



مطالعه عددی برگشت شعله آرام در احتراق پیش مخلوط متان و هوا

ناصر سراج مهدیزاده^۱، علی لهراسبی نیچکوهی^{۲*}

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده مهندسی هوافضا - قطب هوافضای محاسباتی

* nichkoohi@aut.ac.ir

چکیده

در این مطالعه محدوده برگشت شعله و ساختار آن در لوله های باریک حامل جریان اشتعال پذیر بصورت عددی مورد بررسی قرار می گیرند. مدل ریاضی شامل معادلات بقای جرم، بقای ممنتوم، بقای انرژی و بقای اجزاء می باشد. احتراق نیز بصورت واکنش یک مرحله ای برای متان مدل می شود. این مطالعه در دو مرحله انجام می شود، در مرحله اول تحلیل بصورت گذرا انجام شده تا جایی که شعله وارد لوله پیش مخلوط شود و گرادیان سرعت بحرانی (محدوده برگشت شعله) برای نسبت سوخت به هوا مختلف و در شعاعهای مختلف تیوب بدست آید. همچنین محدوده ای از جریان که به ازای آن شعله ناپایدار است نیز در این مرحله بدست می آید. در مرحله دوم با کاهش بیشتر نرخ جریان ورودی به محفظه، یک شعله برگشته در ناحیه پیش مخلوط نزدیک دیواره ایجاد می شود که با مطالعه شعله برگشته در داخل لوله پیش مخلوط، ساختار شعله برگشته در نزدیک دیواره بدست می آید. با توجه به اینکه پیش بینی برگشت شعله بصورت تجربی بسیار خطرناک است، مطالعه عددی آن می تواند در شناسایی هر چه بیشتر این پدیده و همچنین توسعه سیستمهای احتراقی پیش مخلوط مفید واقع شود.

واژه های کلیدی: برگشت شعله - محدوده پایداری - شعله پیش مخلوط - گرادیان بحرانی

۱- مقدمه

امروزه بمنظور کاهش آلاینده های زیست محیطی حاصل از احتراق، روشهای مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از موثرترین راهکارها برای کاهش سطح آلودگی، استفاده از تکنیک احتراق پیش مخلوط با نسبت سوخت به هوای پایین، می باشد. در اینگونه سیستمهای احتراقی سوخت و اکسید کننده قبل از وارد شدن به محفظه احتراق با یکدیگر مخلوط گشته و سپس این مخلوط واکنشی اشتعال پذیر وارد محفظه احتراق می شود که با انجام احتراق دمای نهایی شعله پایین می آید و به تبع آن مقدار NOx نیز کاهش پیدا می کند [۱]. با این وجود، سیستمهای احتراقی پیش مخلوط با نسبت سوخت به هوای پایین نسبت به پدیده پیچیده و گذرای برگشت شعله بداخل لوله پیش مخلوط، حساسند [۲]. دو مکانیزمی که سبب برگشت شعله بداخل لوله پیش مخلوط می شوند عبارتند از:

(۱) انتشار شعله در لایه مرزی نزدیک دیواره لوله پیش مخلوط ناشی از نرخ پایین جریان ورودی

(۲) برگشت شعله در اثر نوسانات جریان ورودی به محفظه احتراق که از ناپایداری احتراق نشأت می پذیرد.

بیشتر داده های جمع اوری شده در زمینه برگشت شعله توسط Lewis, von Elbe صورت پذیرفته است [۳]. کار ایشان در واقع به مطالعه تجربی برگشت شعله در مشعل بنسن مربوط می شود. ایشان بطور تجربی نشان دادند که این پدیده در قسمت دیواره مشعل از سایر نواحی مشعل بیشتر است. یکی از دلایل اصلی آن، پایین بودن سرعت مخلوط در نواحی مرزی و نزدیک

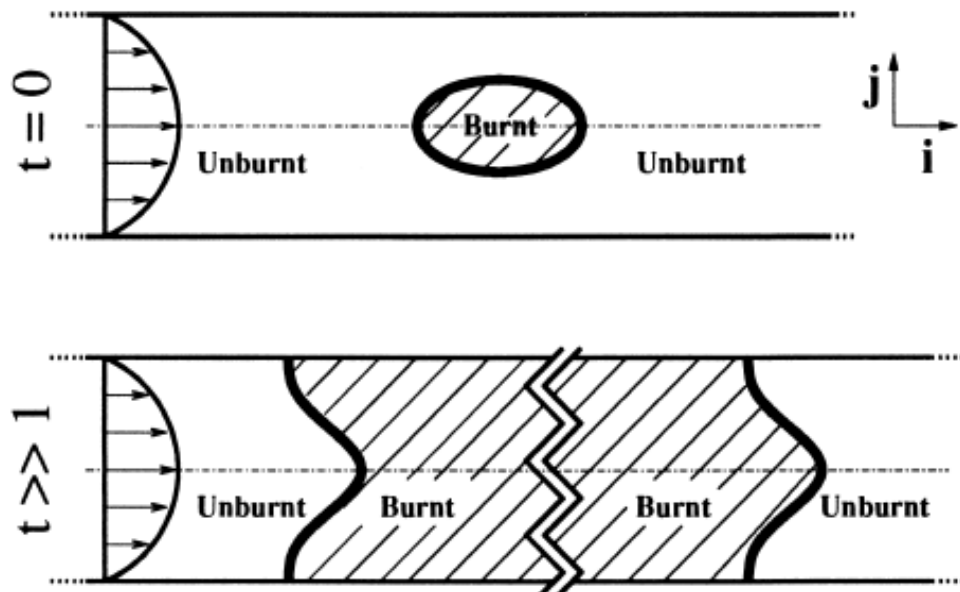
۱- دانشیار دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دیواره می باشد. یکی دیگر از تحقیقات انجام شده در زمینه پایداری شعله آرام در محفظه احتراق پیش مخلوط، کاری است که توسط Mishra صورت گرفته است [۴]. وی مقادیری از جریان ورودی که به ازای آن شعله ناپایدار است را بدست آورد. Kurdimov و همکارانش [۵-۷] این پدیده را هم بصورت تجربی و هم بصورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها توانستند اثر عوامل تأثیر گذار بر پدیده برگشت شعله، که در کنترل آن نقش اساسی دارد، شناسایی کنند. در این مطالعه، برگشت شعله در لوله جریان واکنشی نازک به روش عددی و گذرا مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه در دو قسمت انجام شده است: در مرحله اول، با کاهش دبی ورودی به ناحیه مورد مطالعه، اجازه داده می شود که شعله وارد ناحیه بالا دستی شود. محدوده بحرانی برای برگشت شعله در این مرحله بدست می آید. در مرحله دوم، با کاهش بیشتر دبی ورودی، به مطالعه ساختار شعله برگشته و مطالعه عوامل تأثیر گذار بر برگشت شعله در مرز بین ناحیه بالا دستی و پایین دستی پرداخته می شود. بدین منظور کد کامپیوتری به زبان C++ تهیه شده که بکمک آن ساختار شعله برگشته در ناحیه مورد مطالعه بررسی می شود. نواحی از جریان که به ازای آنها شعله ناپایدار می باشد (برگشت شعله) نیز در این تحقیق بدست می آید. همچنین صحت کار عددی با کار تجربی بوضوح دیده شده است.

۲- مدل سازی مسأله

فرض می شود که یک مخلوط واکنشی اشتعال پذیر درون یک لوله با دبی معین در جریان باشد. برای بوجود آوردن اشتعال دمای قسمتی از ناحیه مورد مطالعه که در پایین دست جریان قرار دارد، بالا می رود (لحظه $t = 0$). بعد از زمان مشخص شعله حاصل در جهت نشان داده شده جلو رفته و احتراق تشکیل می شود. (شکل ۱)



شکل ۱- مدل فیزیکی

با افزایش دبی جریان، شعله از ناحیه بالادستی فاصله گرفته و به قسمت پایین دست نفوذ پیدا می کند. از طرف دیگر با کاهش نرخ جریان ورودی، شعله به سمت ناحیه بالادست (نسوخته) نزدیک می شود. با کاهش بیشتر دبی جریان، به حد آستانه ای می رسیم که شعله وارد ناحیه نسوخته می شود. مقدار دبی بحرانی که به ازای آن شعله در آستانه ورود به ناحیه بالا دستی قرار می گیرد، در این مرحله بدست می آید. در مرحله دوم با کاهش بیشتر نرخ دبی ورودی، ساختار شعله نزدیک دیواره



FCCI2010-1199

سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



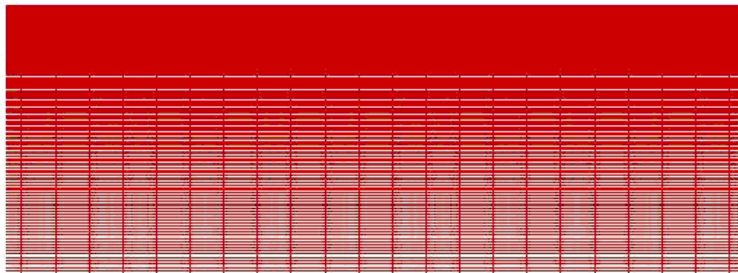
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی هوافضا

بدست می آید. لازم به ذکر است که برگشت شعله در جریان آرام واکنشی در لایه مرزی صورت می پذیرد، لذا در این مطالعه به بررسی ساختار شعله نزدیک دیواره پرداخته می شود.

۳- تولید شبکه

بمنظور عمومیت بخشیدن کد کامپیوتری برای هندسه های مختلف، تولید شبکه در این مدلسازی هم در فضای فیزیکی و هم در فضای محاسباتی صورت می پذیرد. بدین صورت که با وارد کردن تعداد نقاط شبکه در جهت Z و در جهت r، شبکه تولید می شود.

از آنجاییکه هدف اصلی این تحقیق، مدلسازی برگشت شعله در نزدیکی دیواره می باشد، لذا نقاط نزدیک مرز دیواره از اهمیت بیشتری برخوردارند. شبکه مورد نظر در نزدیکی دیواره به روش تابع هذلولوی سینوسی ریز می شود. با توجه به اینکه شبکه تولید شده در فضای محاسباتی در این تحقیق، بصورت مستطیلی و یکنواخت است و برای صرفه جویی در زمان محاسبات، از حل عددی شبکه بمنظور متعامدسازی آن صرف نظر می شود. نمونه ای از شبکه تولید شده در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، دیواره در قسمت بالا و مرز محور در قسمت پایین قرار دارد.



شکل ۲- شبکه تولید شده در فضای فیزیکی

۴- معادلات حاکم

برای شبیه سازی عددی جریان سیال از شکل عمومی معادلات حاکم بر جریان آرام واکنشی که در مرجع [۸] آورده شده است، استفاده می شود. مهمترین فرضیاتی که برای نوشتن این معادلات منظور شده است عبارتند از:

- ۱- جریان دو بعدی و متقارن محوری فرض می شود.
 - ۲- قوانین فوریه، فیک و نیوتن همچنان صادق می باشند.
 - ۳- از اثرات تشعشعی و نیروهای میدانی صرف نظر می شود.
 - ۴- قانون حالت گاز برای مخلوط اعمال می شود.
 - ۵- ضریب نفوذ اجزا برای همه ذرات یکسان فرض می شود.
 - ۶- از اثرات ویسکوزیته بالک صرف نظر می شود.
 - ۷- جریان بصورت گذرا در نظر گرفته می شود.
- با فرضیات فوق معادلات حاکم بصورت زیر نوشته می شوند:

۱- معادله بقای جرم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z) = 0 \quad (1)$$



FCCI2010-1199

سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی هوافضا

۲- معادله بقای اجزاء

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u_r Y_i)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_z Y_i)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho D \frac{\partial Y_i}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho D Y_i \frac{\partial Y_i}{\partial z}) + \omega_i^* \quad (2)$$

۳- معادله بقای ممنتوم در جهت شعاعی

$$\frac{\partial(\rho u_r)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u_r^2)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_r u_z)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r \tau_{rr})}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

۴- معادله بقای ممنتوم در جهت محوری

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u_r u_z)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_z u_z)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r \tau_{rz})}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (4)$$

۵- معادله بقای انرژی

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho C_p T u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho C_p T u_z)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial(k \frac{\partial T}{\partial r})}{\partial r} + \frac{\partial(k \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z} - \sum_{i=1}^N \omega_i^* h_{f,i}^o \quad (5)$$

$$+ \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r \tau_{rr} u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z \tau_{rz})}{\partial z} \right) + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r \tau_{rz} u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z \tau_{zz})}{\partial z} \right)$$

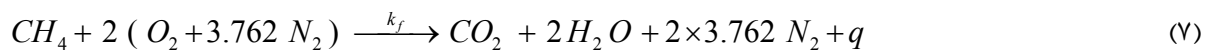
۶- معادله گاز حالت

$$p = \rho R_u T \sum \frac{Y_i}{M_i} \quad (6)$$

در روابط فوق؛ ρ چگالی، p فشار، T دما، u_r سرعت شعاعی، u_z سرعت محوری، k ضریب هدایت گرمایی، D ضریب نفوذ اجزاء، μ ضریب لزجت، ω_i^* نرخ تولید یا مصرف جزء i ام، Y_i^* کسر جرمی جزء i ام، C_p ضریب گرمایی ویژه، R_u ثابت جهانی گاز، M_i جرم ملکولی جزء i ام می باشد.

۵- مدل کردن احتراق

برای مدل کردن احتراق فرض می شود که واکنش بصورت یک مرحله ای باشد:



اگر چه واکنش فوق بصورت استوکیومتریک نوشته شده است ولی در کد کامپیوتری تمهیداتی اندیشیده شده که می تواند احتراق را بصورت غیر استوکیومتریک نیز مطالعه کند. از طرف دیگر معادله بقاء گونه‌ها شامل ۵ معادله می باشد و در هر یک از این معادلات نرخ تولید اجزاء از رابطه زیر بدست می آید [۹]:

$$RR = A \left[\frac{\rho Y_{CH_4}}{M_{CH_4}} \right]^{0.7} \left[\frac{\rho Y_{O_2}}{M_{O_2}} \right]^{0.8} \exp\left(\frac{-E}{R_u T} \right) \quad (8)$$

در رابطه فوق RR نرخ انجام واکنش می باشد و k_f ضریب ثابت انجام واکنش می باشد که از رابطه آرنیوس^۱ بدست می آید. از طرف دیگر A ترم ضریب نمایی واکنش است که از رابطه تجربی بدست می آید [۹].

همچنین نرخ تولید یا مصرف جزء i ام از رابطه زیر حاصل می شود:

$$w_i^* = M_i RR \quad (9)$$

¹ -Arrhenius

۶- شرایط مرزی مسأله

۱- مرز دیواره

فرض می شود که دیواره غیر کاتالیتیک و دمای آن با دمای مخلوط نسوخته یکسان باشد (Isothermal Surface) لذا در $r = R$ داریم:

$$T = T_0, \quad Y_i = Y_{i,0}, \quad u = 0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (10)$$

۲- مرز محور:

این مرز همان axis یا محور تقارن می باشد، لذا در $r = 0$:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial Y_i}{\partial r} = 0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (11)$$

۳- مرز ورودی

در این مرز همه مقادیر جز u مشخص می باشد. علاوه بر این چون جریان مادون صوت می باشد فقط یک متغیر (فشار) از داخل برونمایی می شود [۱۰]. لذا در بالا دست تشکیل شعله و در $z = -L/2$ شرایط زیر وجود دارد:

$$T = T_0, \quad Y_i = Y_{i,0}, \quad u = u(r), \quad v = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

۴- مرز خروجی

مرز خروجی در فاصله ای است که اثرات پایین دست بر شعله برگشته ضعیف باشد که در این تحقیق برابر $12.5 R$ در نظر گرفته می شود بعلاوه چون جریان خروجی نیز مادون صوت است فقط یک پارامتر معلوم وجود دارد (مؤلفه سرعت شعاعی) و سایر پارامترها از داخل برونمایی می شود [۱۰]. لذا در $z = L/2$ شرایط زیر وجود دارد:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial Y_i}{\partial z} = 0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

۷- روش حل

در این تحقیق از اسکیم مک کورمک^۱ برای گسسته سازی معادلات حاکم استفاده شده است [۱۱]. این روش که روش عددی غالب برای محاسبات عددی به روش تفاضل محدود می باشد شامل دو مرحله پیشگویی^۲ و تصحیح^۳ می باشد. در این روش در مرحله پیشگویی، مشتقات مکانی بصورت پیشرو^۴ و در مرحله تصحیح بصورت پسرو^۵ نوشته می شود سپس متوسط مقادیر محاسبه شده در این دو مرحله، مقدار نهایی پارامتر در لحظه بعدی می باشد. با نوشتن معادلات به فرم برداری زیر می توان نوشت:

$$r \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial z} + \frac{\partial G}{\partial r} = \frac{\partial F^v}{\partial z} + \frac{\partial G^v}{\partial r} + H \quad (14)$$

با تبدیل فرم معادلات به فضای محاسباتی و با گسسته کردن معادلات حاکم در دو مرحله پیشگویی و تصحیح، می توان نوشت:

1 - McCormack

2 - Correction

3 - Prediction

4 - Forward

5 - Backward



$$Q_{1,i,j}^{n+1} = Q_{1,i,j}^n - \frac{1}{\eta} \left(\frac{\Delta t}{\Delta \xi} [F_{1,i,j}^n - F_{1,i,j}^n] - \frac{\Delta t}{\Delta \eta} [G_{1,i,j}^n - G_{1,i,j}^n] + \frac{\Delta t}{\Delta \xi} [F_{1,i,j}^{v^n} - F_{1,i,j}^{v^n}] + \frac{\Delta t}{\Delta \eta} [G_{1,i,j}^{v^n} - G_{1,i,j}^{v^n}] \right) \quad (15)$$

۲- مرحله تصحیح:

$$Q_{1,i,j}^{n+1} = [Q_{1,i,j}^n + Q_{1,i,j}^{n+1} - \frac{1}{\eta} \left(\frac{\Delta t}{\Delta \xi} [F_{1,i,j}^{n+1} - F_{1,i-1,j}^{n+1}] - \frac{\Delta t}{\Delta \eta} [G_{1,i,j}^{n+1} - G_{1,i,j-1}^{n+1}] + \frac{\Delta t}{\Delta \xi} [F_{1,i,j}^{v^{n+1}} - F_{1,i-1,j}^{v^{n+1}}] + \frac{\Delta t}{\Delta \eta} [G_{1,i,j}^{v^{n+1}} - G_{1,i,j-1}^{v^{n+1}}] \right)] / 2 \quad (16)$$

در روابط فوق $n+1$ و $n+1$ بترتیب گام زمانی دو مرحله پیشگویی و مرحله تصحیح می باشند. در هر گام زمانی مقدار سرعت محوری در مرز ورودی کاهش پیدا می کند. منتها مقدار این دبی تا حدی کم می شود که شعله حاصل در آستانه ورود به نیمه بالادستی مدل قرار گیرد (در همسایگی ناحیه سوخته شده کسر جرمی محصولات احتراق قابل توجه باشد)

۸- نتایج حل عددی

۸-۱- بدست آوردن محدوده بحرانی برای برگشت شعله

همانطور که در بحثهای فوق توضیح داده شده است، برای تعیین معیار برگشت شعله یک گرادیان سرعت بحرانی نزدیک دیواره $r = R$ تعریف می شود که به g_F معروف است. با توجه به اینکه مقدار سرعت ورودی بداخل محفظه، بصورت پارابولیک در نظر گرفته می شود:

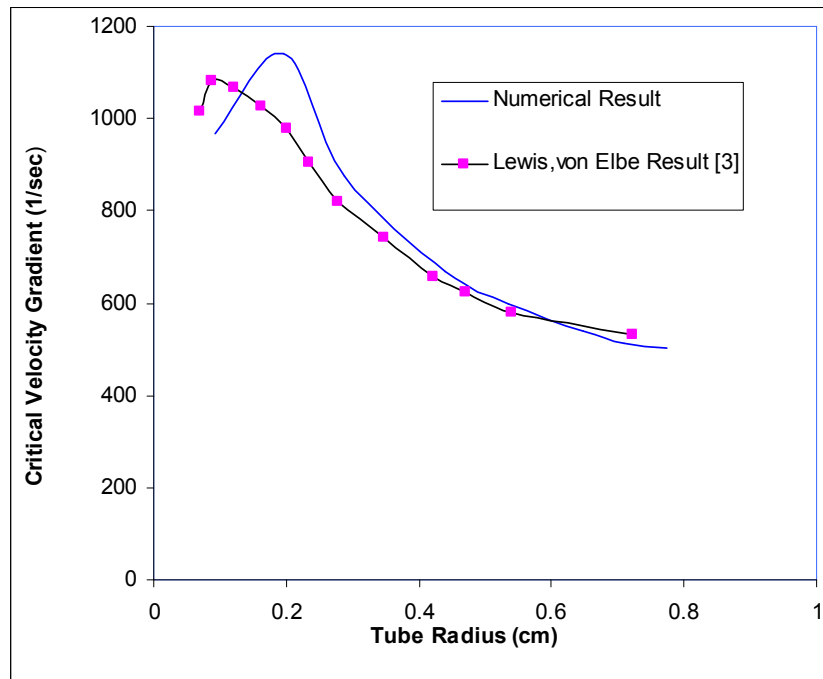
$$u = U_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (17)$$

در ابتدای حل مقدار U_0 طوری در نظر گرفته می شود که یک شعله رو به جلو در قسمت پایین دستی تشکیل شود. بدین منظور از نمودارهای پایداری Lewis, von Elbe [۳]، برای شعاعهای مختلف، مقدار U_0 انتخاب می شود، که در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۱- مقدار مقدار سرعت محوری ورودی لازم برای ایجاد یک شعله پایدار در یک لوله بر حسب شعاع در شعاعهای مختلف [۳]

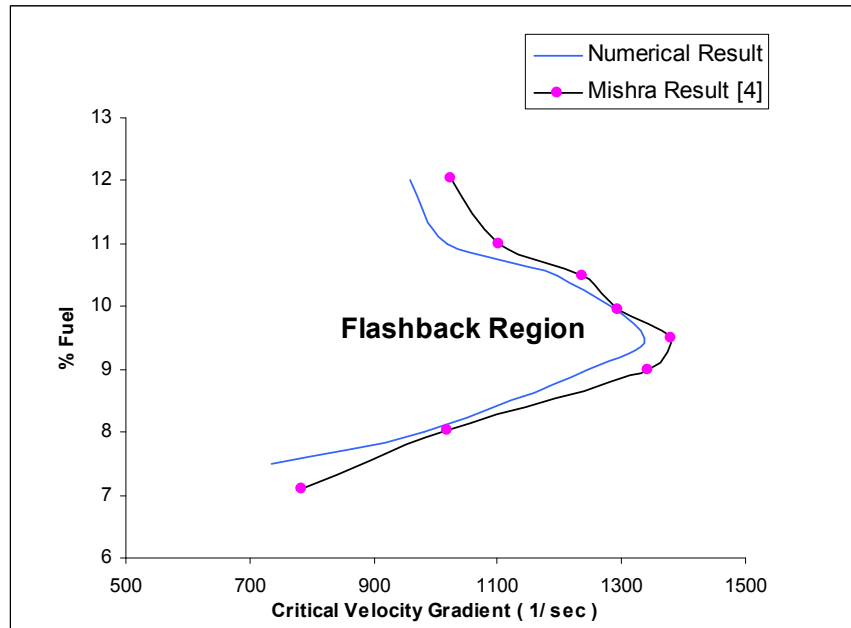
R (cm)	0.1945	0.2885	0.4395	0.534	0.649
U0(cm/s)	143.71	167.79	203.2885	225.49	251.52

حال با توجه به جدول ۱ برای هر شعاع داده شده، مقدار U_0 را در هر گام زمانی کاهش داده تا حدی که مقدار کسر جرمی محصولات احتراق در ناحیه بالا دستی قابل ملاحظه شود. در نتیجه طبق مقدار گرادیان سرعت در دیواره بر حسب شعاع برای حالت استوکیومتریک جریان بصورت زیر بدست می آید:



شکل ۳- گرادیان سرعت بحرانی برای برگشت شعله در شعاعهای مختلف در حالت استوکیومتریک جریان

با توجه به شکل ۳ مشاهده می شود که با کاهش شعاع لوله، گرادیان سرعت بحرانی ابتدا افزایش و سپس کاهش شدیدی پیدا می کند. این مشاهدات تئوری ساده گرادیان بحرانی، که مقدار g_F را مستقل از شعاع بیان می کند، رد می کند. از آنجایی که پایداری شعله در جریان آرام در واقع تقابل سرعت سوختن (نرخ انجام واکنش) با نرخ مخلوط ورودی می باشد، می توان گفت، زمانی که شعاع لوله کم باشد مکان شعله (شعله برگشته) بیشتر نزدیک دیواره است و بعلاوه کاهش فعالیت رادیکالها، نرخ واکنش نزدیک دیواره ها پایین می آید لذا مقدار نرخ مخلوط ورودی که لازم است تا با شعله رقابت کند نیز پایین است. ولی با کاهش شعاع لوله پیش مخلوط، جبهه شعله به محور لوله نزدیک می شود (نسبت به حالتی که شعاع کمتر است در گستره بیشتری از همسایگی محور قرار می گیرد) و از آنجایی که بیشترین فعالیت رادیکالها در یک لوله پیش مخلوط متقارن نزدیک محور لوله می باشد، لذا نرخ مخلوط ورودی که لازم است تا با شعله رقابت کند نیز بالا می رود. ولی اگر شعاع لوله از حدی کمتر شود اثرات خاموشی^۱ غالب گشته و نرخ سوختن نیز افت پیدا می کند و باعث می شود که مقدار g_F به شدت پایین آید. مشابه فوق، مطالعه برای شعاع $R = 0.6 \text{ cm}$ و برای درصد مولی مختلف سوخت در مخلوط واکنشی انجام می شود. شکل ۴ نتایج حاصل از تحلیل عددی انجام گرفته در این تحقیق و کار تجربی *Mishra* [۴] را نشان می دهد. شرایط تجربی آزمایشات *Mishra* [۴] در حقیقت برای یک مشعل بنسن و برای سوخت *CNG* (95.6 درصد متان و 1.2 درصد اتان و 1.4 درصد دی اکسید کربن و 1.7 درصد نیتروژن) و هوا انجام پذیرفته است. جریان هوای فشرده توسط کمپرسور و جریان سوخت *CNG* که فشار آن توسط مخزن فشرده تأمین می شود، درون یک محفظه پیش اختلاط با یکدیگر مخلوط شده و بعد از عبور لوله پیش اختلاط بطول 0.5 متر و شعاع 6 میلیمتر تشکیل شعله صورت می پذیرد.



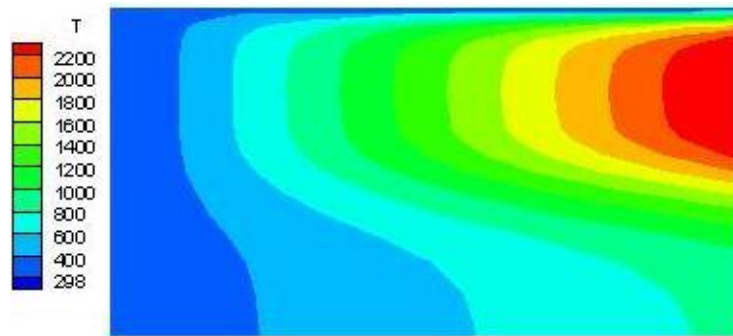
شکل ۴ - گرادیان سرعت بحرانی برگشت شعله برای درصدهای مختلف مولی سوخت در شعاع $R = 0.6 \text{ cm}$ از لوله جریان

با توجه به شکل ۴ ناحیه سمت چپ نمودار به ناحیه ای از جریان که به ازای آن شعله برگشته است، مربوط می شود. مشاهده می شود که حد برگشت شعله با غلظت سوخت تغییر می کند. و مقدار ماکزیمم گرادیان بحرانی (حد برگشت شعله) در حالتی است که درصد سوخت اندکی بیشتر از حالت استوکیومتریک است. در توجیه این پدیده می توان گفت که سرعت سوختن متان در نسبت هم ارزی غنی تر از حالت استوکیومتریک، ماکزیمم است. همچنین برای هر دو حالت غنی و فقیر سوخت (درصد سوخت بیشتر و کمتر از ۹.۵ درصد) مقدار گرادیان بحرانی با غلظت سوخت کاهش پیدا می کند.

۸-۲ - مطالعه ساختار شعله در ناحیه برگشته

در این قسمت به مطالعه اثرات قطر لوله پیش مخلوط بر ساختار شعله پرداخته می شود. مخلوط متان و هوا در شرایط استوکیومتریک (درصد مولی سوخت ۹.۵ درصد) در نظر گرفته می شود. شرایط مرزی مسأله، همچنان ثابت و برابر مقادیر داده شده در قسمت قبل می باشد. ولی شرایط اولیه مسأله در این قسمت، شرایط جریان در حد آستانه ورود به محفظه می باشد که از نتایج خروجی حاصل از قسمت قبل (مربوط به شرایط حدی برگشت شعله) بدست می آید. از آنجاییکه هدف اصلی در این قسمت، مشاهده ساختار شعله برگشته نزدیک دیواره هست، لذا برای دیدن ساختار شعله، مطالعه در دو شعاع کوچک $R = 0.22 \text{ cm}$ و $R = 0.11 \text{ cm}$ انجام می پذیرد. در هر دو شعاع مقدار طول کلی لوله $L = 25R$ در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه هدف از این قسمت نشان دادن ساختار شعله نزدیک دیواره است، برای وضوح بیشتر فقط ناحیه مشترک قسمت پایین دستی و بالا دستی نزدیک دیواره نشان داده شده است. در شکلهای زیر دیواره در قسمت بالا قرار دارد.

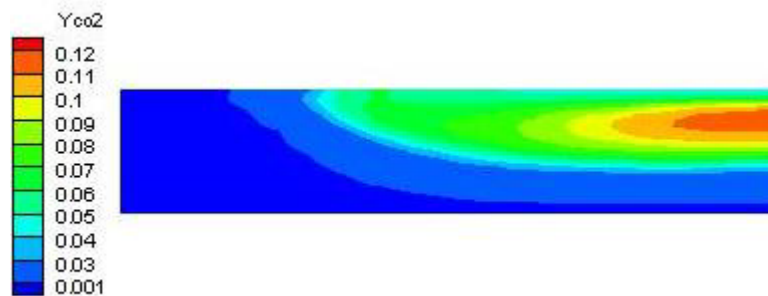
شکل ۵ ساختار شعله را برای شعاع $R = 0.22 \text{ cm}$ در ناحیه برگشته نشان می دهد:



شکل ۵ - کانتور دما در مرز بین ناحیه بالادست و ناحیه پایین دست نزدیک دیواره (اعتبار سنجی شده با Lee and Tien [12])

همانطور که از شکل ۵ بر می آید اولاً در نزدیکی دیواره، ساختار شعله بصورت برگشته می باشد. ثانیاً در نزدیک محور، شعله حالت رو به جلوی خود را حفظ می کند و این تأیید می کند که برگشت شعله در جریان آرام نزدیک دیواره اتفاق می افتد. همچنین کانتورهای شعله نزدیک دیواره با افت شدیدی روبرو می شود. این اثر به کاهش فعالیت رادیکالی نزدیک دیواره مربوط می شود.

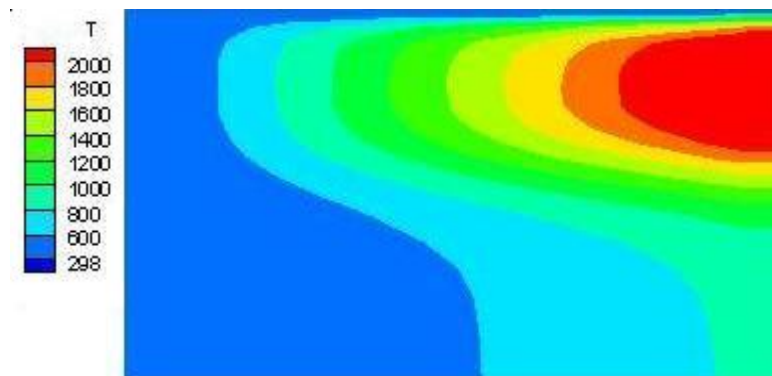
کانتور کسر جرمی دی اکسید کربن به عنوان محصول احتراق در شکل زیر آمده است:



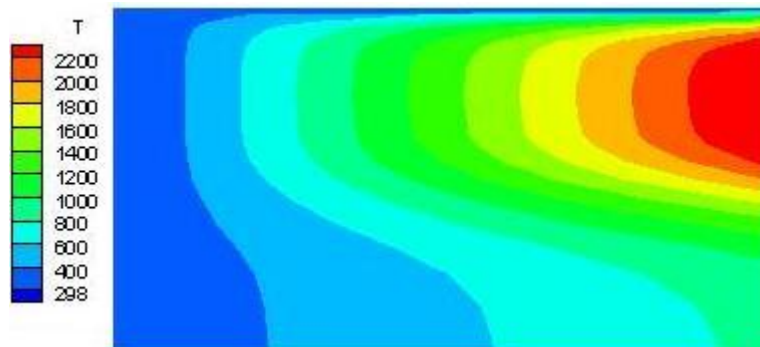
شکل ۶ - کانتور کسر جرمی متان دما در مرز بین ناحیه بالادست و ناحیه پایین دست نزدیک دیواره

همانطور که شکل ۶ نشان می دهد، نرخ واکنش شیمیایی نزدیک دیواره بشدت افت پیدا می کند بنابراین قسمتی از مخلوط گازی که از این ناحیه عبور می کند هنوز دارای مقدار زیادی گاز نسوخته است، لذا با گذشت زمان و در حین فرایند احتراق توسط دیفیوژن به محور لوله منتقل شده و در آنجا مصرف می شود.

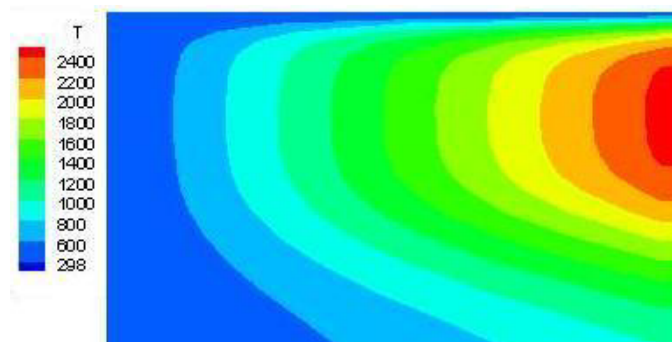
در ادامه کار تحلیل برای شعاع لوله $R = 0.22 \text{ cm}$ و برای گامهای زمانی مختلف ادامه می یابد. نتایج این مطالعه در شکل‌های زیر آورده شده است.



شکل ۷- کانتور دمای شعله برگشته نزدیک دیواره در مرز بین دو ناحیه بالادستی و ناحیه پایین دستی برای زمان $t = 0.07 \text{ msec}$

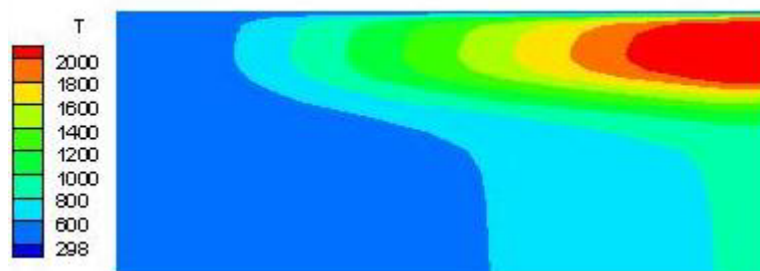


شکل ۸- کانتور دمای شعله برگشته نزدیک دیواره در مرز بین دو ناحیه بالادستی و ناحیه پایین دستی برای زمان $t = 0.09 \text{ msec}$

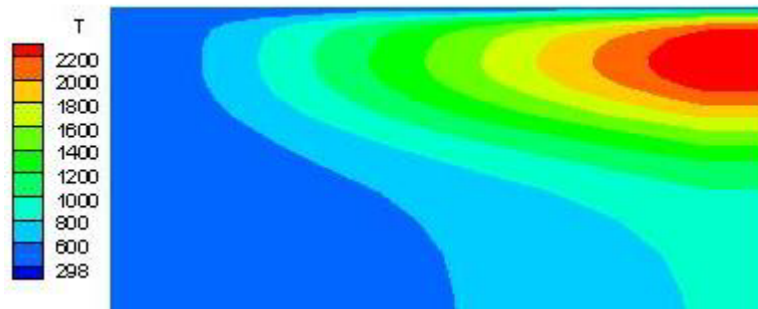


شکل ۹- کانتور دمای شعله برگشته نزدیک دیواره در مرز بین دو ناحیه بالادستی و ناحیه پایین دستی برای زمان $t = 0.12 \text{ msec}$

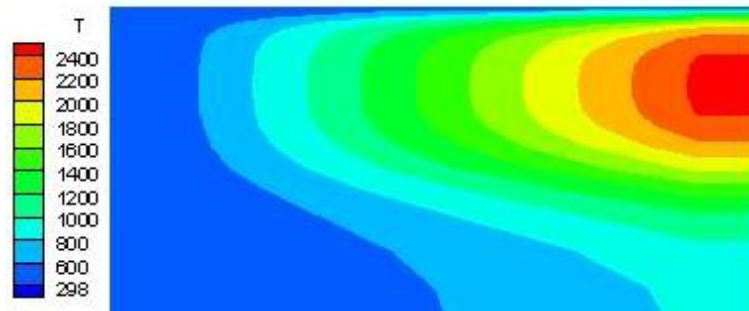
همانطور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، با گذشت زمان برگشت شعله ناحیه وسیعتری از همسایگی دیواره را در بر می‌گیرد. همچنین دمای شعله نیز با گذشت زمان افزایش می‌یابد. در توجیه اثرات فوق بایستی گفت، چون تحلیل بصورت گذرا انجام شده است و در هر گام زمانی مقدار دبی کاهش می‌یابد، لذا برگشت شعله نیز در وسعت بیشتری صورت می‌پذیرد. به عبارت دیگر نمودارهای فوق نشان می‌دهند که با کاهش دبی ورودی، شعله به فاصله بیشتری از دیواره نفوذ پیدا می‌کند. در شکل‌های زیر، نتایج تحلیل برای شعاع لوله $R = 0.11 \text{ cm}$ و برای گام‌های زمانی مختلف، آورده شده است



شکل ۱۰- کانتور دمای شعله برگشته نزدیک دیواره در مرز بین دو ناحیه بالادستی و ناحیه پایین دستی برای زمان $t = 0.07 \text{ msec}$



شکل ۱۱- کانتور دمای شعله برگشته نزدیک دیواره در مرز بین دو ناحیه بالادستی و ناحیه پایین دستی برای زمان $t = 0.09 \text{ msec}$



شکل ۱۲- کانتور دمای شعله برگشته نزدیک دیواره در مرز بین دو ناحیه بالادستی و ناحیه پایین دستی برای زمان $t = 0.12 \text{ msec}$

همانطور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، همانند قبل، با گذشت زمان برگشت شعله ناحیه وسیعتری از همسایگی دیواره را در بر می‌گیرد. همچنین دمای شعله نیز با گذشت زمان افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با مقایسه کانتورهای شعله برای شعاع $R = 0.11 \text{ cm}$ و $R = 0.22 \text{ cm}$ مشاهده می‌شود که در این حالت، منطقه برگشت شعله در ناحیه محاسباتی، در گستره کمتری از دیواره و مرز بالادستی قرار می‌گیرد. از این تحلیل نتیجه می‌شود که با کاهش شعاع، احتمال برگشت شعله نیز کم می‌شود. این نتیجه در قسمت اول مطالعه نیز نشان داده شده است.

۹- نتیجه گیری

در این مقاله، پدیده گذرای برگشت شعله برای جریان آرام پیش مخلوط در یک لوله مورد مطالعه قرار گرفته است. معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، بقای اجزاء، بقای ممنتوم و بقای انرژی هستند، که بروش اختلاف محدود و اسکیم مک کورمک، حل می‌شوند. تأکید اصلی این تحقیق بر اثرات قطر لوله و نسبت مولی سوخت در مخلوط واکنشی بر برگشت شعله می‌باشد. از آنجایی که سرعت سوختن متان در نسبت هم ارزی غنی تر از حالت استوکیومتری، ماکزیمم است، مشاهده شده است که مقدار حد برگشت شعله نیز در حالتی ماکزیمم است که درصد سوخت اندکی غنی تر از حالت استوکیومتری است. از طرف دیگر حد بحرانی برگشت شعله برای هر دو سمت غنی و فقیر سوخت کمتر از حالت استوکیومتری می‌باشد. همچنین مشاهده شده است که برای نسبت ترکیب معین از مخلوط واکنشی، با افزایش شعاع لوله، احتمال برگشت شعله نیز بیشتر می‌شود. همچنین با مشاهده ساختار شعله در ناحیه مورد مطالعه، بوضوح تأیید می‌شود که در جریان آرام واکنشی درون لوله، برگشت شعله اکثراً نزدیک دیواره صورت می‌پذیرد. همچنین با کاهش شعاع لوله، احتمال برگشت شعله کاهش می‌یابد. با مقایسه نتایج این تحقیق و نتایج تجربی، بوضوح دیده می‌شود که مطالعه فوق را می‌توان برای طراحی و توسعه وسایل احتراقی تعمیم داد.



FCCI2010-1199

سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی هوافضا

مراجع

- 1- Giuliani, F., "*Gas Turbine Combustion*", Institute for Thermal Turbo machinery Machine Dynamics, Graz University of Technology, Germany, 2007.
- 2- Ricard, C.S., "*Detailed Numerical Simulation of Laminar Flames*", University of Catalunya, PhD Thesis, 2002.
- 3- Lewis, B., and Von Elbe, G., "*Combustion, Flames and Explosion of Gases*", 3rd Ed, Academic Press, Orlando, 1987.
- 4- Mishra.D.P., "*Experimental studies of flame stability limit of CNG-Air*", Energy Conversion and Management, 2006.
- 5- Kurdimov, V., N., Fernandez, E., Linan, A., "*Flame flashback and propagation of premixed flames near a wall*", Proceeding of the Combustion Institute, Vol28, pp.1883-1889, 2000.
- 6- Kurdimov, V., N., Fernandez, E., "*Lewis Number Effect on the Propagation of Premixed Laminar Flames in Narrow Open Ducts*", Combustion and Flame, Vol 128, pp.382-395, 2002.
- 7- Kurdimov, V., Fernandez, E., Truffaut, J.M., "*Experimental and numerical study of premixed flame flashback*", Proceeding of the Combustion Institute, Vol31, pp.1275-1282, 2007.
- 8- Lilleberg, B., "*Computational modelling of non-conventional, lean premixed gas turbine combustors*", PhD Thesis Description, NTNU, 2005.
- 9- Charles, K. Westbrook and Fredrick, L. Dryer, "*Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion*", Proy. Energy Combust. Sci. Vol. 10, pp. 1-57, 1984.
- 10- Anderson, J.D., "*Computational Fluid Dynamics, the basics with applications*", McGraw-Hill, New York, 1995.
- 11- Haffmann, K.A., Chiang, S.T., "*Computational fluid dynamics for engineers*", Kansas, USA, 1993.
- 12- Lee, S.T., and Tien.J.S., "*A Numerical Analysis of Flame Flashback in Laminar Premixed system*" , Combustion and Flame, Vol 48 ,pp.273-285, 1982