

## مطالعه عددی پدیده برگشت شعله در سیستم‌های احتراقی پیش اختلاط آرام

علی لهراسبی نیچکوهی<sup>۱</sup>  
Lohrasbi@iauns.ac.ir

پذیرش مقاله: ۸۹/۰۶/۰۷

دریافت مقاله: ۸۹/۰۴/۱۳

### چکیده

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

### کلیدواژه:

انتشار ناگهانی شعله - حل عددی - شعله آرام - احتراق پیش اختلاط

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نوشهر

## ۱- مقدمه

امروزه به منظور کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی حاصل از احتراق، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از موثرترین راهکارها، استفاده از تکنیک احتراق پیش اختلاط با نسبت سوخت به هوای پایین، است. در این سیستم‌های احتراقی، سوخت و اکسیدکننده قبل از ورود به محفظه احتراق با یکدیگر مخلوط گشته و سپس مخلوط واکنشی اشتعال‌پذیر، وارد محفظه احتراق می‌شود که با انجام احتراق دمای نهایی شعله پایین می‌آید و به تبع آن مقدار  $NO_x$  نیز کاهش می‌یابد [۱]. با این وجود، این سیستم‌های احتراقی نسبت به پدیده پیچیده و گذرای برگشت شعله به داخل لوله پیش اختلاط، حساس هستند [۲]. دو مکانیزم عمده‌ای که سبب برگشت شعله بداخل لوله پیش اختلاط می‌شوند عبارتند از:

۱- انتشار شعله در لایه مرزی نزدیک دیواره لوله پیش اختلاط ناشی از نرخ پایین جریان ورودی

۲- برگشت شعله در اثر نوسانات جریان ورودی به محفظه احتراق که از ناپایداری احتراق نشأت می‌پذیرد.

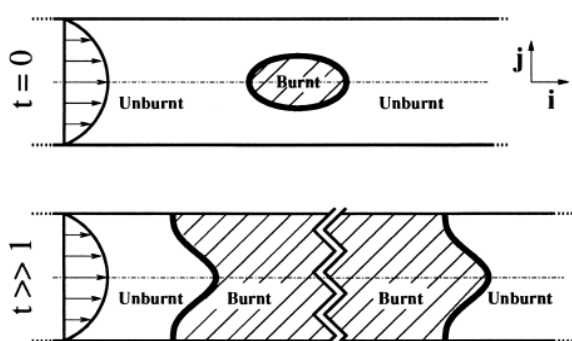
بیشتر داده‌های جمع‌آوری شده در زمینه برگشت شعله توسط لوئیس و ون الب (Lewis, von Elbe) صورت پذیرفته است [۳]. کار ایشان در واقع به مطالعه تجربی برگشت شعله در مشعل بنسن مربوط می‌شود. ایشان بطور تجربی نشان دادند که این پدیده در قسمت دیواره مشعل از سایر نواحی مشعل بیشتر است. یکی از دلایل اصلی آن، پایین بودن سرعت مخلوط ورودی در نواحی مرزی و نزدیک دیواره است. یکی دیگر از تحقیقات انجام شده در زمینه پایداری شعله آرام در محفظه احتراق پیش اختلاط، کاری است که توسط میشر (Mishra) صورت گرفته است [۴]. وی مقادیری از جریان ورودی که به‌زای آن شعله ناپایدار است را بدست آورد. کوردیموف و همکارانش (Kurdimov, et. al.) [۵] - [۷] این پدیده را هم به صورت تجربی و هم به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها توانستند اثر عوامل تأثیرگذار بر پدیده برگشت شعله، که در کنترل آن نیز نقش اساسی دارد، را شناسایی کنند.

در این مطالعه، برگشت شعله در لوله جریان واکنشی نازک به روش عددی و گذرا مورد بررسی می‌گیرد. مطالعه در دو قسمت انجام شده است: در مرحله اول، با کاهش دبی ورودی به ناحیه مورد مطالعه، اجازه داده می‌شود که شعله وارد ناحیه بالا دستی شود. محدوده بحرانی برگشت شعله در این مرحله بدست می‌آید. در مرحله دوم، با کاهش بیشتر دبی ورودی، به مطالعه ساختار شعله برگشته و عوامل تأثیرگذار بر برگشت شعله در مرز بین ناحیه بالا دستی و پایین دستی پرداخته می‌شود. بدین منظور کد کامپیوتری به زبان ++C تهیه شده که به کمک آن ساختار شعله برگشته و نواحی از جریان

که به‌زای آنها شعله ناپایدار است بدست می‌آید. همچنین صحت کار عددی با کار تجربی مشخص می‌شود.

## ۲- مدلسازی مسأله

فرض می‌شود که یک مخلوط واکنشی اشتعال‌پذیر 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 می‌رود (لحظه  $t = 0$ ). بعد از زمان مشخص، شعله حاصل در جهت نشان داده شده جلو رفته و احتراق تشکیل می‌شود. مدل فیزیکی مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): مدل فیزیکی

با افزایش دبی جریان، شعله از ناحیه بالادستی فاصله گرفته و به قسمت پایین دست نفوذ پیدا می‌کند. از طرف دیگر با کاهش نرخ جریان ورودی، شعله به سمت ناحیه بالادست (نسوخته) نزدیک می‌شود. با کاهش بیشتر دبی جریان، به حد آستانه‌ای می‌رسد که شعله وارد ناحیه نسوخته می‌شود. مقدار دبی بحرانی که به‌زای آن شعله در آستانه ورود به ناحیه بالا دستی قرار می‌گیرد، در این مرحله بدست می‌آید. در مرحله دوم با کاهش بیشتر نرخ دبی ورودی، ساختار شعله نزدیک دیواره بدست می‌آید. لازم به ذکر است که برگشت شعله در جریان آرام واکنشی در لایه مرزی صورت می‌پذیرد، لذا در این مطالعه به بررسی ساختار شعله نزدیک دیواره پرداخته می‌شود.

## ۲-۱- تولید شبکه

به‌منظور عمومیت بخشیدن کد کامپیوتری برای هندسه‌های مختلف، تولید شبکه در این مدلسازی هم در فضای فیزیکی و هم در فضای محاسباتی صورت می‌پذیرد. بدین صورت که با وارد کردن تعداد نقاط شبکه در جهت  $z$  و در جهت  $r$  شبکه تولید می‌شود.

از آنجاییکه هدف اصلی این تحقیق، مدلسازی برگشت شعله در نزدیکی دیواره است، نقاط نزدیک مرز دیواره از اهمیت بیشتری

معادله بقای ممنتوم شعاعی

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

معادله بقای ممنتوم محوری

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

معادله بقای انرژی

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

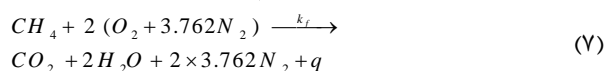
معادله حالت گاز

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

در روابط فوق؛  $\rho$  چگالی،  $p$  فشار،  $T$  دما،  $u_r$  سرعت شعاعی،  $u_z$  سرعت محوری،  $k$  ضریب هدایت گرمایی،  $D$  ضریب نفوذ اجزا،  $\mu$  ضریب لزجت،  $\omega_i$  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 مولکولی جزء  $i$  ام می‌باشد.

### ۲-۳- مدل کردن احتراق

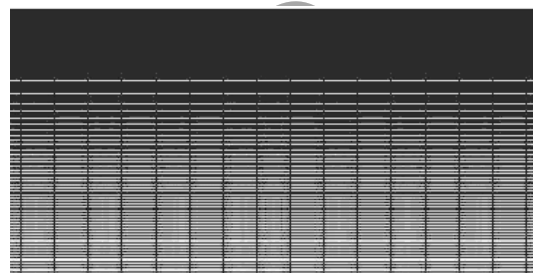
برای مدل کردن احتراق فرض می‌شود که واکنش به صورت یک مرحله‌ای باشد:



اگر چه واکنش فوق به صورت استوکیومتریکی نوشته شده است ولی در کد کامپیوتری تمهیداتی اندیشیده شده که می‌تواند احتراق را به صورت غیر استوکیومتریکی نیز مطالعه کند. از طرف دیگر معادله بقای گونه‌ها شامل ۵ معادله می‌باشد و در هر یک از این معادلات نرخ تولید اجزا از رابطه زیر بدست می‌آید [۹]:

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

برخوردارند. شبکه مورد نظر در نزدیکی دیواره به روش تابع هذلولوی سینوسی ریز می‌شود. با توجه به اینکه شبکه تولید شده در فضای محاسباتی در این تحقیق، به صورت مستطیلی و یکنواخت است و برای صرفه‌جویی در زمان محاسبات، از حل عددی شبکه به منظور متعامدسازی آن صرف نظر می‌شود. نمونه‌ای 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

### ۲-۲- معادلات حاکم

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

- ۱- جریان دو بعدی و متقارن محوری فرض می‌شود.
- ۲- قوانین فوریه، فیک و نیوتن همچنان صادق می‌باشند.
- ۳- از اثرات تشعشعی و نیروهای میدانی صرف نظر می‌شود.
- ۴- قانون حالت گاز برای اجزای مخلوط اعمال می‌شود.
- ۵- ضریب نفوذ اجزا برای همه ذرات یکسان فرض می‌شود.
- ۶- از اثرات ویسکوزیته بالک صرف نظر می‌شود.
- ۷- جریان به صورت گذرا در نظر گرفته می‌شود.

با فرضیات فوق معادلات حاکم به صورت زیر نوشته می‌شوند:

معادله بقای جرم

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

معادله بقای اجزاء

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

روش عددی مرسوم برای محاسبات عددی به روش تفاضل محدود است، شامل دو مرحله پیشگویی (Correction) و تصحیح (Prediction) است که در مرحله پیشگویی، مشتقات مکانی به صورت پیشرو و در مرحله تصحیح به صورت پسرو نوشته می‌شود سپس متوسط مقادیر محاسبه شده در این دو مرحله، مقدار نهایی پارامتر در لحظه بعدی می‌باشد. در هر گام زمانی مقدار سرعت محوری در مرز ورودی کاهش پیدا می‌کند. منتها مقدار این دبی تا حدی کم می‌شود که شعله حاصل در آستانه ورود به نیمه بالادستی مدل قرار گیرد (در همسایگی ناحیه سوخته شده کسر جرمی محصولات احتراق قابل توجه باشد).

#### ۴- نتایج حل عددی

##### ۴-۱- 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 تعریف می‌شود که به  $g_F$  معروف است. با توجه به اینکه مقدار سرعت ورودی بداخل محفظه، به صورت پارابولیک است:

$$u_r = U_0 \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (13)$$

در ابتدای حل مقدار طوری در نظر گرفته می‌شود که یک شعله رو به جلو در قسمت پایین تشکیل شود. بدین منظور از نمودارهای پایداری لویس و ون الب [۳]، برای شعاع‌های مختلف، مقادیر انتخاب می‌شوند، که در جدول زیر آورده شده است:

جدول (۱): مقادیر سرعت محوری ورودی لازم برای ایجاد یک شعله پایدار در یک لوله در شعاع‌های مختلف [۳]

شعاع لوله R(cm)	سرعت ورودی $U_0$ (cm/s)
0.1945	143.71
0.2885	167.79
0.4395	203.29
0.5340	225.49
0.6490	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 مطابق رابطه ۱۳، مقدار گرادیان سرعت در دیواره برحسب شعاع برای حالت استوکیومتری یک جریان به صورت زیر بدست می‌آید:

در رابطه فوق  $RR$  نرخ انجام واکنش است و  $k_f$  ضریب ثابت انجام واکنش است که از رابطه آرنیوس بدست می‌آید. همچنین  $A$  ترم ضریب نمایی واکنش است که از رابطه تجربی بدست می‌آید [۹].

##### ۴-۲- شرایط مرزی مسأله

##### ۴-۲-۱- مرز دیواره

فرض می‌شود که دیواره غیر کاتالیتیک و دمای آن با دمای مخلوط نسوخته یکسان باشد (Isothermal Surface). با توجه به اینکه در لایه مرزی گرادیان فشار در جهت عمودی صفر است [۱۱]، شرایط مرزی در  $r=R$  به صورت زیر است:

$$T = T_0, Y_i = Y_{i,0}, u_r = 0, u_z = 0, \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

##### ۴-۲-۲- مرز محور

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

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{\partial u_z}{\partial r} = 0, \frac{\partial Y_i}{\partial r} = 0, u_r = 0, \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (10)$$

##### ۴-۲-۳- مرز ورودی

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

$$T = T_0, Y_i = Y_{i,0}, u_z = u(r), u_r = 0, \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

##### ۴-۲-۴- مرز خروجی

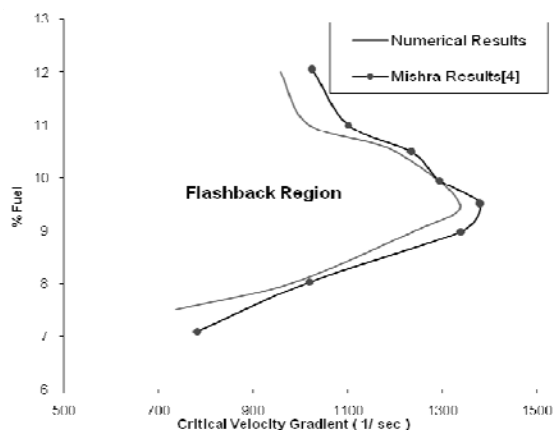
مرز خروجی در فاصله‌ای است که اثرات پایین دست بر شعله برگشته ضعیف باشد که در این تحقیق در فاصله  $L = 25R$  در نظر گرفته می‌شود به علاوه چون جریان خروجی نیز مادون صوت است فقط یک پارامتر معلوم وجود دارد (مؤلفه سرعت شعاعی) و سایر پارامترها از داخل برونمایی می‌شود [۱۰]. لذا در  $z = L/2$  شرایط زیر وجود دارد:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0, \frac{\partial Y_i}{\partial z} = 0, u_r = 0, \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

##### ۳- روش حل

در این تحقیق از اسکیم مک کورمک (McCormack) برای گسسته‌سازی معادلات حاکم استفاده شده است [۱۱]. این روش که

شده و بعد از عبور لوله پیش اختلاط به طول 0.5 متر و شعاع 6 میلیمتر تشکیل شعله صورت می‌پذیرد.

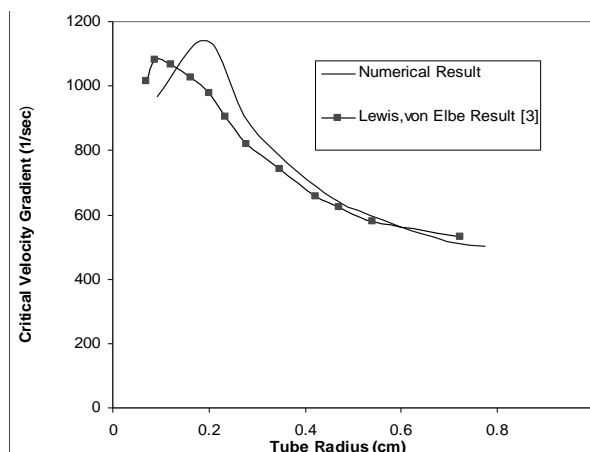


شکل (۴): گرادیان سرعت بحرانی برگشت شعله برای درصدهای مختلف مولی سوخت در شعاع  $R = 0.6 \text{ cm}$  از لوله جریان

با توجه به شکل (۴) ناحیه سمت چپ نمودار به ناحیه‌ای از جریان که به‌ازای آن شعله برگشته است، مربوط می‌شود. مشاهده می‌شود که حد برگشت شعله با غلظت سوخت تغییر می‌کند. و مقدار ماکزیمم گرادیان بحرانی (حد برگشت شعله) در حالتی است که درصد سوخت اندکی بیشتر از حالت استوکیومتریک است. در توجیه این پدیده می‌توان گفت که سرعت سوختن متان در نسبت هم ارزی غنی‌تر 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 می‌کند.

#### ۴-۲- مطالعه ساختار شعله در ناحیه برگشته

در این قسمت به مطالعه اثرات قطر لوله پیش اختلاط بر ساختار شعله پرداخته می‌شود. مخلوط متان و هوا در شرایط استوکیومتریک (درصد مولی سوخت 9.5 درصد) در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرزی مسأله، همچنان ثابت و برابر مقادیر داده شده در قسمت قبل می‌باشد. ولی شرایط اولیه مسأله در این قسمت، شرایط جریان در حد آستانه ورود به محفظه می‌باشد که از نتایج خروجی حاصل از قسمت قبل (مربوط به شرایط حدی برگشت شعله) بدست می‌آید. از آنجایی که 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 می‌پذیرد. در هر دو شعاع مقدار طول کلی لوله  $L = 25R$  در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه هدف از این قسمت نشان دادن ساختار شعله نزدیک دیواره است، برای وضوح بیشتر فقط ناحیه



شکل (۳): گرادیان سرعت بحرانی برای برگشت شعله در شعاعهای مختلف در حالت استوکیومتریک جریان

با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که با کاهش شعاع لوله، گرادیان سرعت بحرانی ابتدا افزایش و سپس کاهش شدیدی پیدا می‌کند. این مشاهدات تئوری ساده گرادیان بحرانی، که مقدار  $g_F$  را مستقل از شعاع بیان می‌کند، رد می‌کند. از آنجایی که پایداری شعله در جریان آرام در واقع تقابل سرعت سوختن (نرخ انجام واکنش) با نرخ اختلاط ورودی است، می‌توان گفت، زمانی که شعاع لوله کم باشد مکان شعله (شعله برگشته) بیشتر نزدیک دیواره است و بعلاوه کاهش فعالیت رادیکال‌ها، نرخ واکنش نزدیک دیواره‌ها پایین می‌آید لذا مقدار نرخ مخلوط ورودی که لازم است تا با شعله رقابت کند نیز پایین است. ولی با کاهش شعاع لوله پیش اختلاط، جبهه شعله به محور لوله نزدیک می‌شود (نسبت به حالتی که شعاع کمتر است در گستره بیشتری از همسایگی محور قرار می‌گیرد) و از آنجایی که بیشترین فعالیت رادیکال‌ها در یک لوله پیش اختلاط متقارن نزدیک محور لوله می‌باشد، لذا نرخ اختلاط ورودی که لازم است تا با شعله رقابت کند نیز بالا می‌رود. ولی اگر شعاع لوله از حدی کمتر شود اثرات خاموشی Quenching effect غالب گشته و نرخ سوختن نیز افت پیدا می‌کند و باعث می‌شود که مقدار  $g_F$  به شدت پایین آید. مشابه کار فوق، مطالعه برای شعاع  $R = 0.6 \text{ cm}$  و برای درصدهای مولی مختلف سوخت انجام می‌شود. شکل (۴) نتایج حاصل از تحلیل عددی انجام گرفته در این تحقیق و کار تجربی می‌شیرا [۴] را نشان می‌دهد. شرایط تجربی آزمایشات می‌شیرا در حقیقت برای یک مشعل بنسن و برای سوخت CNG (95.6 درصد متان و 1.2 درصد اتان و 1.4 درصد دی‌اکسید 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 می‌شود، درون یک محفظه پیش اختلاط با یکدیگر مخلوط

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 به صورت 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 (۹): کانتور دمای شعله برگشته نزدیک دیواره در مرز بین دو ناحیه بالادستی و ناحیه پایین دستی برای زمان  $t = 0.07 \text{ msec}$



شکل (۱۰): کانتور دمای شعله برگشته نزدیک دیواره در مرز بین دو ناحیه بالادستی و ناحیه پایین دستی برای زمان  $t = 0.09 \text{ msec}$

با توجه به شکل‌های فوق، 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. لازم به ذکر است که در روش عددی برای مطالعه اندازه شبکه و برای اینکه استقلال حل از تعداد نودهای مش‌بندی نشان داده شود، در ابتدای کار برای شعاع  $R = 0.22 \text{ cm}$  مقدار دمای ماکزیمم برحسب تعداد نودها رسم می‌شود:

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 می‌دهد:



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

همانطور که از شکل (۵) برمی‌آید اولاً در نزدیکی دیواره، ساختار شعله به صورت برگشته می‌باشد. ثانیاً در نزدیک محور، شعله حالت رو به جلوی خود را حفظ می‌کند و این تأیید می‌کند که برگشت شعله در جریان آرام نزدیک دیواره اتفاق می‌افتد. همچنین کانتورهای شعله نزدیک دیواره با افت شدیدی روبرو می‌شود. این اثر به کاهش فعالیت رادیکالی نزدیک دیواره مربوط می‌شود. در ادامه کار تحلیل برای شعاع لوله  $R = 0.22 \text{ cm}$  و برای گام‌های زمانی مختلف ادامه می‌یابد. نتایج این مطالعه در شکل‌های زیر آورده شده است.



شکل (۶): کانتور دمای شعله برگشته نزدیک دیواره در مرز بین دو ناحیه بالادستی و ناحیه پایین دستی برای زمان  $t = 0.07 \text{ msec}$

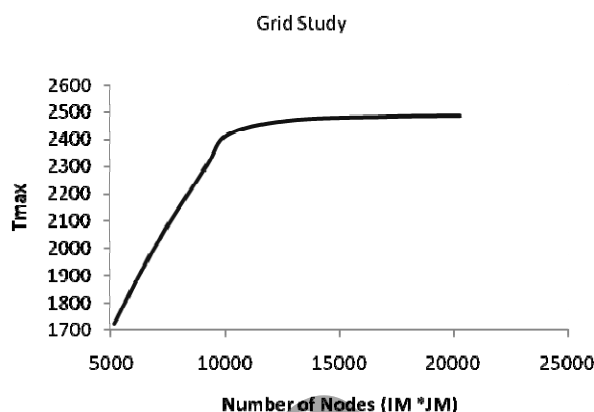


شکل (۷): کانتور دمای شعله برگشته نزدیک دیواره در مرز بین دو ناحیه بالادستی و ناحیه پایین دستی برای زمان  $t = 0.09 \text{ msec}$

دیده می‌شود که مطالعه فوق را می‌توان برای طراحی و توسعه وسایل احتراقی تعمیم داد.

## ۶- مراجع

- [1] Giuliani, F., Gas Turbine Combustion, Institute for Thermal Turbo machinery Machine Dynamics, Graz University of Technology, Germany, 2007, Chaps.1, 3,5.
- [2] Jejurkar, S. K., Mishra D. P., "Numerical Characterization of A Premixed Flame Based Annular Micro Combustor," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, Issue 18, September 2010, pp. 9755-9766.
- [3] Lewis, B., Von Elbe, G., "Combustion, Flames and Explosion of Gases," 3rd Ed, Academic Press, Orlando, 1987, Chaps.2, 3.
- [4] Mishra. D. P., "Experimental Studies of Flame Stability Limit of CNG-Air," Journal of Energy Conversion and Management, Vol. 48, Issue 4, April 2007, pp. 1208-1211.
- [5] Kurdimov, V. N., Fernandez, E., and Linan, A., "Flame Flashback and Propagation of Premixed Flames near A Wall," Proceeding of the Combustion Institute, Vol. 28, 2000.
- [6] Kurdimov, V. N., Fernandez, E., "Lewis Number Effect on the Propagation of Premixed Laminar Flames in Narrow Open Ducts," Journal of Combustion and Flame, Vol. 128, 2002, pp. 382-395.
- [7] Kurdimov, V., Fernandez, E., and Truffaut, J. M., "Experimental and Numerical Study of Premixed Flame Flashback," Proceeding of the Combustion Institute, Vol. 31, 2007.
- [8] Blesinger, G., Koch, R., "Influence of Flow Field Scaling On Flashback Of Swirl Flames," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 34, Issue 3, April 2010, pp. 290-298.
- [9] Charles, K., Westbrook and Fredrick, L. Dryer, "Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion", Journal of Progress in Energy and Combustion Science. Vol. 10, 1984, pp. 1-57.
- [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., Tien, J. S., "A Numerical Analysis of Flame Flashback in Laminar Premixed System," Journal of Combustion and Flame, Vol. 48, 1982, pp. 273-285.



شکل (۱۱): مطالعه موردی شبکه grid study برای دمای ماکزیمم (تعمیم داده شده برای سایر مطالعات موردی)

مشاهده می‌شود که برای شبکه  $IM * JM = 201 * 51$  فرایند حل تقریباً مستقل از تعداد نود شبکه می‌شود. لذا برای ادامه کار از تعداد نودهای فوق استفاده می‌شود.

## ۵- جمع‌بندی

در این مقاله، پدیده‌گذرای برگشت شعله برای جریان آرام پیش اختلاط در یک لوله مورد مطالعه قرار گرفته است. معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، بقای اجزاء، بقای ممنوم و بقای انرژی هستند، که به روش 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 غنی‌تر 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. از طرفی با مشاهده ساختار شعله در ناحیه مورد مطالعه، به‌وضوح 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، به‌وضوح