکنشی را تحت تاثیر قرار نمیدهند. تانگ و همکاران [۹] عملکرد یک ابزار مدلسازی جدید را بر مبنای توابع توزیع احتمال چند بعدی مطالعه کردند. این روش تابع توزیع احتمال مشترک را به صورت مجموع وزنی از مقادیر متناهی تابع دلتای دیراک توصیف میکند. این روش دقت برابری با تابع توزیع احتمال مشترک روش مونته کارلو دارد. لپین و همکاران [۱۰] روش انتگرالگیری قطعه به قطعه را برای غلبه بر مسائل یکتایی مربوط به توزیع بتا پیشنهاد کردند.

مدل Flamelet که مدل پیچیده تری نسبت به روش تابع توزیع احتمال انتقال یافته است؛ به مقدار وسیعی برای شبیه سازی شعله های همراه با جسم جداکننده بکار گرفته میشود. کیم و همکاران [۱۱] قابلیت پیش بینی مدل گذرا و مدل ممان شرطی^۳ را مقایسه کردند. این دو مدل احتراقی پروفیلهای متفاوتی را برای کسر جرمی غیر شرطی OH و NO_x پیش بینی کردند. مدل Flamelet گذرا سطح OH را در بالادست بیشتر محاسبه میکند که ناشی از تخمین کوچکتر زمان اقامت است. کسر جرمی NO هم در تمام محل های محوری بوسیله این مدل کمتر محاسبه میشود. رامن و پیچ [۱۲] و کیم و همکاران [۱۳-۱۴] روش شبیه سازی گردابه های بزرگ را به مدل Flamelet پایا برای شبیه سازی شعله های همراه با جسم مجازی اعمال کردند. ایشان در بیشتر مناطق توزیع درجه حرارت و اجزای حاصل از احتراق را با دقت بالایی بدست آوردند.

انتقال حرارت تشعشی بصورت لحظه ای اتفاق می افتد و به توزیع زمانی درجه حرارت و تراکم محیطهای گسیل و جذب بستگی دارد. محاسبه افت حرارتی تشعشی در شعله های آشفته بر مبنای تقریب "نازک نوری"^۴ طبقه بندی شده است. بر اساس از جذب صرفنظر میشود [۱۵]. اگر چه در منابع روشهای دقیقتری برای محاسبه افت تشعشع از قبیل انتقال گسسته [۱۶] ذکر شده است؛ ولی بواسطه دقت روش تقریب نازک نوری در شعله های مربوط به متان، در این پژوهش این روش را مد نظر قرار میدهیم.

در این پژوهش روش میانگین گیری ناپایا که در آن معادلات میانگین گیری شده و مدلها در سه بعد با وابستگی زمانی حل میشوند؛ بکار گرفته شده و انتظار میرود جوابهای بهتری نسبت به روشهای کلاسیک شبیه سازی گردابه های بزرگ بدست آید. زیرا نیازمندیهای رزولوشن شبکه برای پیش بینی خواص جریان در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ بسیار بیشتر از روش میانگین گیری ناپایا است [۱۷-۱۸]. پژوهشهایی که تشعشع را در شعله های همراه با جسم جدا کننده بررسی کرده اند؛ بسیار ناچیز میباشند [۱۹]. بنابراین پژوهش حاضر قصد دارد تا گسیل تشعشی را همراه با اندرکنش احتراق- آشفستگی در زمینه شعله های همراه با جسم جدا کننده و با بکار گیری مدلسازی Flamelet بررسی کند.

۲- معادلات حاکم، مدلسازی و روشهای عددی

در این پژوهش، ما از کتابخانه های OpenFOAM به عنوان چارچوب محاسباتی استفاده کرده و آن را بر اساس نیازمندیهای خود توسعه دادیم. کد محاسباتی تهیه شده؛ معادلات تراکم پذیر سه بعدی را به صورت وابسته زمانی حل میکند. مدل استاندارد k-ε برای توصیف اغتشاش بکار رفته است. معادلات بقا روی یک شبکه هم مکان سه بعدی با بکارگیری روش حجم محدود حل شده است. از الگوریتم Rho-PISO (ماخ بالا) به منظور کوپلینگ بین میادین سرعت و فشار استفاده میشود.

¹ ISAT

² Eddy Dissipation Concept

³ Conditional Moment Closure

⁴ Optically Thin

معادلات پیوستگی، مومنتوم، کسر مخلوط و واریانس کسر مخلوط با بکار بردن الگوهای مرکزی^۱ بصورت مکانی گسسته سازی میشوند. دقت تقریب برای تمام ترمهای جابجایی و پخش از مرتبه دو میباشد. نرخ پخش و استهلاک برای جت دایروی توسط مدلسازی k-ε بیشتر تخمین زده میشود. به منظور اصلاح این نقص، مواردی پیشنهاد شده است. دالی و همکاران [۷] گزارش کردند که کاربرد مقدار ۱.۶ برای ثابت معادله انتقال استهلاک C_1 تخمین بهتری ارائه میکند. از این رو این مقدار برابر ۱.۶ در نظر گرفته شده است. این عدد در کارگاه های آموزشی بین المللی مربوط به شعله های غیر پیش آمیخته و آشفته نیز پیشنهاد شده است [۲۰].

۲-۱- مدل سازی احتراق و تشعشع

برای محاسبات ترموشیمیایی از مدل سازی Flamelet پایا با سینتیک گسترده شامل ۸۲ گونه و ۱۴۸۵ واکنش استفاده میشود [۲۱]. این مکانیزم شیمیایی با موفقیت در شبیه سازیهای Flamelet پایا مربوط به شعله های به شدت آشفته بکار رفته است [۲۲]. مدل Flamelet آشفته را به صورت مجموعه ای تصادفی از ساختارهای آرام محلی که بوسیله ادیهای اغتشاش دربر گرفته شده اند؛ تصویر میکند [۲۳]. در مدل Flamelet پایا تمام مقادیر اسکالر تابعی از کسر مخلوط و نرخ استهلاک اسکالر هستند. معادلات بقا برای کسر جرمی گونه ها و درجه حرارت در فضای کسر مخلوط به صورت زیر هستند [۲۴]:

$$\dots \frac{t}{2} \frac{\partial^2 Y_k}{\partial Z^2} + \dot{S}_k = 0 \quad (1)$$

$$\dots \frac{t}{2} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{1}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial Z} \frac{\partial T}{\partial Z} - \frac{\partial T}{\partial Z} \sum_{k=1}^N \left(1 - \frac{C_{p,k}}{C_p} \right) \frac{\partial Y_k}{\partial Z} \right] - \frac{1}{C_p} (\sum \hat{H}_k \dot{S}_k) = 0 \quad (2)$$

ترم منبع شیمیایی بوسیله \dot{S}_k مشخص میشود و Y_k جرم هر یک از گونه ها در واحد حجم و زمان است. ترم منبع شیمیایی برای هر یک از گونه ها از طریق واکنشهای حاضر در مکانیزم شیمیایی محاسبه میشود [۲۵]:

$$\dot{S}_k = W_k \sum_{i=1}^N \hat{k}_{ki} W_i \quad (3)$$

$$W_i = k_{fi} \prod_{j=1}^n \left(\frac{Y_j}{W_j} \right)^{\hat{\nu}_{ji}} - k_{bi} \prod_{j=1}^n \left(\frac{Y_j}{W_j} \right)^{\hat{\nu}_{ji}} \quad (4)$$

در اینجا $\hat{\nu}_{ji}$ و $\hat{\nu}_{ji}$ ضرایب استوکیومتریک معادله نام در مسیرهای رفت و برگشت میباشدند. \hat{k}_{fi} و \hat{k}_{bi} ضرایب نرخ واکنشهای رفت و برگشت هستند. W_k و W_j وزن مولکولی گونه های k و j هستند. نرخ استهلاک اسکالر از رابطه مربوط به جریانهای تراکم پذیر محاسبه میشود:

$$t(Z) = \frac{a_s}{4f} \frac{3(2\sqrt{\frac{\dots O}{\dots} + 1})^2}{2\sqrt{\frac{\dots O}{\dots} + 1}} \exp[-2(erfc^{-1}(2Z))^2] \quad (5)$$

در رابطه بالا $erfc^{-1}$ معکوس تابع خطای مکمل است و $\dots O$ معرف چگالی جریان اکسیدکننده است. ترم منبع تشعشع در معادلات Flamelet پایا وارد نمیشود؛ زیرا منجر به نتایج غیر واقعی میشود [۲۶]. این جمله در یک معادله انتقال اضافی (معادله انتالپی) وارد میشود. برای وارد کردن آثار غیر آدیباتیک، همانند شار حرارتی تشعشعی، پارامتر سومی وارد میشود که اختلاف انتالپی نامیده میشود. این کمیت اختلاف بین انتالپی شرایط آدیباتیک و واقعی را نشان میدهد و از رابطه زیر بدست می آید:

$$W_H = \hat{H} - [\hat{H}_O + Z(\hat{H}_F - \hat{H}_O)] \quad (6)$$

¹ Central Scheme

که در آن \hat{H}_O و \hat{H}_F به ترتیب بر انتالپی جریانهای سوخت و اکسیدکننده دلالت دارند. یازده پروفیل Flamelet مختلف بر اساس گستره مقادیر اختلاف انتالپی از ۰ تا ۵۰۰- ایجاد شده است. هر کمیت $\{$ در داخل میدان آشفته بر اساس سه متغیر کسر مخلوط، نرخ استهلاک اسکالر و اختلاف انتالپی بیان میشود:

$$\{ = \{ (Z, t_{st}, W_H) \quad (7)$$

توضیحات بیشتر پیرامون جدولبندی Flamelet همراه با متغیر اختلاف انتالپی در مرجع [۲۲] داده شده است. مدل تشعشع نازک نوری برای محاسبه ترم منبع تشعشع بکار رفته است. این مدل شعله را بصورت بدون ضخامت در نظر میگیرد؛ بگونه ای که هر نقطه تشعشعی دید نامحدودی از محیط سرد دارد. افت تشعشع در واحد حجم بصورت زیر بیان میشود:

$$Q(T, species) = 4\tau_B(T^4 - T_b^4) \sum (p_i \times a_{p,i}) \quad (8)$$

در رابطه بالا، τ_B ثابت استفان-بولتزمن، p_i فشار جزئی هر یک از گونه ها در اتمسفر، $a_{p,i}$ ضریب جذب متوسط پلانک و T_b درجه حرارت محیط پیرامونی است.

۳- مشعل سیدنی

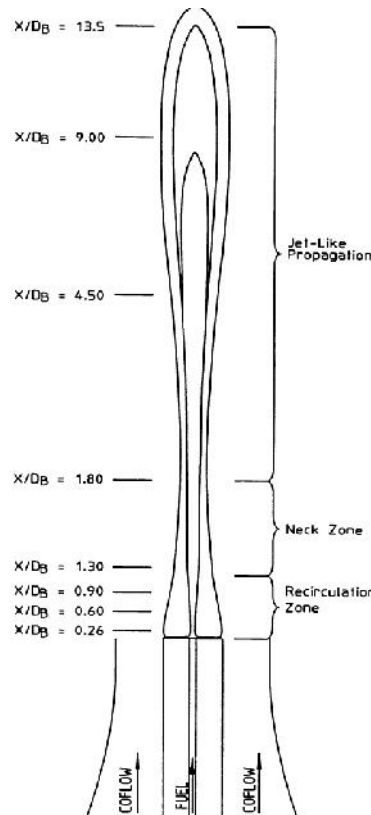
مشعل سیدنی شامل یک جسم جداکننده با قطر ۵۰ میلیمتر است که در داخل یک جریان هم محور هوا قرار گرفته است. روی خط مرکزی جسم جداکننده، یک نازل با قطر داخلی ۳٫۶ میلیمتر قرار گرفته است که جریان سوخت از طریق آن به سمت ناحیه بازچرخش در پایین دست جسم جداکننده تزریق میشود. جریانهای سوخت و اکسیدکننده در درجه حرارت محیط (293 K) قرار دارند. اندرکنش قوی بین شیمی نرخ-محدود و اختلاط در پایین دست ناحیه بازچرخش، یک ناحیه گلوگاهی ایجاد میکند [۲۷]. هر کدام از جریانهای سوخت و اکسیدکننده ناحیه باز چرخش مربوط به خود را ایجاد میکنند. ناحیه باز چرخش داخلی توسط جریان سوخت ایجاد میشود. جریان سوخت ترکیبی از هیدوژن و متان با نسبت حجمی برابر است. کسر مخلوط استوکیومتریک برابر ۰٫۰۵ است. این مشعل توسط دالی [۷-۶] و مصری [۵] به صورت گسترده ای مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. اندازه گیری میدان جریان از طریق لیزر (LDV) در دانشگاه سیدنی و میادین اسکالر واکنشی از طریق اندازه گیری لیزری در آزمایشگاه ملی سندیا در ایالات متحده انجام شده است. موارد مورد مطالعه در این پژوهش همراه با شرایط تجربی در جدول (۱) نشان داده شده است. در هر دو مورد نسبت $\frac{U_{jet}}{U_{co}}$ ثابت در نظر گرفته شده تا ساختار جریان مشابهی در هر دو شعله بدست آید. هر دو شعله HM1 و HM1E در وضعیت مشابهی نسبت به برخاستگی قرار دارند. تصویر شماتیکی از مشعل سیدنی همراه با محل‌های اندازه گیری در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- موارد مطالعه شده در پژوهش حاضر

نام شعله	سرعت جت (متر بر ثانیه)	سرعت جریان هم محور (متر بر ثانیه)	داده های اسکالر	داده های سرعت
HM1	۱۱۸	۴۰	R/R/LIF	LDV
HM1E	۱۰۸	۳۵	---	LDV

۳-۱- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

یک دامنه محاسباتی استوانه ای با قطر $6D$ و طول $5D$ در نظر گرفته شده است (D قطر جسم جداکننده و d قطر انژکتور دایروی سوخت است). این دامنه با n_z سلول در راستای محوری و n_x سلول در راستای شعاعی مشخص میشود. پهنای جت (d) و ناحیه جسم جداکننده ($D-d$) به ترتیب با $n_{r,j}$ و $n_{r,b}$ گره گسسته میشود. n_w سلول در راستای محیطی بکار گرفته میشود. تست استقلال از اندازه شبکه انجام شده و یک شبکه با مشخصات زیر بکار گرفته شده است. جدول (۲) جزئیات شبکه بهینه بکار رفته را نشان میدهد. میدان سرعت و کسر مخلوط به وسیله شرط مرزی دیریشله روی صفحه ورودی و شرط مرزی نیومن روی پوسته و سطوح خارجی توصیف میشود. فشار محیط روی مرزهای پهلویی و خارجی مقدار ثابت اتمسفریک تنظیم میشود؛ در حالیکه برای جریان ورودی از شرط مرزی نیومن استفاده میشود. شرط مرزی نیومن جریان خروجی از دامنه محاسباتی را تحت تاثیر قرار میدهد. به منظور کم کردن اثر مرزها، دامنه محاسباتی بزرگتر از منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- تصویری شماتیک از مشعل پایدار شده در حضور جسم جداکننده سیدنی و محل‌های اندازه‌گیری [۶]

۳-۱- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

یک دامنه محاسباتی استوانه ای با قطر $6D$ و طول $5D$ در نظر گرفته شده است (D قطر جسم جداکننده و d قطر انژکتور دایروی سوخت است). این دامنه با n_z سلول در راستای محوری و n_x سلول در راستای شعاعی مشخص میشود. پهنای جت (d) و ناحیه جسم جداکننده ($D-d$) به ترتیب با $n_{r,j}$ و $n_{r,b}$ گره گسسته میشود. n_w سلول در راستای محیطی بکار گرفته میشود. تست استقلال از اندازه شبکه انجام شده و یک شبکه با مشخصات زیر بکار گرفته شده است. جدول (۲)

جزئیات شبکه بهینه بکار رفته را نشان میدهد. میدان سرعت و کسر مخلوط به وسیله شرط مرزی دیریشله روی صفحه ورودی و شرط مرزی نیومن روی پوسته و سطوح خارجی توصیف میشود. فشار محیط روی مرزهای پهلویی و خارجی مقدار ثابت اتمسفریک تنظیم میشود؛ در حالیکه برای جریان ورودی از شرط مرزی نیومن استفاده میشود. شرط مرزی نیومن جریان خروجی از دامنه محاسباتی را تحت تاثیر قرار میدهد. به منظور کم کردن اثر مرزها، دامنه محاسباتی بزرگتر از منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- مشخصات شبکه بهینه بکار رفته در پژوهش حاضر

n_z	n_x	$n_{r,j}$	$n_{r,b}$	n_w	$n_{tot}(10^3)$
۲۵۰	۲۳۰	۵	۴۶	۲۸	۱۶۱۷

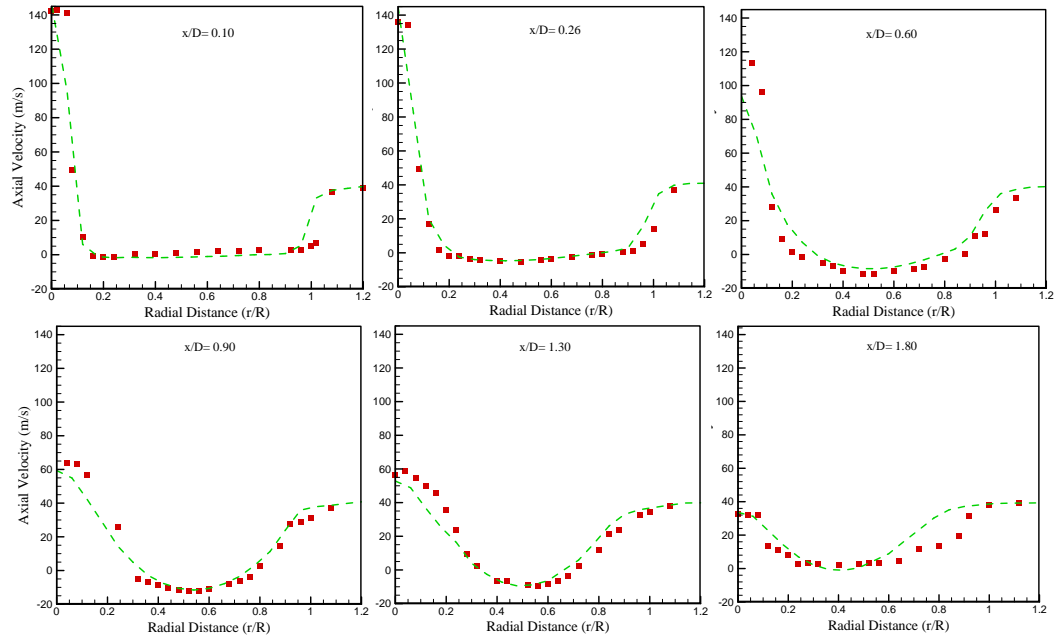
۴- بحث و بررسی نتایج

هر دو شعله HM1 و HM1E در وضعیت ۵۰٪ نسبت به حد برخاستگی قرار دارند و ساختارهای اختلاط و ترموشیمیایی یکسانی را نشان میدهند. بر این اساس، میادین جریان در این دو شعله، تنها اندکی تفاوت دارند [۲۸]. از این رو میدان جریان و اسکالرها برای شعله HM1E نشان داده نشده است و تنها شار حرارتی تشعشعی برای هر دو شعله مقایسه شده است. تمام داده های ارائه شده در این پژوهش با در نظر گرفتن تشعشع بدست آمده اند؛ مگر اینکه صریحاً اعلام شود.

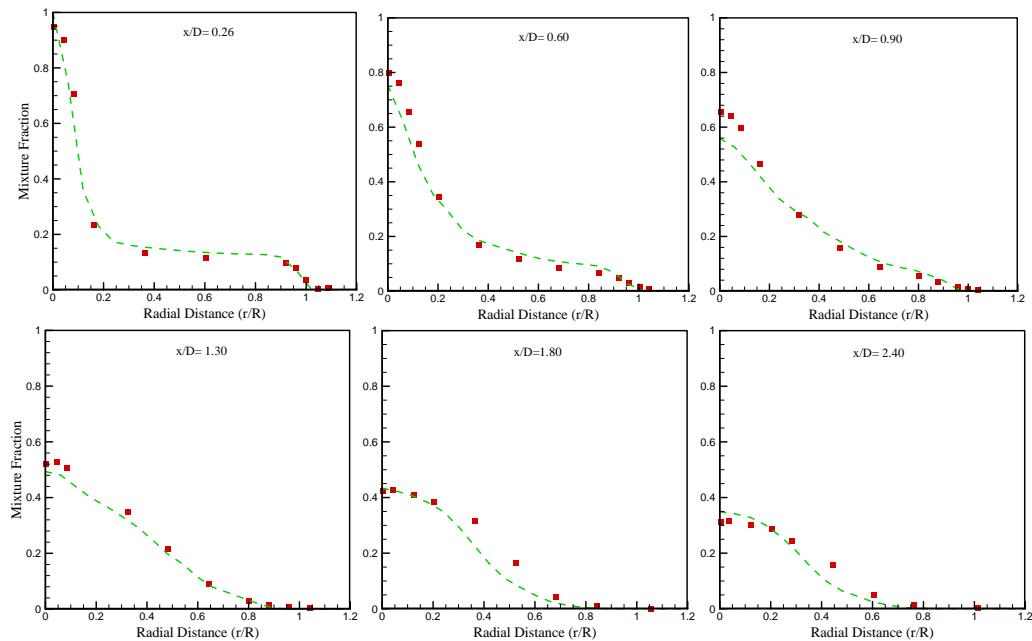
مطالعات تجربی قبلی دو گردابه در خلاف جهت یکدیگر را در ناحیه پشت جسم جداکننده نشان میدهند [۲۹]. این گردابه ها میدان جریان پیچیده ای را ایجاد میکنند. سرعتهای محوری در موقعیتهای مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. سرعت خط مرکزی در نقاط $\{0.1, 0.26, 0.6, 0.9, 1.3, 1.8\}$ $x/D =$ نشان میدهد که نرخ استهلاک جت علیرغم اصلاح ضریب C_1 در معادله انتقال استهلاک اندکی بیشتر پیش بینی شده است. هرچند، کاهش سرعت و پخش جت در تطابق خوبی با مشاهدات تجربی است. در پایین دست ($x/D=1.8$) سرعت محوری برای بازه $0.6 \leq r/R \leq 1$ بالاتر محاسبه میشود. گرادبانهای بالای چگالی و رژیمهای Flamelet نازک در این منطقه اتفاق می افتد [۱۳]. کاهش دقت جوابهای حاصل از حل عددی در پایین دست توسط محققین دیگری که از روشهای میانگین گیری استفاده کرده اند؛ گزارش شده است [۲۷]. پهنای افزایش یافته لایه برشی خارجی و ناتوانی ذاتی روش میانگین گیری ناپایا در شبیه سازی کامل لایه های برشی این انحراف را رقم میزند؛ اگر چه طول ناحیه دنباله^۱ مربوط به جسم جداکننده با دقت مناسبی پیش بینی شده است. توزیع کسر مخلوط میانگین در نقاط محوری $\{0.26, 0.6, 0.9, 1.3, 1.8, 2.4\}$ $x/D =$ در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۳) پیداست؛ تطابق رضایت بخشی بین پیش بینیها و داده های تجربی وجود دارد. هر چند کسر مخلوط در اروشاد خط مرکزی برای مقادیر $\{0.6, 0.9, 1.3\}$ $x/D =$ اندکی کمتر پیش بینی میشود. این اختلاف به نقصهای حاضر در مدل آشفتگی نسبت داده میشود. آشکارا، نرخ استهلاک^۲ علیرغم اصلاح C_1 بخوبی پیش بینی نمیشود. البته این امر ممکن است ناشی از عدم دقت داده های تجربی نیز باشد. در نقاط $\{0.9, 1.3\}$ $x/D =$ مقادیر کسر مخلوط میانگین در ناحیه باز چرخش نزدیک جت سوخت تا اندازه ای کم پیش بینی شده است. چون مقادیر نزدیک حد اشتعالپذیری غنی هستند؛ ساختار ترموشیمیایی به نوبه خود تحت تاثیر قرار میگیرد. در بالادست ($x/D \leq 0.6$) داده های اسکالر که نمایانگر لایه های برشی داخلی و خارجی هستند؛ در تطابق رضایت بخشی با داده های تجربی هستند. در منطقه دوردست ($x/D \geq 1.8$)، کیفیت تطبیق تنزل می یابد؛ اگرچه بطور رضایت بخشی از الگوی اندازه گیریها پیروی میکند.

¹ Wake

² Decay Rate



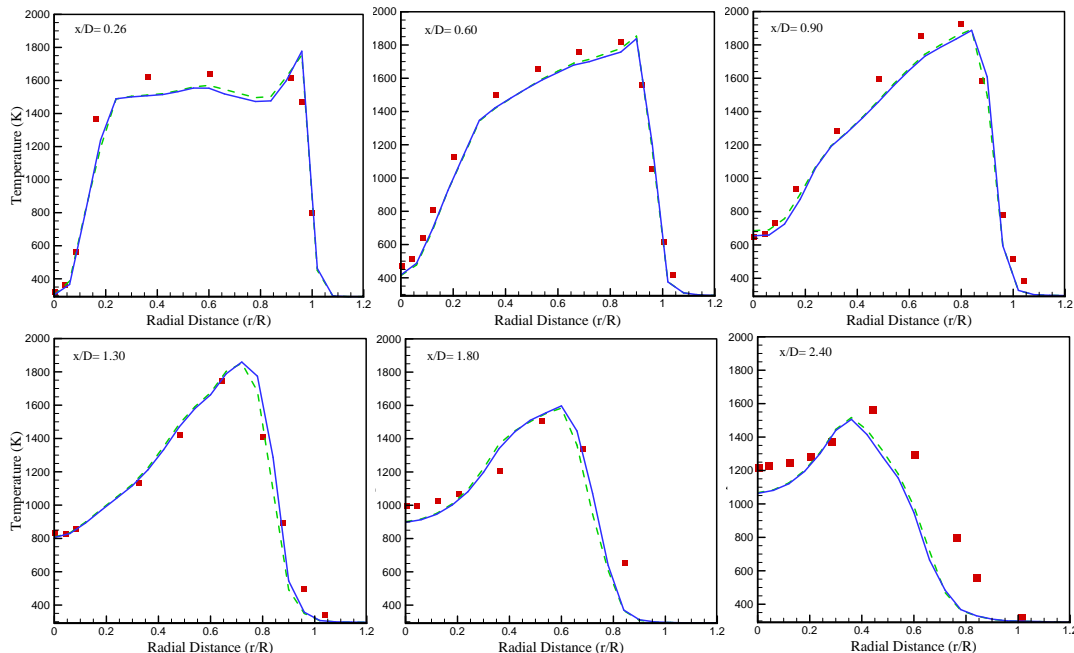
شکل ۲- سرعت میانگین در برابر شعاع بی بعد: $R N 25mm$ در موقعیتهای محوری مختلف $x / D (D N 50mm)$ برای شعله HM1. مربعها اندازه گیریها و خطوط منقطع محاسبات Flamelet هستند.



شکل ۳- کسر مخلوط میانگین در برابر شعاع بی بعد: $R N 25mm$ در موقعیتهای محوری مختلف $x / D (D N 50mm)$ برای شعله HM1. مربعها اندازه گیریها و خطوط منقطع محاسبات Flamelet هستند.

توزیع پیش بینی شده درجه حرارت با و بدون افت حرارت تشعشی همراه با داده های تجربی در شکل (۴) نشان داده شده است. آشکار است که اثر شار حرارتی تشعشی روی درجه حرارت ناچیز است. دو منبع تشعشع در شعله ها وجود دارد.

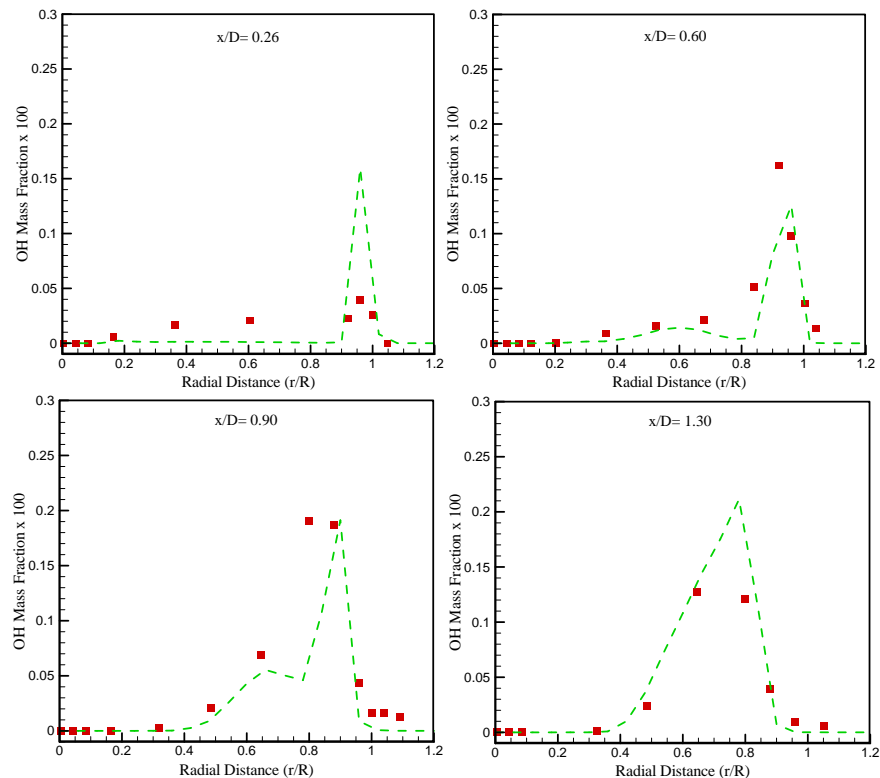
تشعشع مولکولی که بیشتر ناشی از CO_2 و H_2O است و تشعشع جسم سیاه که ناشی از دوده است [۳۰]. شار حرارتی تشعشعی در شعله های متان عموماً از تشعشع مولکولی تشکیل شده است و سهم دوده در شدت تشعشع طیفی اندک است [۳۱]. تفاوت محسوسی بین دو پروفیل محاسبه شده برای درجه حرارت مشاهده نمیشود. رفتار مشابهی توسط حسین و همکاران برای شعله های متان در حضور جسم جداکننده و با محاسبه ترم گسیل تشعشعی توسط روش انتقال گسسته گزارش شده است [۱۹]. از نتایج پیداست که تشعشع مولکولی سهم ناچیزی در توزیع درجه حرارت شعله های حاصل از متان دارد (کمتر از ۵۰ کلون). در نقاط محوری $x/D = \{0.26, 0.6, 0.9\}$ انحرافهای اندکی دیده میشود که میتواند ناشی از عدم دقت در محاسبه میدان کسر مخلوط میانگین باشد. هر چند در نقطه $x/D = 1.3$ میدان درجه حرارت بخوبی با داده های تجربی همخوانی دارد. کسر مخلوط و اسکالرهای مرتبط با آن بخوبی بازتولید شده اند؛ از این رو مدل Flamelet پایا معتبر است و قابل اعمال در ناحیه مشخص شده است. علاوه بر این، مشخص است که اندکی محاسبه بیشتر کسر مخلوط میانگین در لایه برشی خارجی در مکانهای $x/D = \{0.6, 0.9\}$ اثر بیشتری روی ساختار شعله در قیاس با محاسبه کمتر در لایه برشی داخلی دارد. از شکل (۳) پیداست که با توسعه شکل شعله به ساختار جت مانند، نقطه پیک در لایه برشی خارجی به سمت محور تقارن حرکت میکنند. در موقعیت $x/D = 0.6$ هر دو پیک حاضر در لایه های برشی داخلی و خارجی بدست آمده است. سطح همخوانی در موقعیت $x/D = 2.4$ کاهش می یابد. این مسئله با پدیده های خاموشی و اشتعال مجدد در نواحی دوردست نسبت داده میشود که شعله را از حالت احتراق پایدار خارج میکنند. این منجر به انحرافات از فرض Flamelet پایا میشود.



شکل ۴- درجه حرارت میانگین در برابر شعاع بی بعد: $R = 25\text{mm}$ در موقعیتهای محوری مختلف x/D برای شعله HMI. مربعها اندازه گیریها، خطوط منقطع محاسبات با تشعشع و خطوط یکپارچه محاسبات بدون تشعشع هستند.

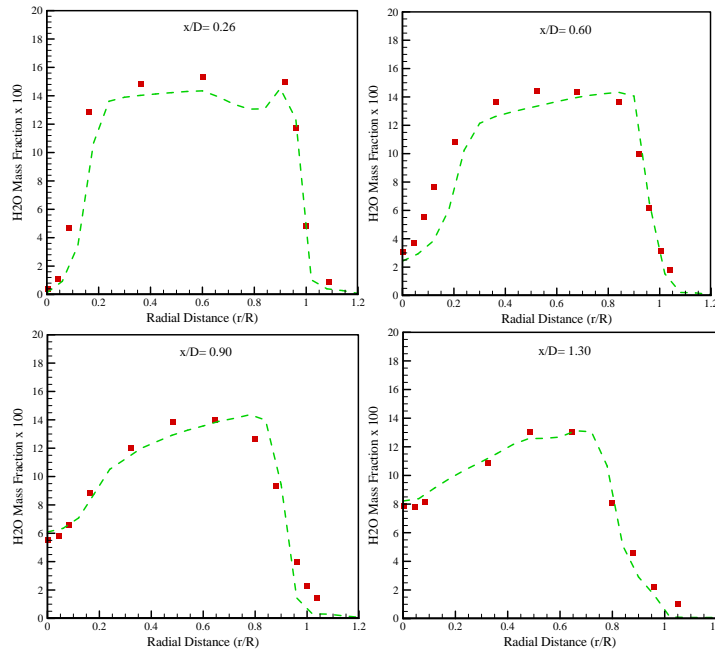
کسر جرمی رادیکال هیدروکسیل در شکل (۵) نشان داده شده است. رادیکال OH از طریق واکنش سریع $H + O_2 \rightleftharpoons OH + O$ ایجاد میشود. غلظت OH از طریق واکنش آهسته $H + OH + M \rightleftharpoons H_2O + M$ به سمت شرایط تعادلی پیش میرود [۳۲]. در جریانهای معشوش همراه با واکنش شیمیایی نرخ اختلاط در قیاس با واکنش سریع اولیه کمتر است؛ هر چند در برابر واکنش دوم به مراتب سریعتر است. این امر منجر به مقدار تعادلی ویژه رادیکال هیدروکسیل در شعله مورد نظر میگردد [۶]. مطالعه حاضر این مطلب را که سطح تعادلی ویژه OH بخوبی توسط مدل Flamelet پایا محاسبه میشود؛

تایید میکند. اگرچه در برخی پژوهشها که از مدل Flamelet پایا استفاده کرده اند؛ این تطابق با موفقیت مشاهده نشده است [۱۳]. در $x/D = 0.26$ یک ماکزیمم در $r/R = 1.0$ مشاهده میشود که در هماهنگی با پیک مشاهده شده در پروفیل درجه حرارت است. البته مقدار پیش بینی شده بسیار کمتر از مقدار اندازه گیری شده است. داده پیش بینی شده در محل $r/R = 1.0$ توسط محققین دیگری که این مشعل را مورد پژوهش قرار داده اند؛ نیز بدست آمده است [۱۳، ۱۹]. نتیجه گرفته میشود که این عدم همخوانی احتمالاً ناشی از عدم دقت در مشاهدات تجربی است. در این محل و برای $0.3 \leq r/R \leq 0.9$ سطح OH کمتر پیش بینی شده است که به میدان کسر مخلوط غنی محاسبه شده، نسبت داده میشود (شکل ۲ را ببینید). در پایین دست هماهنگی رضایت بخش است و اختلافات باقی مانده به عدم دقت کافی در میدان محاسبه شده کسر مخلوط نسبت داده میشود.



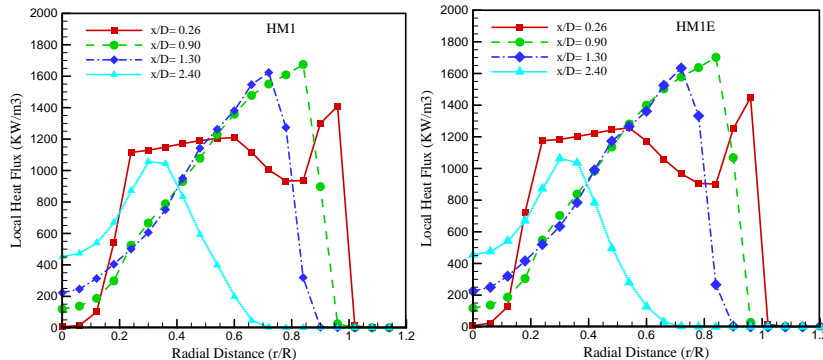
شکل ۵- کسر جرمی میانگین رادیکال OH (بصورت درصد) در برابر شعاع بی بعد: $9R \ N \ 25mm$ در موقعیتهای محوری مختلف برای $x/D (D \ N \ 50mm)$ شعله HM1. مربعها اندازه گیریها و خطوط منقطع محاسبات Flamelet هستند.

با در نظر گرفتن کیفیت پیش بینی الگوهای اختلاط و حرارتی، انتظار می رود که اجزای عمده نیز همخوانی مشابهی با داده های تجربی داشته باشند. در شکل (۶) پروفیل های شعاعی کسر جرمی H_2O نشان داده شده و نتایج از الگوهای ذکر شده در بالا پیروی میکنند. تطابق مناسبی در بیشتر موقعیتهای وجود دارد و در نزدیکی نازل سوخت داده ها اندکی کمتر پیش بینی شده اند.



شکل ۶- کسر جرمی میانگین H_2O (بصورت درصد) در برابر شعاع بی بعد: $R N 25mm$ در موقعیتهای محوری مختلف برای شعله HMI. مربعها اندازه گیریها و خطوط منقطع محاسبات Flamelet هستند.

توزیع شعاعی شار حرارتی تابشی محلی در شکل (۷) نشان داده شده است. در ناحیه نزدیک مشعل ($x/D = 0.26$) به خاطر منطقه واکنش گسترش یافته، توزیع پخش شده و دارای دو پیک در لایه های برشی داخلی و خارجی است. هنگامی که از خروجی مشعل دور میشویم؛ پیک داخلی مضمحل میشود و پیک خارجی به سمت محور تقارن نزدیک میشود. این مسئله از الگوی توزیع درجه حرارت پیروی میکند. در منطقه دور دست ($x/D = 2.4$) شعله ساختار جت مانند پیدا میکند و توزیع پروفیل افت شکل جت را بخود میگیرد [۲۲]. ماکزیمم شار حرارتی بواسطه کاهش درجه حرارت روند نزولی را در پیش گرفته است. جالب است یادآور شویم که نحوه گسترش پروفیل برای شعله های HMI و HMIE کاملاً یکسان است. یکی از پارامترهای کلیدی در شعله های پایدار شده با حضور جسم جداکننده نسبت شار جرمی سوخت به اکسیدکننده است که برای این دو شعله برابر است. این مسئله توسط کِمف و همکاران [۱۳] هم تایید شده است. ایشان دریافتند که میدان کسر مخلوط برای این دو مشعل تنها اندکی تفاوت دارند. بروز دادن خواص ترمو شیمیایی یکسان از جمله افت حرارت تشعشعی بواسطه میدان کسر مخلوط مشابه است.



شکل ۷- شار حرارتی تابشی محلی در برابر شعاع بی بعد: $R N 25mm$ در موقعیتهای محوری مختلف برای $x/D(D N 50mm)$ شعله های HMI و HMIE

۵- نتیجه گیری

مدلسازی کوپل شده تشعشع/Flamelet پایا برای مطالعه آثار شیمی نرخ محدود همراه با محاسبه افت حرارت تشعشعی بکار رفته است. این مدل به یک شعله پایدار شده با جسم جداکننده اعمال شده است. داده های حاصل برای میدان جریان، کسر مخلوط، درجه حرارت و غلظتهای گونه ها با اندازه گیریهای تجربی مقایسه شده است. مشاهده میشود که برای هندسه مشاهده شده، اثر افت حرارت تشعشعی روی میدان درجه حرارت کمتر از ۵۰ کلوین است. نوع تشعشع شعله های متان که مولکولی است عامل این اختلاف ناچیز بحساب می آید. بر خلاف تشعشع حاصل از دوده، به نظر می آید که گسیل مولکولی که بیشتر مربوط به گونه های H_2O و CO_2 است؛ نقش چندانی در توزیع درجه حرارت ندارد. الگوی افت حرارت تشعشعی در شعله های پایدار شده با جسم جداکننده متفاوت از جت شعله های معمولی است. این بواسطه نواحی بازچرخش مربوط به جریانهای سوخت و اکسیدکننده است. این گردابه ها در پشت جسم جداکننده شعله را نگه میدارند و مشخصه های احتراق در ناحیه نزدیک به مشعل را بکلی تغییر میدهند. با در نظر گرفتن میدان جریان پیچیده حاکم، نتایج حاصل شده در تطابق مناسبی با داده های تجربی هستند. دامنه محاسباتی و شرایط مرزی بگونه ای انتخاب میشوند که شرایط مرزی ورودی و اندازه دامنه بر نتایج تاثیر نگذارند. انحرافات مشاهده شده در محاسبه غلظت گونه ها به خطاهای اندک موجود در پیش بینی میدان جریان مربوط میشود.

مراجع

- 1- Koyama, M., and Tachibana S., "Technical applicability of low-swirl fuel nozzle for liquid-fueled industrial gas turbine combustor", Fuel, Vol. 107, pp. 766-776, 2013.
- 2- Sadiki, A., Maltsev, A., Wegner, B., Flemming, F., Kempf, A., and Janicka, J., "Unsteady methods (URANS and LES) for simulation of combustion systems", International Joournal of Thermal Sciences, Vol. 45, pp. 760-773, 2006.
- 3- Lee, M.C., Seo, S.B., Chung J.H., Joo Y.J., and Ahn, D.H., "Combustion performance test of a new fuel DME to adapt to a gas turbine for power generation", Fuel, Vol. 87, pp. 2162-2167, 2008.
- 4- Taglia, C.D., Blum, L., Gass, Y., Ventikos, Y., and Poulidakos, D., "Numerical and experimental investigation of an annular jet flow with large blockage", Journal of Fluid Engineering, Vol. 126, pp. 375-384, 2004.
- 5- Masri, A.R., Kelman, J.B., and Dally, B.B., "The instantaneous spatial structure of the recirculation zone in bluff-body stabilized flame", Proceedings of the combustion institute, Vol. 27, pp. 1031-1036, 1998.
- 6- Dally, B.B., Masri, A.R., Barlow, R.S., and Fiechtner, G.J., "Instantaneous and mean compositional structure of bluff-body stabilized non-premixed flames", Combustion and Flame, Vol. 114, pp. 119-148, 1998.
- 7- Dally, B.B., Fletcher, D.F., and Masri, A.R., "Flow and mixing fields of turbulent bluff-body flames", Combustion Theory and Modeling, Vol. 2, pp. 193-219, 1998.
- 8- Ren, Z., Goldin, G.M., Hiremath, V., and Pope, S.B., "Simulations of a turbulent non-premixed flame using combined dimension reduction and tabulation for combustion chemistry", Fuel, Vol. 105, pp. 636-644, 2013.
- 9- Tang, Q., Zhao, W., Bockelie, M., and Fox, R.O., "Multi-environment probability density function method for modeling turbulent combustion using realistic chemical kinetics", Combustion Theory and Modeling, Vol. 11, pp. 889-907, 2007.
- 10- Lien, F.S., Liu, H., Chui, E., and McCartney, C.J., "Development of an analytical analytical -function PDF integration algorithm for simulation of non-premixed turbulent combustion", Flow Turbulence and Combustion, Vol. 83, pp. 205-226, 2009.
- 11- Kim, G., Kang, S., Kim, Y., and Bilger, R.W., "Conditional moment closure and transient flamelet modeling for detailed structure and NOx formation characteristics of turbulent nonpremixed jet and recirculating flames", Combustion Theory and Modeling, Vol. 11, pp. 527-552, 2007.



- 12- Raman, V., and Pitsch, H., "Large eddy simulation of a bluff-body stabilized non-premixed flame using a recursive filter refinement procedure", *Combustion and Flame*, Vol. 142, pp. 329-347, 2005.
- 13- Kempf, A., and Lindstedt, R.P., and Janicka, J., "Large eddy simulation of a bluff-body stabilized nonpremixed flame", *Combustion and Flame*, Vol. 144, pp. 170-189, 2006.
- 14- Kempf, A.M., Geurts, B.J., and Oefelein, J., "Error analysis of large eddy simulation of the turbulent non-premixed Sydney bluff-body flame", *Combustion and Flame*, Vol. 158, pp. 2408-2419, 2011.
- 15- Kent, J.H., and Honnery, D., "Soot and mixture fraction in turbulent diffusion flames", *Combustion Science and Technology*, Vol. 54, pp. 383-398, 1987.
- 16- Lockwood, F.C., and Shah, N., "A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures", *Proceedings of the combustion institute*, Vol. 18, pp. 1405-1414, 1981.
- 17- Pope, S.B., "Ten questions concerning the large eddy simulation of turbulent flows", *New Journal of Physics*, Vol. 6, pp. 35-59, 2004.
- 18- Wegner, B., Maltsev, C., Schneider, C., Sadiki, A., Dreizler, A., and Janicka, J., "Evaluation of URANS performance in predicting an unconfined swirling flow with precessing vortex core based on LES and experiments", 3rd International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, pp. 25-27, 2003.
- 19- Hossain, M., Jones, J.C., and Malalasekera, W., "Modeling of a bluff-body nonpremixed flame using a coupled radiation/flamelet combustion model", *Flow Turbulence and Combustion*, Vol. 67, pp. 217-234, 2001.
- 20- Available from: <http://www.sandia.gov/TNF/abstract.html>
- 21- Ranzi, E., Dente, M., Goldaniga, A., Bozzano, G., and Faravelli, T., "Lumping procedures in detailed kinetic modeling of gasification, pyrolysis, partial oxidation and combustion of hydrocarbon mixtures", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 27, pp. 99-139, 2001.
- 22- Kashir, B., and Tabejamaat, S., "A numerical study on the effects of H₂ addition in non-premixed turbulent combustion of C₃H₈-H₂-N₂ mixture using a steady flamelet approach", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp. 9918-9927, 2013.
- 23- Cuenot, B., *The flamelet model for non-premixed combustion*. In: Echehki T., and Mastorakos, E., *Turbulent Combustion Modeling*, Springer, 2011.
- 24- Lee, K.W., Choi, D.H., "Prediction of NO in turbulent diffusion flames using eulerian particle flamelet model", *Combustion Theory and Modeling*, Vol. 12, pp. 905-927, 2008.
- 25- Peters, N., *Turbulent combustion*, Cambridge University Press, 2004.
- 26- Pitsch, H., Chen, M., and Peters, N., "Unsteady flamelet modeling of turbulent hydrogen-air diffusion flames", *Proceedings of the combustion institute*, Vol. 17, pp. 1057-1064, 1998.
- 27- Liu, K., Pope, S.B., and Caughey, D.A., "Calculations of bluff-body stabilized flames using a joint probability density function model with a detailed chemistry", *Combustion and Flame*, Vol. 141, pp. 89-117, 2005.
- 28- Kuan, T.S., Lindstedt, R.P., "Transported probability density function modeling of a bluff-body stabilized turbulent flames", *Proceedings of the combustion institute*, Vol. 30, pp. 767-774, 2005.
- 29- Esquiva-Dona, I., Nguyen, H.T., and Escudie, D., "Influence of a bluff-body shape on the stabilization regime of non-premixed flames", *Combustion and Flame*, Vol. 127, pp. 2167-2180, 2001.
- 30- Turns, S.R., *An Introduction to Combustion*, 2nd Edition, McGraw Hill, 2000.
- 31- Zhu, X.L., Gore, J.P., Karpetis, A.N., and Barlow, R.S., "The effects of self-absorption on an opposed flow partially premixed flame", *Combustion and Flame*, Vol. 129, pp. 342-345, 2002.
- 32- Barlow, R.S., Dibble, R.W., Lucht, R.P., and Chen, J.Y., "Effect of Damkohler number on super-equilibrium OH concentration in turbulent nonpremixed jet flames", *Combustion and Flame*, Vol. 82, pp. 235-251, 1990.