

## مطالعه پدیده خاموشی - اشتعال مکرر در احتراق رقیق هیدروژن - هوا درون میکرو کانال گرم شونده

کیومرث مظاهری<sup>۱\*</sup>، علیرضا علی پور<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت مدرس - تهران

(\*نویسنده مخاطب: kiumars@modares.ac.ir)

### چکیده

در تحقیق حاضر جزئیات فرایند خاموشی - اشتعال مکرر برای مخلوط رقیق هیدروژن-هوا (با نسبت هم ارزی ۰/۵) در یک میکرو کانال تحت گرادیان دمایی معین، به صورت عددی بررسی گردیده است. در شبیه سازی عددی از فرمول بندی عدد ماخ پایین، سینتیک تفصیلی و ضرایب نفوذ مولکولی مختلف برای گونه ها استفاده گردیده است. در رژیم خاموشی - اشتعال مکرر، فرایند اشتعال، در نزدیکی دیوار و تحت تاثیر دمای دیوار آغاز می گردد و شعله به سمت بالادست و پایین دست جریان کشیده می شود تا هنگامی که شعله به دو شاخه تبدیل می شود و با حرکت به سمت بالا دست جریان، مواد نسوخته ورودی را مصرف می کند و با حرکت به سمت پایین دست جریان، مواد نسوخته در بخش محصولات را مصرف می کند. این فرایند را می توان به ۵ فاز شامل فازهای آغازش، اشتعال، انتشار، واکنش های ضعیف و جریان تقسیم بندی نمود. در فازهای آغازش و اشتعال مقدار قابل توجهی سوخت در پایین دست جریان وجود دارد که در فاز انتشار با دو شاخه شدن شعله این مقدار سوخت کاملاً مصرف می شود. با بررسی میدان جریان مشاهده گردید که دو شاخه شدن شعله ناشی از میدان های چرخشی می باشد که در زمان های اولیه فاز انتشار در نزدیکی دیوار شکل گرفته و به مرور زمان رشد می کنند و یک ناحیه مرزی با سرعت صفر بین مواد ورودی و مواد سوخته ایجاد می کند.

واژه های کلیدی: احتراق در مقیاس میکرو- رژیم خاموشی- اشتعال مکرر- دو شاخه شدن شعله- شبیه سازی عددی

### ۱- مقدمه

با توجه به اینکه سوخت هیدروژن و سوخت های هیدروکربنی، دانسیته انرژی ۲۰ تا ۵۰ برابر در مقایسه با باتری های الکتروشیمیایی را دارا هستند (۱) و (۲)، استفاده گسترده از وسایل تولید انرژی براساس احتراق در مقیاس میکرو و مزو با استفاده از سوخت های هیدروکربنی و هیدروژن در آینده ای نزدیک پیش بینی می شود. با توجه به نرخ بالای اتلاف حرارت از دیواره ها به واسطه نسبت سطح به حجم بالا در این مقیاس، مدیریت حرارتی برای ایجاد احتراقی پایدار نیاز می باشد. نورتونو و لاکوس پایداری احتراق در کانال های میکرو برای مخلوط های استوکیومتری متان- هوا (۳) و پروپان- هوا (۴) را با استفاده از روش های عددی بررسی نمودند و تاثیر پارامترهایی نظیر رسانش دیوار، ضریب انتقال حرارت خارجی و سرعت ورودی مخلوط سوخت و هوا را بر روی پایداری شعله بررسی کردند. ایشان نشان دادند که هر یک از این متغیرها، حدهای بالا و پایینی برای ایجاد احتراق پایدار دارند که خارج از این محدوده، شعله به حالت خود انتشاری نخواهد رسید. اندرکنش حرارتی قوی بین شعله و دیوار در محفظه های احتراق در مقیاس میکرو و مزو باعث تغییر چشمگیر مشخصه های انتشار شعله در این مقیاس می شود. با توجه به کارهای عددی و آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه، انتشار شعله در کانال های در مقیاس کوچک، باعث ایجاد رژیم های احتراقی متفاوتی می شود. احتراق بدون شعله<sup>۳</sup>، احتراق خاموشی- اشتعال مکرر<sup>۴</sup>، شعله پایا و متقارن<sup>۵</sup>، شعله پایا و نامتقارن<sup>۱</sup> و شعله های لاله ای شکل<sup>۲</sup> از جمله رژیم هایی می باشد که در این مقیاس مشاهده شده است.

<sup>۱</sup>استاد دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup>دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک

<sup>۳</sup>Mild or flameless combustion

<sup>۴</sup>Periodic repetitive ignition/extinction

<sup>۵</sup>Steady symmetry flame

ماروتا و همکاران با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی انتشار شعله متان- هوا و پروپان- هوا را در لوله های مستقیم و U شکل با قطر داخلی ۲ میلیمتر وبا ایجاد گرادیان دمایی معین بر روی سطح خارجی دیوار کانال بررسی نمودند[۵]. ایشان رژیم پایدار در نزدیکی حد شعله وری پایین را شعله ضعیف نامگذاری کردند. علاوه بر این رژیم شعله، ایشان به رژیم های احتراقی متقارن پایا در نزدیکی حد شعله وری بالا و رژیم خاموشی- اشتعال مکرر در بین این دو محدوده پایا اشاره نمودند. رژیم پایای متقارن و رژیم ناپایای خاموشی- اشتعال مکرر در کار آزمایشگاهی ریچکور و کریستیس برای انتشار شعله متان-هوا در کانال های منحنی با قطر داخلی متفاوت از ۱ تا ۴ میلیمتر و عدد رینولدز تا ۱۷۰ نیز مشاهده گردید[۶]. پیزا و همکارانش با استفاده از شبیه سازی عددی مستقیم (DNS)، احتراق مخلوط رقیق هیدروژن- هوا (با نسبت هم ارزی ۰/۵) را در میکرو کانالهای گرم شونده به صورت دو بعدی ([۷]، [۸]) و سه بعدی [۹]، بررسی نمودند. در کار عددی ایشان از سینتیک تفصیلی و روابط نفوذ مولکولی برای محاسبه ضریب نفوذ مولکولی استفاده شده است. هدف اصلی پیزا و همکاران بررسی رژیم های موجود در احتراق در مقیاس میکرو و مزو بوده است. در این کار تاثیر سرعت ورودی و عرض کانال (از ۰/۶ میلیمتر تا ۷ میلیمتر) بر روی رژیم های احتراقی مشاهده گردیده است ایشان رژیم های احتراقی پایای بدون شعله، رژیم خاموشی - اشتعال مکرر و رژیم پایا متقارن، رژیم پایا نامتقارن و همچنین رژیم های گذار نظیر رژیم نوسانی را گزارش نمودند اما در مورد جزئیات و یا علت ایجاد این رژیم ها بحث مفصلی انجام نشده است.

فن و همکاران ([۱۰]-[۱۲]) با توسعه روش های آزمایشگاهی، انتشار شعله و پدیده خاموشی- اشتعال مکرر را برای سوخت متان و هوا در کانال های کوارتز بسیار نازک بررسی کردند. هدف اصلی ایشان، توسعه سیستم های اندازه گیری اپتیکی و مشاهداتی برای انتشار شعله متان و هوا درون کانال های کوارتز خیلی نازک بود. در کار فن و همکاران، حد های شعله وری برای نسبت هم ارزی و سرعت های ورودی مختلف بدست آمد. مطالعات ایشان نشان می دهند حدهای شعله وری برای کانال های نازک تر، باریک تر و برای دماهای دیوار بالاتر پهن تر می شود. نوسات شعله به صورت فرایندی تکراری در کانال های نازک مشاهده گردید و این فرایند در سه مرحله تفسیر گردید. مرحله اشتعال شامل آغازش و انتشارشعله به شکل کروی، مرحله انتشار شامل انتشار شعله در جهت های بالادست و پایین دست جریان و به دنبال آن خاموشی شعله و مرحله شارژ مجدد شامل ورود مخلوط گازی تازه به درون کانال می باشد.

رفتار خاموشی اشتعال مکرر برای شعله در کارهای تحلیلی متفاوتی نیز مشاهده گردیده است. ماروتا و همکاران براساس تحلیل خطی پایا، نوسانات شعله و مشخصه های احتراق پیش آمیخته استوکیومتری متان و هوا را در یک میکرو کانال گرم شونده بررسی نمودند[۱۳]. ماینوف و همکاران [۱۴] رفتار انتشار شعله پیش آمیخته متان و هوا را به صورت تحلیلی با استفاده از معادله یک بعدی و غیرخطی مورد مطالعه قرار دادند. معادلات شامل مدل نفوذ-حرارتی برای انتشار شعله در کانال با گرادیان دما در دیوار می باشد که برخلاف ساده سازی های موجود، این مدل توانایی نشان دادن پدیده روشنی، خاموشی و نوسانات شعله در کار آزمایشگاهی را دارد. جکسون و همکاران [۱۵] برای حل تحلیلی فرایند خاموشی-اشتعال شعله از مدل ریاضیاتی جدیدی شامل معادله دما برای فاز گازی، واکنش تک مرحله ای و همچنین معادله دما در جهت محوری برای دیوار استفاده کردند. با توجه به کارهای تحلیلی اشاره شده پدیده خاموشی اشتعال مکرر با تقریب ساده کننده و قابل قبولی نشان داده شده است. اما در هیچ یک از کارهای فوق الذکر اشاره ای در مورد جزئیات و قابلیت این روش ها برای بیان جزئیات این پدیده نشده است.

کردیمف و همکاران [۱۶]، دینامیک شعله های پیش مخلوط با عدد لوئیس واحد در کانال های دو بعدی با دمای دیوار ثابت را توسط شبیه سازی عددی براساس مدل نفوذ- حرارتی و شیمی یک مرحله ای توسعه دادند. در کار ایشان تاثیر ارتفاع کانال، دمای دیوار و سرعت ورودی بر روی پایداری و دینامیک شعله بررسی گردید. ایشان بیان نمودند که این مدل ساده شده توانایی نشان دادن بسیاری از دینامیک های احتراقی را دارد. در یک مطالعه عددی [۱۷]، ناکامورا و همکاران جزئیات رفتار

<sup>1</sup>Asymmetric steady flame

<sup>2</sup>Tulip flame

پدیده خاموشی-اشتعال مکرر را برای مخلوط استوکیومتری متان-هوا در یک کانال تحت گرادیان معین را بررسی کردند. ایشان مشاهده نمودند که برای سوخت متان و هوا، دوشاخه شدن، دوبار اتفاق می افتد. اولین دو شاخه شدن شعله، هنگام انتشار شعله اتفاق می افتد. سوخت متان به طور کامل در قله اصلی مصرف می شود در حالیکه CO در محدوده گسترده ای پشت قله اصلی بدون واکنش باقی می ماند. هنگامی که واکنش ها ضعیف می شوند. قله اصلی به دو شاخه تبدیل می شود که ناشی از حضور گونه های میانی نظیر  $CO$ ،  $CH_3$ ،  $H$  و  $OH$  در پایین دست جریان می باشد. در این کار برای شبیه سازی مخلوط استوکیومتری متان- هوا از مدل یک بعدی بر مبنای مدل نفوذ حرارت استفاده شده است. از شرایط دیگر شبیه سازی، استفاده از سینتیک تفصیلی و در نظر گرفتن ضرایب مولکولی مختلف می باشد. این کار، تنها کار موجود در زمینه بررسی جزئیات رفتار خاموشی اشتعال مکرر می باشد. با توجه به ارزنده بودن کار کردیمف و همکاران، نقطه ضعف اصلی این کار یک بعدی بودن شبیه سازی آن می باشد که امکان بررسی پدیده های ایجاد شده در بعد های دیگر (نظیر علت جدایش شعله) را غیر ممکن می سازد.

با توجه به تحقیقات انجام شده، مشاهده می شود که یکی از رژیم های اصلی احتراق در مقیاس میکرو، رژیم خاموشی- اشتعال مکرر می باشد که در کارهای مختلف آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی به آن اشاره شده است. اما تنها در مرجع [۱۷] به فیزیک حاکم و عوامل ایجاد این پدیده پرداخته شده است. با توجه به ساده سازی در نظر گرفته شده در مرجع [۱۷] اولین هدف، شبیه سازی این پدیده با جزئیات بیشتر می باشد. این جزئیات شامل در نظر گرفتن معادلات بقای شامل بقا جرم، مومنتوم، انرژی و گونه ها، سینتیک تفصیلی و ضرایب نفوذ مولکولی مختلف برای گونه های مختلف در شبیه سازی می باشد. همچنین شبیه سازی پدیده خاموشی- اشتعال مکرر به صورت دو بعدی انجام می شود. از سوی دیگر علیرغم اهمیت سوخت هیدروژن و با توجه به اینکه تاکنون کار جامعی در مورد جزئیات پدیده خاموشی اشتعال مکرر در زمینه سوخت هیدروژن انجام نشده است، هدف بعدی این کار استفاده از سوخت هیدروژن می باشد. برای این کار، یک کانال با عرض ۱ میلیمتر در نظر گرفته می شود که مخلوط هیدروژن-هوا به درون آن تزریق می شود. از فرمولبندی عدد ماخ پایین و سینتیک تفصیلی به همراه ضرایب نفوذ مولکولی متفاوت برای گونه های گوناگون در شبیه سازی استفاده می شود. جزئیات پدیده خاموشی و اشتعال شعله به صورت کلی توسط کانتورهای کسر جرمی گونه  $OH$  به عنوان گونه فعال در ناحیه واکنش بیان می شود و در مرحله بعد با استفاده از نمودارهای کسر مولی سوخت و اکسید کننده، نرخ آزاد شدن حرارت و کسر مولی گونه های  $OH$  و  $H_2O$ ، جزئیات این پدیده بررسی می شود. در بخش انتهایی، دو شاخه شدن جبهه شعله با استفاده از کانتورهای سرعت مطالعه می شود.

## ۲- معادلات حاکم

در کار حاضر، برای شبیه سازی احتراق در مقیاس کوچک، معادلات نویر استوکس به همراه معادله بقای انرژی و معادلات بقای گونه ها با استفاده از فرمول بندی عدد ماخ پایین حل می شوند [۹]. با توجه به آزاد شدن حرارت ناشی از واکنش های شیمیایی، دانسیته سیال به طور قابل توجهی تغییر می کند که باعث ایجاد امواج اکوستیک در دامنه حل می شود. حل این معادلات به شکل تراکم پذیر باعث ایجاد مشکل در حل عددی می شود و همچنین نیاز به شرایط مرزی خصوصی برای جلوگیری از دخالت امواج در حل دارد [۱۸]. برای غلبه بر این مشکل استفاده از تقریب عدد ماخ پایین برای جریان های واکنشی پیشنهاد شده است [۱۹]. در این روش جمله مربوط به فشار به صورت مجموع دو ترم که فشار ترمودینامیکی ( $p_t$ ) و فشار هیدرودینامیکی ( $p_H$ ) نامیده می شوند، بیان می شود. بنابراین معادلات بقا در دیدگاه عدد ماخ پایین به صورت زیر بیان می شود.

بقای جرم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad (1)$$

بقای مومنتوم

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = - \nabla p_d + \nabla \cdot \mu S \quad (2)$$

در این روابط  $\mu$ ،  $u$ ، به ترتیب دانسیته، بردار سرعت و ویسکوزیته دینامیکی می باشند. تانسور تنش ( $S$ ) به صورت  $\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot u I$  بیان می شود که  $I$  ماتریس واحد است.

معادله انرژی در سیال

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = \nabla \cdot \lambda \nabla T - \sum_{i=1}^{N_g} \nabla_i \dot{\omega}_i - \rho \sum_{i=1}^{N_g} c_{p,i} Y_i V_i \cdot \nabla T \quad (3)$$

در این رابطه  $\lambda$  رسانش حرارتی مخلوط و  $c_{p,i}$  و  $h_i$  به ترتیب ظرفیت حرارتی و انتالپی گونه  $i$  ام می باشند. با توجه به آنچه که در بالا گفته شد می توان بیان نمود که در جریان های با عدد ماخ پایین  $\hat{p}_d$ ،  $\hat{p}_t$  پس معادله حالت گاز کامل به شکل زیر نوشته می شود:

$$p_t = \rho \frac{R}{W} T \quad (4)$$

$\bar{W}$  وزن مولکولی میانگین مخلوط،  $R$  ثابت گاز ایده آل می باشد.

معادله بقا جرم برای گونه  $i$

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + u \cdot \nabla Y_i = - \nabla \cdot (\rho Y_i V_i) + \dot{\omega}_i \quad (5)$$

در این رابطه  $\dot{\omega}_i$  نرخ تشکیل و یا از بین رفتن گونه شیمیایی  $i$  در اثر واکنشها، و  $Y_i$ ،  $V_i$  به ترتیب کسر جرمی و بردار سرعت نفوذی می باشد.

سرعت نفوذ گونه ها  $V_i$  به صورت زیر محاسبه می شود.

$$V_i = V_i^{\square} + V_c \quad (6)$$

که  $V_i^{\square}$  از تئوری سینتیک گازها بدست می آید.  $V_c$  به عنوان تصحیح کننده بقای جرم کل بیان می شود [۹].

$$V_c = - \sum_{i=1}^{N_g} Y_i V_i^{\square}, V_i^{\square} = - \left( \frac{D_{mi}}{X_i} \right) \nabla X_i \quad (7)$$

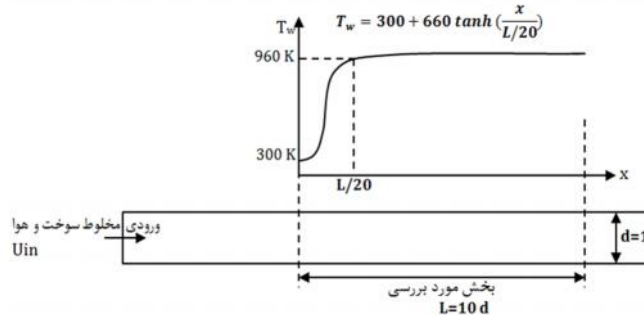
$D_{mi}$ ، نفوذ گونه ها و  $X_i = Y_i W/W_i$  کسر مولی می باشد.

### ۳- روش حل عددی و شرایط مرزی

یکی از هندسه های متداول در احتراق های در مقیاس میکرو، میکرو کانال گرم شونده است [۱۷]. در این هندسه بخشی از کانال به عنوان بخش مورد آزمایش<sup>۱</sup> در نظر گرفته می شود و دمای دیواره های آن با استفاده از منبع خارجی افزایش داده می شود. عرض کانال یک میلیمتر و طول کانال ۱۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. که ۱۰ میلیمتر انتهای کانال به عنوان بخش مورد بررسی در نظر گرفته شده است و توزیع دمای نشان داده شده در بر روی آن قرار گرفته است بطوریکه بر روی ۱/۲۰ ابتدای طول بخش مورد بررسی کانال، توزیع دما به صورت تانژانت هایپربولیک از دمای ورودی ( $T_{in}=300$  K) تا دمای ۹۶۰ کلوین و بعد از آن دمای ثابت ۹۶۰ کلوین می باشد. در کار حاضر برای این توزیع دما از مرجع [۸] استفاده شده است. مخلوط هیدروژن و هوا با نسبت هم ارزی ۰/۵ از یک سمت کانال وارد می شود. جریان ورودی به کانال با دمای ۳۰۰ کلوین و توزیع یکنواخت برای سرعت در نظر گرفته شده است. شرط عدم لغزش برای سرعت ( $u=0$ ) و مقدار گرادیان نرمال صفر برای گونه ها ( $\frac{du}{dn} = 0$ ) بر روی دیوار تنظیم می شود. برای خروجی نیز مقدار گرادیان نرمال صفر )

<sup>1</sup>Test section

ای و ۲۷ واکنشی یتر و همکاران [۲۰] و برای محاسبه ضرایب نفوذ مولکولی از اطلاعات انتقال مولکولی نرم افزار کمکین [۲۱] استفاده شده است.



شکل ۱- طرحواره مسئله مورد بررسی به همراه توزیع دمای دیوار [۸]

روش پیشنهادی برای محاسبه تعداد سلول مورد نیاز برای شبیه سازی استفاده از تعریف ضخامت شعله آرام می باشد. براساس مرجع [۸] ضخامت شعله آرام برای مخلوط هیدروژن و هوا با نسبت هم ارزی ۰/۵ مقدار ۰.۳۹mm محاسبه می شود. براساس پیشنهاد مرجع [۷]، ۱۵ سلول در ضخامت شعله برای شبیه سازی شعله مناسب می باشد. بنابراین اندازه هر سلول ۲۵ میکرومتر در ۲۵ میکرومتر محاسبه میشود. برای حل مسئله، از بسته نرم افزاری منبع باز OpenFOAM و از حلگر ReactingFoam برای شبیه سازی جریان های واکنشی استفاده می شود که البته با توجه به نیازهای مسئله حاضر تغییراتی در آن داده شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

نتایج کار حاضر در دو بخش ارائه می شود. در ابتدا دینامیک های شعله برای مخلوط رقیق هیدروژن - هوا در میکرو کانال گرم شونده بررسی و با نتایج حاصل از شبیه سازی عددی مستقیم پیزا همکاران [۸] اعتبار سنجی می شود. در بخش دوم، پدیده خاموشی-اشتعال مکرر به عنوان یکی از دینامیک های شعله در کانال های در مقیاس میکرو به صورت جزئی بررسی می شود. ابتدا دینامیک کلی این پدیده با استفاده از کانتورهای کسر جرمی گونه OH به عنوان گونه فعال در ناحیه واکنش بررسی می شود. در گام بعدی تغییرات ساختار شعله با جزئیات بیشتری بیان می شود. در مرجع [۱۷] برای بررسی جزئیات پدیده خاموشی- اشتعال مکرر از نمودار های نرخ آزاد شدن حرارت، سوخت، اکسید کننده، دما و گونه های CO و CO<sub>2</sub> استفاده می شود. از همین رو برای بررسی پدیده خاموشی اشتعال مکرر در سوخت هیدروژن، نمودارهای نرخ آزاد شدن حرارت، دما، هیدروژن، اکسیژن و گونه های OH و H<sub>2</sub>O پیشنهاد داده می شود و پدیده حاضر با استفاده از نمودار این متغیر ها بر روی محور تقارن کانال تفسیر خواهد شد. در ادامه دو شاخه شدن شعله از دیدگاه هیدرودینامیکی بررسی می شود.

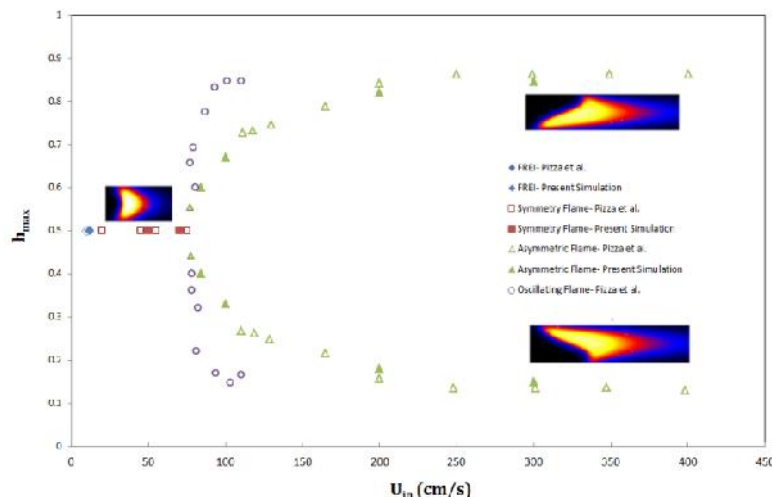
#### ۴-۱- دینامیک شعله در احتراق مقیاس میکرو

یکی از هندسه های متداول برای بررسی اصول احتراق در مقیاس میکرو، میکرو کانال گرم شده می باشد. که در کارهای مختلفی از جمله مراجع ([۹]، [۱۷]، [۲۲]) مطرح و مورد استفاده قرار گرفته است. یک محفظه با قطر داخلی در مقیاس میکرو و مزو که توسط منبع حرارت خارجی گرم می شود، باعث ایجاد یک افزایش نسبی دما در جهت کانال می شود. برای بررسی رژیم خاموشی- اشتعال مکرر، یک کانال با عرض یک میلیمتر در نظر گرفته شده است و مخلوط رقیق هیدروژن و هوا با نسبت هم ارزی ۰/۵ به درون کانال وارد می شود. پاسخ شعله رقیق هیدروژن-هوا (با نسبت هم ارزی ۰/۵) به تغییرات سرعت ورودی را نشان می دهد. برای بیان انواع مختلف شعله از متغیر h<sub>max</sub> براساس مرجع [۸] استفاده می شود.

براساس این مرجع، سطح هم تراز نصف مقدار سرعت ورودی به عنوان جبهه شعله تعریف می شود. فاصله دورترین نقطه جبهه شعله از ورودی، نوک شعله نامیده می شود. فاصله نوک شعله تا صفحه پایینی مقدار  $h_{max}$  قرارداد می شود که توسط عرض کانال بی بعد گردیده است. با توجه به اینکه مقدار کسر جرمی ورودی برای هیدروژن مقدار  $0.1415$  می باشد نصف این مقدار ( $0.07$ ) به عنوان سطح جبهه شعله در نظر گرفته می شود. بنابراین در شعله های متقارن دورترین نقطه سطح هم تراز کسر جرمی هیدروژن بر روی صفحه میانی قرار می گیرند بنابراین  $h_{max}$  مقدار  $0.5$  را خواهد داشت و برای شعله های نامتقارن این مقدار به دیوار بالا و پایین (مقادیر  $0$  و  $1$ ) متمایل می شوند.

در سرعت های پایین، رژیم خاموشی اشتعال مکرر FREI مشاهده می شود. جریان واکنشی تحت تاثیر دمای دیوار محترق می شود اما به واسطه اتلاف حرارت، نرخ واکنش به شدت کاهش می یابد و این پدیده به صورت تناوبی تکرار می شود. در سرعت های میانی حد شعله وری، شعله های متقارن و پایا مشاهده می شود. در نزدیکی حد شعله وری بالا، شعله های متقارن تحت تاثیر اغتشاشات موجود در میدان جریان ناپایدار شده و مجدداً به شکل نامتقارن پایدار می شوند. پتچنکو و سای علت تشکیل این پدیده را به ناپایداری هیدرودینامیکی لاند-داریوس نسبت دادند ([۱۴] و [۲۱]). اما در مرور مقالات توسط لیبرمن و بیچکف بیان شده است که ناپایداری های هیدرودینامیکی برای شعله های واقعی هنگامی وجود دارد که عرض لوله (کانال) در حدود دو مرتبه بزرگی، بزرگتر از ضخامت شعله محاسبه شده باشد. از آنجایی که عرض لوله در احتراق های کوچک هم مرتبه با ضخامت شعله می باشد بنابراین ادعا شده است که این نوع ناپایداری در کاربردهای میکرو و مزو آشکار نمی شود ([۷]، [۸]). پیزا و همکاران علت این پدیده را ناپایداری نفوذ حرارتی بیان نمودند. با توجه به نفوذ های حرارتی مختلف برای گونه ها، گونه ها با سرعت های نفوذ مختلف حرکت خواهند کرد و این عامل باعث ناپایدار شدن جبهه شعله می شود.

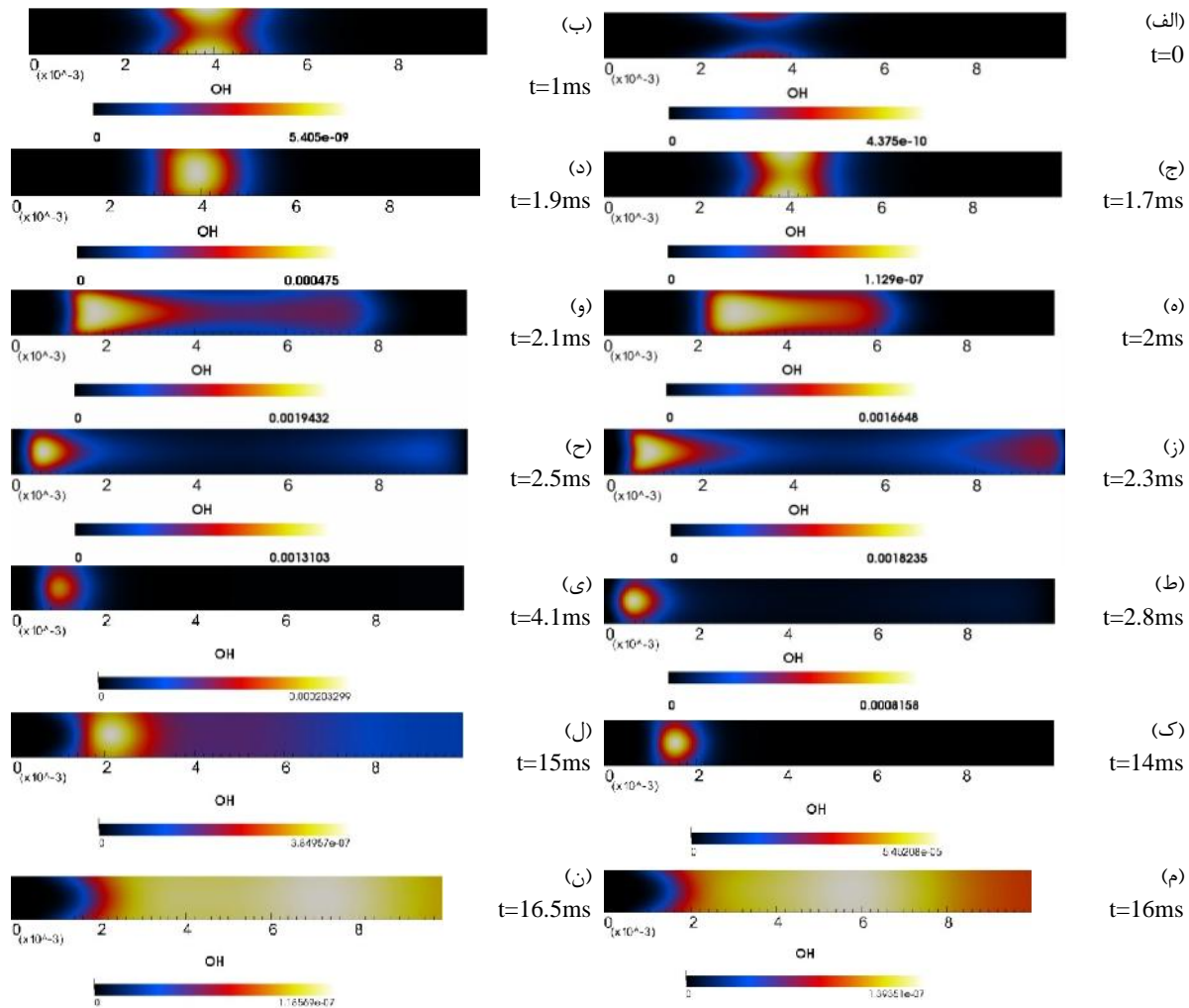
در شکل ۲ مقایسه ای بین نتایج شبیه سازی حاضر و شبیه سازی مستقیم توسط پیزا و همکاران [۸] انجام شده است. نشان های توپر، بیانگر شبیه سازی حاضر و نشان های تو خالی، بیانگر شبیه سازی پیزا و همکاران [۸] می باشد. رژیم های خاموشی-اشتعال مکرر، پایای متقارن و پایای نامتقارن به خوبی منطبق می باشند. اما در شبیه سازی حاضر رژیم نوسانی مشاهده نشده است که می توان علت آن را دو موضوع بیان نمود. رژیم نوسانی، رژیمی ناپایا می باشد که در ناحیه انتقال شعله بین رژیم متقارن و رژیم نامتقارن اتفاق می افتد. شبیه سازی پیزا و همکاران به صورت مستقیم DNS انجام شده که با این شبیه سازی می توان جزئیات بیشتری را برای شعله مشاهده نمود در حالیکه کار حاضر چنین ادعایی ندارد. علت دوم براساس مرجع [۸] می باشد. پیزا و همکاران اشاره می کنند که با در نظر گرفتن پروفیل توسعه یافته برای توزیع سرعت در ورودی کانال، چنین رژیمی مشاهده نشده است. در کار حاضر نیز با در نظر گرفتن طول ورودی برای کانال، جریانی توسعه یافته وارد بخش مورد آزمایش می شود که با بیان مرجع [۸] مطابقت دارد.



شکل ۲- پاسخ شعله رقیق هیدروژن-هوا ( $\Phi=0.5$ ) در یک کانال گرم شده به سرعت ورودی

#### ۴-۲- دینامیک پدیده خاموشی اشتعال مکرر

کسر جرمی رادیکال OH برای رژیم خاموشی اشتعال مکرر در سرعت ورودی 10 cm/s در زمان های مختلف نشان داده شده است. با توجه به اینکه رادیکال OH یکی از رادیکال های فعال در فرایند احتراق می باشد به عنوان نشان دهنده جبهه شعله در نظر گرفته می شود [۷].



شکل ۳- کانتور کسر جرمی رادیکال OH در زمان های مختلف در رژیم خاموشی - اشتعال مکرر

با توجه به دمای دیوار، دمای جریان ورودی (۳۰۰ کلوین) افزایش می یابد. هنگامی که دمای جریان به دمای دیوار می رسد واکنش ها از همان نقطه آغاز می گردد. این آغازش به عنوان جرقه برای جریان عمل کرده و با مصرف سوخت ورودی رشد می کند. اما همچنان ماکزیمم مقدار رادیکال OH به علت دمای بالاتر دیوار نسبت به جریان در نزدیکی دیوار باقی می ماند. با شدت گرفتن واکنش های شیمیایی و بالاتر رفتن دمای جریان، ماکزیمم مقدار رادیکال OH به سمت محور تقارن حرکت می کند. در این حالت توزیع رادیکال OH به صورت دایره ای (کروی) می باشد. این توزیع به سمت پایین دست و بالا دست جریان حرکت می کند و در طول کانال گسترش می یابد و ناحیه واکنشی گسترده ای در طول کانال مشاهده می شود.

بخشی از شعله که به سمت پایین دست جریان حرکت می کند گازهای نسوخته در بخش پایین دست جریان را مصرف می کند و بخش دیگر از شعله که به سمت بالا دست جریان حرکت می کند گازهای تازه نسوخته را مصرف می کند. به همین علت، شدت واکنش در جبهه شعله ای که به سمت بالا دست جریان حرکت می کند بیشتر از شدت واکنش جبهه شعله ای می باشد که به سمت پایین دست جریان حرکت می کند. با حرکت جبهه های شعله به سمت پایین دست جریان و بالادست جریان، جدایشی بین ناحیه واکنشی ایجاد می شود. بخش پایین دست جریان شعله به علت نبود سوخت به سرعت ضعیف می شود اما شعله در بالا دست جریان، از آنجایی که سوخت تازه وارد می شود مقاومت بیشتری دارد اما از طرفی تحت تاثیر دمای پایین جریان ورودی قرار می گیرد و با گذشت زمان تضعیف می شود. تا هنگامی که سرعت جریان ورودی بر سرعت انتشاری شعله غلبه می کند و جبهه شعله را به سمت پایین دست جریان منتقل می کند و جهت جریان ورودی باعث خارج شدن جبهه شعله از کانال می شود. بعد از گرم شدن مجدد جریان سیکل بعدی آغاز می گردد.

### ۳-۴- تغییرات ساختار شعله

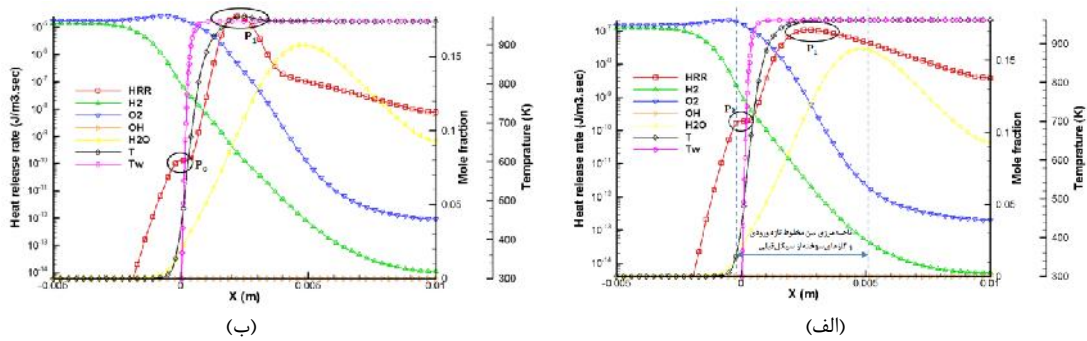
برای بیان تغییرات ساختار شعله در پدیده خاموشی اشتعال مکرر، از دسته بندی انجام شده در مرجع [۱۷] استفاده می شود. در این مرجع تغییرات ساختار شعله به پنج فاز شامل فاز آغازش، فاز اشتعال، فاز انتشار، فاز واکنش های ضعیف و فاز جریان تقسیم شده است. پروفیل های دما، نرخ آزاد شدن حرارت (HRR)، کسر مولی گونه های  $H_2$  به عنوان سوخت،  $O_2$  به عنوان اکسید کننده و  $OH$  و  $H_2O$  به عنوان گونه میانی بر روی محور تقارن کانال در نظر گرفته شده اند. محور عمودی برای HRR در مقیاس لگاریتمی و سایر محورها در مقیاس خطی هستند. سیکل سوم فرایند خاموشی- اشتعال برای بررسی در نظر گرفته شده است. در سیکل اول به علت عدم شبیه سازی دقیق فرایند اشتعال، تغییرات متغیرها با سیکل های دیگر همخوانی ندارد و از سیکل دوم فرایند خاموشی- اشتعال با دوره های منظم آغاز می شود. بنابراین با توجه به لحاظ کردن تاثیر سیکل قبلی، سیکل سوم در نظر گرفته می شود و زمان مبنای  $t=0$  برای آغاز سیکل سوم انتخاب می شود.

#### ۱-۳-۴- فاز آغازش<sup>۱</sup>

در زمان  $t=0$  ms یک ناحیه مرزی بین مخلوط های تازه ورودی و گازهای سوخته از سیکل قبلی FREI همانطور که در شکل مشاهده می شود، وجود دارد. در این ناحیه کسر مولی سوخت و اکسید کننده از مقدار بیشینه خود به مقدار کمینه خود می رسد در حالی که محصولات (نظیر گونه  $H_2O$ ) رفتاری معکوس را دارند. برای گونه  $H_2O$  یک قله مشاهده می شود که این قله در نزدیکی قله HRR می باشد که این بدین معنی است که در این ناحیه واکنش های کامل تری انجام شده است و  $H_2O$  بیشتری تولید شده است. با توجه به کاهش مقدار نرخ آزاد شدن حرارت در ناحیه بعد از شعله، واکنش های کمتری انجام خواهد شد و سوخت و اکسید کننده بدون واکنش از کانال خارج می شوند که کاهش مقدار  $H_2O$  نیز موبد همین موضوع می باشد. در این ناحیه دو قله برای نرخ آزاد شدن حرارت مشاهده می شود که مقدار بزرگتر  $P_1$  در میانه ناحیه مرزی و مقدار کوچکتر  $P_0$  در نزدیکی مرز در سمت بالادست جریان قرار دارد. نکته قابل توجه این است که قله های مشاهده شده مربوط به سیکل قبلی می باشند که با توجه به مقدار کم نرخ آزاد شدن حرارت می توان به این موضوع پی برد. پروفیل دما بر روی محور تقارن کانال نیز مطابق با پروفیل دمای تعیین شده بر روی دیوار می باشد که می توان گفت که دمای جریان تحت تاثیر دمای دیوار قرار دارد.

<sup>1</sup>Initiation phase



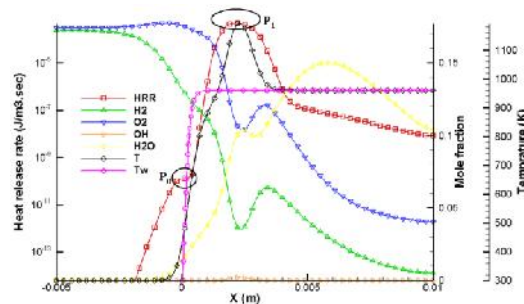


شکل ۴- پروفیل دما، نرخ آزاد شدن حرارت (HRR)، کسر مولی گونه های  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $OH$  و  $H_2O$  بر روی محور تقارن کانال در زمانهای  $t=0ms$  (الف) و  $t=2ms$  (ب)

با گذشت زمان، از زمان  $t=0ms$  تا زمان  $t=2ms$  مقدار قله  $P_1$  افزایش می یابد که نشان دهنده آغاز واکنش های شیمیایی درون محفظه می باشد و به دنبال آن دمای جریان افزایش می یابد. بطوریکه برای پروفیل دمای جریان بر روی محور تقارن یک قله مشاهده می شود. با مقایسه مکان قله  $P_1$  در زمان های  $t=0ms$  و  $t=2ms$  مشاهده می شود که در زمان  $t=2ms$  مکان قله به سمت مخلوط تازه ورودی حرکت می کند اما با توجه به کم بودن نرخ آزاد شدن حرارت همچنان تغییر محسوسی در پروفیل مربوط به سوخت و اکسیده کننده مشاهده نمی شود. حرکت قله  $P_1$  باعث می شود که بر روی قله  $P_0$  تاثیر بگذارد و مقدار آن را کمی کاهش دهد.

#### ۲-۳-۴- فاز اشتعال<sup>۱</sup>

شکل ۵ پروفیل دما، نرخ آزاد شدن حرارت (HRR)، کسر مولی گونه های  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $OH$  و  $H_2O$  در زمان  $t=2.1ms$  بر روی محور تقارن کانال را نشان می دهد. با مقایسه مشاهده می شود که در مدت زمان اندکی، مقدار قله  $P_1$  در زمان  $t=2.1ms$  بطور مشخصی بزرگتر از مقدار آن در زمان  $t=2ms$  می شود. در حالیکه مقدار  $P_0$  تقریباً ثابت باقی می ماند. با افزایش مقدار HRR در مکان  $P_1$ ، دمای جریان بر روی محور تقارن کانال تا ۱۱۹۳ کلوین می رسد. وجود مقدار کمینه در پروفیل کسر مولی هیدروژن و اکسیژن در این ناحیه، نشان دهنده مصرف مواد اولیه و ایجاد محصولات می باشند به همین علت پروفیل مربوط به کسر مولی گونه های  $OH$  و  $H_2O$  دارای قله در مکان  $P_1$  هستند. نکته قابل توجه در پروفیل کسر مولی گونه های  $H_2$  و  $O_2$  این است که در بخش پایین دست ناحیه مرزی مقدار قابل توجهی هیدروژن و اکسیژن وجود دارد.



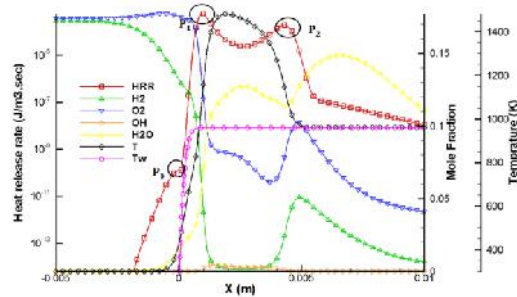
شکل ۵- پروفیل دما، نرخ آزاد شدن حرارت (HRR)، کسر مولی گونه های  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $OH$  و  $H_2O$  بر روی محور تقارن کانال در زمان  $t=2.1ms$

#### ۳-۳-۴- فاز انتشار<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> Ignition Phase

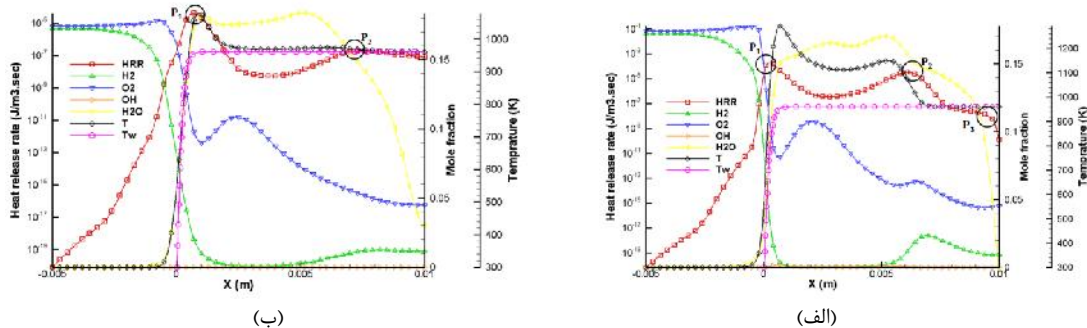
<sup>۲</sup> Propagation Phase

مشاهده می شود که قله HRR به دو بخش تقسیم می شود و قله دیگری ( $P_2$ ) ظاهر می شود با توجه به وجود مخلوط هیدروژن و هوا در پایین دست جریان، قله  $P_2$  به سمت پایین دست جریان حرکت می کند و مخلوط هیدروژن و هوای موجود در این ناحیه را مصرف می کند.  $P_1$  به سمت بالا دست جریان حرکت می کند و واکنش دهنده های درون مخلوط تازه ورودی را مصرف می کند به همین علت مقدار قله  $P_1$  بیشتر از مقدار قله  $P_2$  می باشد و با توجه به وجود سوخت و اکسید کننده بیشتر در نزدیکی قله  $P_1$  واکنش ها سریعتر انجام شده و قله  $P_1$  تیز تر می باشد.



شکل ۶- پروفیل دما، نرخ آزاد شدن حرارت (HRR)، کسر مولی گونه های  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $OH$  و  $H_2O$  بر روی محور تقارن کانال در زمان  $t=2.2ms$

با توجه به دوشاخه شدن پروفیل HRR، پروفیل دما همچنان دارای یک قله می باشد و دمای جریان تا دمای 1460 کلوین می رسد. در ناحیه بین  $P_1$  و  $P_2$  مقدار هیدروژن بسیار کاهش می یابد و این بدین معنی است که تمامی سوخت در حال مصرف شدن می باشد. پروفیل کسر مولی گونه  $OH$  نیز به سمت بالادست جریان و پایین دست جریان کشیده می شود.



شکل ۷- پروفیل دما، نرخ آزاد شدن حرارت (HRR)، کسر مولی گونه های  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $OH$  و  $H_2O$  بر روی محور تقارن کانال در زمان های  $t=2.7ms$  (الف) و  $t=4.1ms$  (ب)

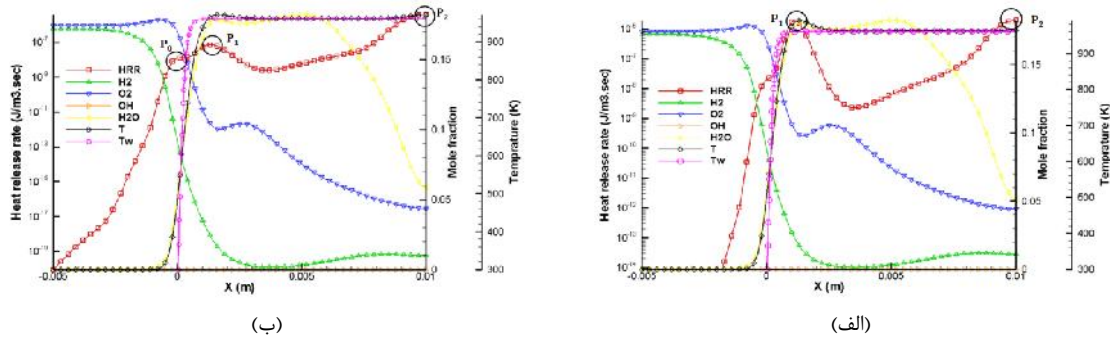
با مقایسه شکل ها از زمان  $t=2.1ms$  تا زمان  $t=2.7ms$  مشاهده می شود که  $P_2$  به سرعت به پایین دست جریان منتقل می شود.  $P_1$  نیز به سمت بالادست جریان حرکت می کند و باعث ناپدید شدن  $P_0$  می شود در ناحیه بین دو قله  $P_1$  و  $P_2$ ، هیدروژن به طور کامل مصرف می شود در حالیکه مقدار مشخصی از  $O_2$  بدون واکنش همچنان باقی می ماند. با مقایسه شکل های ۷-الف و ۷-ب مشاهده می شود که مقدار قله ها با گذشت زمان کاهش می یابد که این افت در نزدیکی قله  $P_2$  بیشتر از  $P_1$  می باشد.

#### ۴-۳-۴ فاز واکنش های ضعیف<sup>۱</sup>

با توجه به شکل های ۸-الف و ۸-ب مشاهده می شود که با گذشت زمان نرخ آزاد شدن حرارت کاهش می یابد به همین دلیل این فاز، فاز واکنش های ضعیف نامیده می شود. قله  $P_2$  به انتهای کانال می رسد و مقدار باقیمانده سوخت را مصرف می کند. با گذشت زمان از  $t=4.8ms$  تا  $t=5.2ms$  مشاهده می شود که افت قله  $P_1$  سریعتر از  $P_2$  می باشد. قله  $P_1$  به سمت پایین دست جریان حرکت می کند و با حرکت قله  $P_1$ ، قله  $P_0$  ایجاد می شود. با ضعیف شدن واکنش

<sup>1</sup> Weak reaction Phase

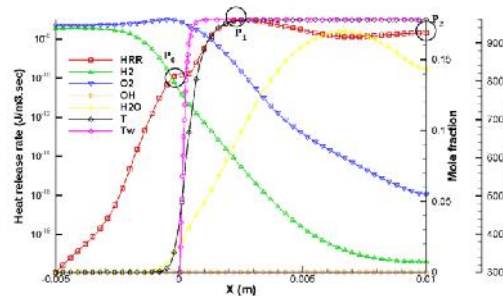
ها، مشاهده می شود که سطح هیدروژن و اکسیژن در ناحیه بین دو قله  $P_1$  و  $P_2$  افزایش می یابد. دمای جریان نیز کاهش می یابد و به توزیع دمای دیوار نزدیک می شود.



شکل ۸- پروفیل دما، نرخ آزاد شدن حرارت (HRR)، کسر مولی گونه های  $H_2$ ،  $O_2$ ،  $OH$  و  $H_2O$  بر روی محور تقارن کانال در زمان های  $t=4.8ms$  (ب) و  $t=5.2ms$  (الف)

### ۳-۴- فاز جریان<sup>۱</sup>

با توجه به مشاهده می شود مقدار قله های  $P_0$ ،  $P_1$  و  $P_2$  کاهش می یابد و دمای فاز گازی تحت تاثیر دمای دیوار قرار دارد.  $P_1$  به آرامی به سمت پایین دست جریان منتقل می شود. و مخلوط سوخت و هوا با نرخ آزاد شدن کمی به سمت خروجی کانال جریان می یابد.

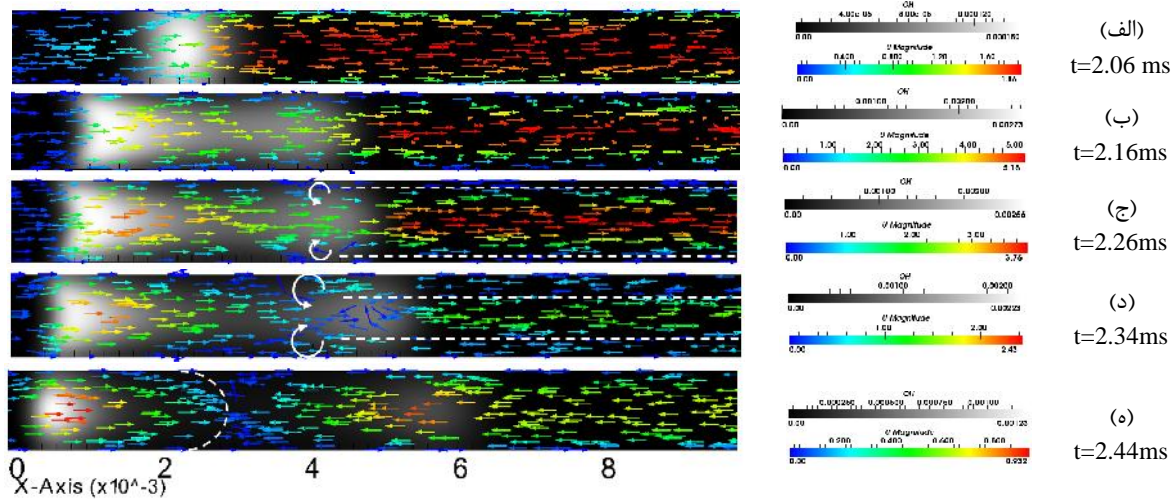


شکل ۹- پروفیل دما، نرخ آزاد شدن حرارت (HRR)، کسر مولی گونه های  $H_2$ ،  $O_2$ ،  $OH$  و  $H_2O$  بر روی محور تقارن کانال در زمان  $t=12.6ms$

### ۴-۴- دو شاخه شدن جبهه شعله

هدف از این بخش بررسی جزئیات دو شاخه شدن شعله در پدیده خاموشی اشتعال مکرر می باشد. برای بررسی این پدیده بردارهای سرعت بر روی کانتور رادیکال  $OH$  در زمان های مختلف قرار داده شده است. در زمان اولیه تشکیل شعله ( $t=2.06ms$ ) مشاهده می شود که بردارهای سرعت در جهت جریان ورودی و مثبت می باشند. این حالت تا هنگامی که شعله در طول کانال گسترش می یابد حفظ می شود. در زمان  $t=2.26ms$ ، هنگامی که سطح مقطع شعله کاهش می یابد تا جدایش بین دو جبهه آغاز شود، مشاهده می شود که یک جریان در خلاف جهت در نزدیکی دیوار شکل می گیرد که مرز آن در شکل با خط چین سفید نشان داده شده است که این مرز نشان دهنده سرعت صفر می باشد. این جریان در جهت مخالف باعث می شود که در ناحیه جبهه شعله چرخشی ایجاد شود که تقابل بین سرعت جریان و جریان برگشتی را نشان می دهد. با گذشت زمان این ناحیه چرخشی رشد می کند تا هنگامی که دو جریان در جهت مخالف بهم می رسند و سپس به سمت بالا دست جریان حرکت می کنند خط چین سفید نشان داده در شکل بیانگر مرز بین دو ناحیه با جریان های در جهت های مخالف می باشد. این تقابل تا هنگامی که سرعت جریان ورودی بر آن غلبه کند و مجدداً آن را به سمت عقب براند ادامه خواهد داشت.

<sup>1</sup> Flowing Phase



شکل ۱۰- نمایش کانتورهای OH به همراه بردارهای سرعت جریان

## ۵- نتیجه گیری

در کار حاضر جزئیات فرایند خاموشی- اشتعال مکرر در یک کانال با قطر داخلی ۱ میلیمتر تحت گرادیان دمایی معینی به صورت عددی برای مخلوط رقیق هیدروژن-هوا (با نسبت هم ارزی ۰/۵) بررسی گردید. فرایند خاموشی- اشتعال مکرر با استفاده از کانتورهای رادیکال OH به عنوان گونه فعال در ناحیه واکنش مطالعه و مشاهده گردید که جریان در نزدیکی دیوار و تحت تاثیر دمای دیوار مشتعل و شعله به سمت بالادست و پایین دست جریان کشیده می شود تا هنگامی که شعله به دو بخش تقسیم می شود. قسمتی از شعله که به سمت بالا دست جریان منتشر می شود مواد نسوخته ورودی را مصرف می کند و قسمتی که به سمت پایین دست حرکت می کند مواد نسوخته در بخش محصولات را مصرف می کند. با استفاده از پیشنهاد مرجع [۱۷] این فرایند به ۵ فاز تفکیک شده است. که فازهای آغازش، اشتعال، انتشار، واکنش های ضعیف و جریان نامگذاری شده اند. در فاز آغازش دو قله برای نرخ آزاد شدن حرارت HRR مشاهده می شود و با توجه به کم بودن مقدار نرخ آزاد شدن حرارت، دمای جریان تحت تاثیر دمای دیوار قرار دارد. در فاز اشتعال یکی از قله ها شدت بیشتری می یابد و باعث افزایش دمای میدان جریان می شود. در فاز انتشار قله رشد یافته به دو بخش تقسیم می شود و به سمت بالادست جریان و پایین دست جریان منتشر می شوند. بطوریکه در فاز واکنش های ضعیف سه قله برای نرخ آزاد شدن حرارت وجود خواهد داشت. در فازهای آغازش و اشتعال، مقدار قابل توجهی سوخت در پایین دست جریان وجود دارد که در فاز انتشار با دو شاخه شدن شعله این مقدار سوخت کاملاً مصرف می شود. در فاز جریان شدت واکنش ها افت می کند و کانال مجدداً از مخلوط سوخت و هوا پر می شود. با بررسی میدان جریان مشاهده گردید که دو شاخه شدن شعله ناشی از میدان های چرخشی می باشد که در زمان های اولیه در نزدیکی دیوار شکل گرفته و به مرور زمان رشد می کنند و یک ناحیه مرزی با سرعت صفر بین مواد ورودی و مواد سوخته ایجاد می کند.

## مراجع

- [1] Fernandez-Pello A. C., "Micropower generation using combustion: Issues and approaches," Proc. Combust. Inst., vol. 29, no. 1, pp. 883-899, 2002.
- [2] Vican J., Gajdeczko B. F., Dryer F. L., Milius D. L., Aksay I. a., and Yetter R. a., "Development of a microreactor as a thermal source for microelectromechanical systems power generation," Proc. Combust. Inst., vol. 29, no. 1, pp. 909-916, 2002.
- [3] Norton D. G. and Vlachos D. G., "Combustion characteristics and flame stability at the microscale: a CFD study of premixed methane/air mixtures," Chem. Eng. Sci., vol. 58, no. 21, pp. 4871-4882, 2003.



- [4] Norton D. G. and Vlachos D. G., "A CFD study of propane / air microflame stability," *Combust. Flame*, vol. 138, pp. 97–107, 2004.
- [5] Maruta K., Kataoka T., Il Kim N., Minaev S., and Fursenko R., "Characteristics of combustion in a narrow channel with a temperature gradient," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 30, no. 2, pp. 2429–2436, 2005.
- [6] Richecoeur F. and Kyritsis D. C., "Experimental study of flame stabilization in low Reynolds and Dean number flows in curved mesoscale ducts," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 30, no. 2, pp. 2419–2427, 2005.
- [7] Pizza G., Frouzakis C. E., Mantzaras J., Tomboulides A. G., and Boulouchos K., "Dynamics of premixed hydrogen/air flames in mesoscale channels," *Combust. Flame*, vol. 155, no. 1, pp. 2–20, 2008.
- [8] Pizza G., Frouzakis C. E., Mantzaras J., Tomboulides A. G., and Boulouchos K., "Dynamics of premixed hydrogen / air flames in microchannels," *Combust. Flame*, vol. 152, no. 3, pp. 433–450, 2008.
- [9] Pizza G., Frouzakis C. E., Mantzaras J., Tomboulides a. G., and Boulouchos K., "Three-dimensional simulations of premixed hydrogen/air flames in microtubes," *J. Fluid Mech.*, vol. 658, pp. 463–491, 2010.
- [10] Fan Y., Suzuki Y., and Kasagi N., "Experimental study of micro-scale premixed flame in quartz channels," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 32, no. 2, pp. 3083–3090, 2009.
- [11] Fan A., Minaev S. S., Sereshchenko E. V., Tsuboi Y., Oshibe H., Nakamura H., and Maruta K., "Dynamic Behavior of Splitting Flames in a Heated Channel," *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 45, no. 3, pp. 245–250, 2009.
- [12] Fan Y., Suzuki Y., and Kasagi N., "Quenching mechanism study of oscillating flame in micro channels using phase-locked OH-PLIF," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 33, no. 2, pp. 3267–3273, 2011.
- [13] Maruta K., Parc J. K., Oh K. C., Fujimori T., Minaev S. S., and Fursenko R. V., "Characteristics of Microscale Combustion in a Narrow Heated Channel," *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 40, no. 5, pp. 516–523, 2004.
- [14] Minaev S., Maruta K., and Fursenko R., "Nonlinear dynamics of flame in a narrow channel with a temperature gradient," *Combust. Theory Model.*, vol. 11, no. 2, pp. 187–203, 2007.
- [15] Jackson T. L., Buckmaster J., Lu Z., Kyritsis D. C., and Massa L., "Flames in narrow circular tubes," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 31, no. 1, pp. 955–962, 2007.
- [16] Kurdyumov V. N., Pizza G., Frouzakis C. E., and Mantzaras J., "Dynamics of premixed flames in a narrow channel with a step-wise wall temperature," *Combust. Flame*, vol. 156, no. 11, pp. 2190–2200, 2009.
- [17] Nakamura H., Fan A., Minaev S., Sereshchenko E., Fursenko R., Tsuboi Y., and Maruta K., "Bifurcations and negative propagation speeds of methane/air premixed flames with repetitive extinction and ignition in a heated microchannel," *Combust. Flame*, vol. 159, no. 4, pp. 1631–1643, 2012.
- [18] Poinot T. and Veynany D., *Theoretical and Numerical Combustion*, 2nd ed. Edwards, 2005.
- [19] Tomboulides A. G., Lee J. C., and Orszag S. A., "Numerical Simulation of Low Mach Number Reactive Flows," *J. Sci. Comput.*, vol. 12, no. 2, pp. 139–167, 1997.
- [20] Yetter R. A., Dryer F. L., and Rabitz H., "A Comprehensive Reaction Mechanism For Carbon Monoxide/Hydrogen/Oxygen Kinetics," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 79, pp. 97–128, 1991.
- [21] "Transport: A Software package for the evaluation of gas-phase, multi component transport properties," 2000.
- [22] Tsuboi Y., Yokomori T., and Maruta K., "Lower limit of weak flame in a heated channel," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 32, no. 2, pp. 3075–3081, 2009.
- [23] Tsai C. H., "The Asymmetric Behavior of Steady Laminar Flame Propagation in Ducts," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 180, no. 3, pp. 533–545, 2008.
- [24] Petchenko A. and Bychkov V., "Axisymmetric versus non-axisymmetric flames in cylindrical tubes," *Combust. Flame*, vol. 136, no. 4, pp. 429–439, 2004.