

دو شاخگی جبهه شعله انتشاری در پدیده خاموشی-اشتعال مکرر در احتراق پیش مخلوط هیدروژن/هوا در میکرو کانال گرم شونده

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

علیرضا علی پور
کیومرث مظاهری*

چکیده

در کار حاضر، پدیده خاموشی-اشتعال مکرر برای مخلوط هیدروژن-هوا در یک میکرو کانال گرم شونده به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شود. در شبیه‌سازی عددی از فرمول بندی عدد ماخ پایین، سینتیک تفصیلی و ضرایب نفوذ مولکولی مختلف برای گونه‌ها استفاده می‌شود. تأثیر پارامترهای سرعت جریان ورودی، نسبت هم ارزی و عرض کانال بر دامنه و فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت ورودی باعث افزایش دامنه پدیده خاموشی اشتعال مکرر می‌شود در حالیکه فرکانس این پدیده رفتاری کاهش-افزایش دارد. با افزایش نسبت هم ارزی از مقدار ۰/۵ تا ۱ و همچنین افزایش عرض کانال از ۰/۴ mm تا ۱ mm، دامنه پدیده خاموشی اشتعال مکرر افزایش و فرکانس آن کاهش می‌یابد. دوشاخگی جبهه شعله با استفاده از دیدگاه‌های هیدرودینامیکی و شیمیایی مطالعه می‌شود. ایجاد جریان برگشتی و تشکیل نواحی چرخشی در نزدیکی دیوار باعث دوشاخگی جبهه شعله می‌شود. با بررسی آهنگ واکنش مشاهده می‌شود حضور گونه آب در ناحیه بین دو جبهه شعله می‌تواند عامل اصلی در دوشاخگی جبهه شعله باشد.

واژه‌های کلیدی: احتراق در مقیاس میکرو، رژیم خاموشی-اشتعال مکرر، دوشاخگی، دامنه، فرکانس.

Bifurcation of Propagating Flame in Repetitive Extinction-ignition Phenomenon in Premixed Hydrogen-air Combustion in a Heated Micro Channel

A. Alipoor Ph. D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
K. Mazaheri Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

In the present study, Repetitive extinction-ignition dynamics for premixed hydrogen-air mixture is investigated numerically in a heated micro channel. Low Mach number approach is considered for governing equations in numerical simulation. Also detailed chemistry and different mass diffusivity of species is utilized. The effect of inlet velocity, equivalence ratio and channel height are studied on repetitive extinction-ignition dynamics using two parameters, amplitude and frequency. The results show that the amplitude of repetitive extinction-ignition dynamics increases with increasing the inlet velocity, while the frequency has a descending-ascending behavior. The rising of equivalence ratio from 0.5 to 1 and channel height from 0.4 mm to 1mm lead to growth of amplitude and frequency reduction. Bifurcation of propagating flame is also investigated by hydrodynamic and kinetic approach. Details of flow field indicate that bifurcation of flame is due to creation of recirculation zones formed close to the walls at the beginning of ignition phase. The presence of water in the zone between two propagating flame can be the main reason of bifurcation flame which is obtained from kinetic analysis.

Keywords: Combustion in micro scale, Repetitive extinction-ignition phenomenon, Bifurcation, Amplitude, Frequency.

۱- مقدمه

با شناخت کاربردهای گسترده از جمله تولید توان الکتریکی، احتراق در اندازه‌های کوچک توجهات بسیاری را به خود معطوف کرده است. در این وسایل به علت وجود پدیده‌های مختلف از جمله تقابل شدید شعله و دیوار، مشخصه‌های انتشار شعله به طرز چشمگیری تغییر می‌کنند. بنابراین بررسی مشخصه‌های احتراق در مقیاس‌های میکرو و مزو، امری ضروری می‌باشد.

ماروتا و همکاران، انتشار شعله متان- هوا و پروپان- هوا را در میکرو کانال‌های گرم شونده مستقیم و U شکل با قطر داخلی ۲ میلی‌متر به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند [۱]. ایشان رژیم‌های احتراقی بدون شعله، خاموشی- اشتعال مکرر و رژیم احتراقی پایا را به ترتیب در سرعت‌های نزدیک حد شعله‌وری پایین، سرعت‌های میانی و در سرعت‌های نزدیک به حد شعله‌وری بالا مشاهده نمودند. رژیم پایای متقارن و رژیم ناپایای خاموشی- اشتعال مکرر^۱ در کار آزمایشگاهی ریچکور و کریستیس بر روی انتشار شعله متان-هوا در کانال‌های منحنی با قطر داخلی متفاوت بررسی گردید [۲]. پیزا و همکارانش با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)، احتراق مخلوط رقیق هیدروژن- هوا (با نسبت هم ارزی ۰/۵) را در میکرو کانال‌های گرم شونده به صورت دو بعدی [۳]، [۴] و سه بعدی [۵]، بررسی نمودند. در کار ایشان، رژیم‌های احتراق پایای بدون شعله، رژیم خاموشی- اشتعال مکرر، رژیم پایا متقارن، رژیم پایا نامتقارن و همچنین رژیم‌های گذار نظیر رژیم نوسانی را گزارش نمودند اما در مورد جزئیات و یا علت ایجاد این رژیم‌ها بحث مفصلی انجام نداده است. فن و همکاران [۶]-[۸] با توسعه روش‌های آزمایشگاهی، انتشار شعله و پدیده خاموشی- اشتعال مکرر را برای سوخت متان-هوا در کانال‌های کوارتز بسیار نازک بررسی کردند. در کار فن و همکاران، حد‌های شعله‌وری برای نسبت هم ارزی و سرعت‌های ورودی مختلف به دست آمد. مطالعات ایشان نشان می‌دهند حدهای شعله‌وری برای کانال‌های نازک‌تر، باریک‌تر و برای دماهای دیوار بالاتر، پهن‌تر می‌شود. جکسون و همکاران [۹] برای حل تحلیلی فرایند خاموشی اشتعال شعله از مدل ریاضی شامل معادله دما برای فاز گازی، واکنش تک مرحله‌ای و همچنین معادله دما در جهت محوری برای دیوار استفاده کردند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که شعله‌های نوسانی با فرایند خاموشی- اشتعال مکرر هنگامی ایجاد می‌شود که عدد لوئیس بزرگتر از واحد باشد و یا وقتی که اتلاف حرارت وجود داشته باشد. با توجه به کارهای تحلیلی اشاره شده، پدیده خاموشی اشتعال مکرر با تقریب‌های ساده کننده و قابل قبولی نشان داده شده است. اما در هیچ یک از کارهای فوق الذکر، اشاره‌ای در مورد چگونگی و دلایل تشکیل این پدیده مورد

بررسی قرار نگرفته است. ناکامورا و همکاران [۱۰]، با استفاده از یک مدل یک بعدی بر مبنای مدل نفوذ حرارت، جزئیات رفتار پدیده خاموشی- اشتعال مکرر را برای مخلوط استوکیومتری متان-هوا در یک کانال تحت گرادیان دمایی معین بررسی نمودند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که برای مخلوط متان-هوا، دوشاخگی^۲ شعله، دوبار اتفاق می‌افتد. بعد از محترق شدن مخلوط سوخت و هوا درون کانال، جبهه شعله به سمت بالادست و پایین دست جریان و بعد از گذشت مدت زمانی معین اولین دوشاخگی جبهه شعله اتفاق می‌افتد. در یکی از جبهه‌های شعله، سوخت متان به طور کامل مصرف می‌شود در حالیکه CO در محدوده گسترده‌ای پشت جبهه شعله بدون واکنش باقی می‌ماند. هنگامی که واکنش‌ها ضعیف می‌شوند. جبهه شعله برای دومین بار به دو شاخه تبدیل می‌شود که ناشی از حضور گونه‌های میانی نظیر CH_3 ، CO ، H و OH در پایین دست جریان می‌باشد.

رژیم خاموشی - اشتعال مکرر در کارهای آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی مختلفی اشاره شده است، اما تنها در مرجع [۱۰] فیزیک حاکم بر این پدیده بررسی شده است. اما با در نظر گرفتن معادلات پایستاری به شکل یک بعدی و استفاده از مدل نفوذ-حرارتی، بعضی از رفتارهای انتشار شعله نظیر بررسی علت جدایش شعله امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین شبیه‌سازی دقیق تر پدیده خاموشی- اشتعال مکرر با استفاده از معادلات پایستاری (شامل پایستار جرم، مومنتوم، انرژی و گونه‌ها) نیاز می‌باشد که هدف اصلی مقاله بررسی مشخصه‌های احتراقی پدیده خاموشی- اشتعال مکرر می‌باشد.

در کار اخیر نگارندگان [۱۱]، انتشار شعله هیدروژن-هوا درون میکرو کانال گرم شونده به صورت عددی بررسی گردید. در این کار مشاهده گردید که با تغییر سرعت جریان ورودی، رژیم‌های خاموشی - اشتعال مکرر، رژیم پایای متقارن و رژیم پایای نامتقارن درون میکرو کانال گرم شونده ایجاد می‌شود. در سرعت‌های پایین و در نزدیکی حد شعله‌وری پایین، رژیم خاموشی اشتعال مکرر مشاهده گردید. با افزایش سرعت جریان ورودی و برقراری تعادل بین سرعت جریان ورودی و سرعت سوزش شعله، شعله پایای متقارن شکل می‌گیرد. با افزایش بیشتر سرعت جریان ورودی، شعله ناپایدار می‌شود و شعله‌های پایا نامتقارن درون کانال ایجاد شد. در کار دیگر [۱۲] توسط همین گروه، پدیده خاموشی- اشتعال مکرر به صورت جزئی با استفاده از نمودارهای دما، کسر مولی گونه‌های هیدروژن، اکسیژن، هیدروکسید و آب و همچنین نمودارهای آهنگ آزاد شدن حرارت برای فازهای مختلف بررسی گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در فازهای انتشار و واکنش‌های ضعیف سه قله

² Bifurcation

¹ Repetitive extinction-ignition

در این رابطه λ رسانایی گرمایی مخلوط و cp, i و h_i به ترتیب ظرفیت گرمایی و انتالپی گونه i ام می باشند. معادله حالت گاز کامل به شکل زیر نوشته می شود:

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

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

معادله پایستار جرم برای گونه i

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

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

که $\dot{\omega}_i$ با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\dot{\omega}_i = \sum_{j=1}^L v_{ij} q_j \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$v_{ij} = (v''_{ij} - v'_{ij}) \quad (7)$$

$$q_j = k_{fj} \prod_{i=1}^N [X_i]^{v'_{ij}} - k_{rj} \prod_{i=1}^N [X_i]^{v''_{ij}} \quad (8)$$

v'_{ij} و v''_{ij} ضرایب استوکیومتری واکنش های رفت و برگشت برای گونه i گونه و j واکنش می باشد و q_j آهنگ واکنش برای هریک از واکنش ها می باشد.

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

$$V_i = V_i^* + V_c \quad (9)$$

که V_i^* از نظریه سینتیک گازها بدست می آید. V_c به عنوان تصحیح کننده پایستاری جرم کل بیان می شود [5].

$$V_c = - \sum_{i=1}^{N_g} Y_i V_i^* , V_i^* = - \left(\frac{D_{mi}}{X_i} \right) \nabla X_i \quad (10)$$

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

یکی از هندسه های متداول میکرو کانال گرم شونده برای بررسی احتراق در مقیاس میکرو می باشد که در کارهای مختلفی از جمله مراجع ([5], [10], [12], [13]) مطرح و مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در این هندسه بخشی از کانال به عنوان بخش مورد آزمایش در نظر گرفته می شود و دمای دیواره های آن با استفاده از منبع خارجی افزایش داده می شود. در کار حاضر، 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 شکل ۱ بر روی آن قرار گرفته است.

بر روی ۱۲۰ ابتدای طول بخش مورد بررسی کانال، توزیع دما به صورت تانژانت هایپربولیک از دمای ورودی ($T_{in}=300$)

برای آهنگ آزاد شدن گرما و در فازهای آغازش، اشتعال و جریان دو قله برای آهنگ آزاد شدن گرما مشاهده شد. همچنین با استفاده از بردارهای سرعت نشان داده شد که ایجاد گردابه ها در نزدیکی دیوار باعث جدایش جبهه شعله می شود.

در کار حاضر، پدیده خاموشی- اشتعال مکرر برای مخلوط هیدروژن-هوا در میکرو کانال گرم شونده به صورت عددی شبیه سازی شده است. تاثیر سه پارامتر سرعت جریان ورودی، نسبت هم ارزی و عرض کانال بر مشخصه های احتراقی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با دو پارامتر دامنه (اختلاف بین دمای بیشینه جریان و دمای بیشینه دیوار) و فرکانس (نسبت معکوس زمان یک چرخه) بررسی می شود. پدیده دوشاخگی جبهه شعله به عنوان یکی از پدیده های مهم در این رژیم از دو دیدگاه هیدرودینامیکی و سینتیک شیمیایی بررسی می شود. برای شبیه سازی پدیده خاموشی- اشتعال مکرر از معادلات پایستاری (شامل پایستاری جرم، مومنتوم، انرژی و گونه ها) با فرمولبندی عدد ماخ پایین و به صورت دو بعدی استفاده می شود. همچنین سینتیک تفصیلی برای فاز گازی و ضرایب نفوذ مولکولی مختلف برای گونه های مختلف کار گرفته می شود.

۲- روش عددی

در کار حاضر، برای شبیه سازی احتراق در مقیاس کوچک، معادلات نویر-استوکس به همراه معادله پایستاری انرژی و معادلات پایستاری گونه ها با استفاده از فرمول بندی عدد ماخ پایین حل می شوند [5].

پایستاری جرم

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

پایستاری 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 ρ ، u ، μ به ترتیب چگالی، بردار سرعت و لزجت دینامیکی می باشند. تانسور تنش (S) به صورت $\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)I$ ماتریس واحد است.

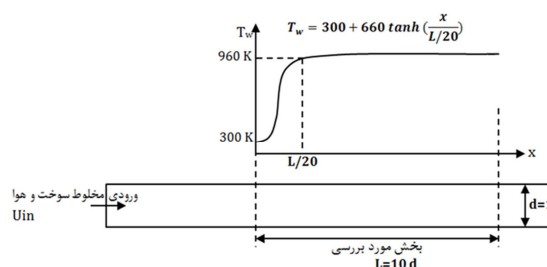
معادله انرژی در سیال

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

(K) تا دمای ۹۶۰ K و بعد از آن دمای ثابت ۹۶۰ K می باشد. در کار حاضر این توزیع دما از مرجع [۴] 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 K و توزیع یکنواخت برای سرعت در نظر گرفته شده است. شرط عدم لغزش برای سرعت و مقدار گرادیان صفر برای گونه ها بر روی دیوار تنظیم می شود. برای خروجی نیز مقدار گرادیان صفر برای متغیرها در نظر گرفته می شود.

در کار حاضر از سینتیک ۹ گونه ای و ۲۷ واکنشی یتر و همکاران [۱۴] استفاده شده است (جدول ۱). همچنین برای محاسبه ضرایب نفوذ مولکولی از اطلاعات انتقال مولکولی نرم افزار Chemkin [۱۵] استفاده شده است.

برای حل مسئله، از بسته نرم افزاری منبع باز Open FOAM و از حلگر Reacting Foam برای شبیه سازی جریان های واکنشی استفاده می شود که البته با توجه به نیازهای مسئله حاضر تغییراتی در آن داده شده است. این تغییرات شامل استفاده از فرمول بندی عدد ماخ پایین، محاسبه ضرایب نفوذ مولکولی برای گونه های مختلف و افزودن جملات مرتبط با نفوذ مولکولی در معادلات انرژی و پایستاری گونه ها می باشد. اعتبار سنجی حلگر توسعه داده شده در کارهای [۱۲] و [۱۳] نشان داده شده است.



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

به منظور تعیین تعداد سلول مورد نیاز برای شبیه سازی انتشار شعله، از ساختار شعله یک بعدی استفاده می شود. با در نظر گرفتن تعریف ضخامت شعله آرام به صورت $L_f = \frac{T_f - T_{in}}{\max|\frac{\partial T}{\partial x}|}$ ، ضخامت شعله آرام برای مخلوط هیدروژن - هوا با نسبت هم ارزی ۰/۵ مقدار ۰/۳۹ mm محاسبه می شود. با در نظر گرفتن ۱۵ سلول محاسباتی درون جنبه شعله می توان از سلولهایی با اندازه $25\mu\text{m} * 25\mu\text{m}$ برای شبیه سازی استفاده نمود.

۳- نتایج و بحث

برای بیان دینامیک پدیده خاموشی- اشتعال مکرر، ابتدا دینامیک کلی این پدیده با استفاده از کانتورهای کسر جرمی گونه OH به عنوان گونه فعال در ناحیه واکنش بررسی می شود. سپس، پدیده دوشاخگی جنبه شعله از دو دیدگاه

هیدرودینامیکی و سینتیکی بررسی خواهد شد. در دیدگاه هیدرودینامیکی بردارهای سرعت و در دیدگاه سینتیکی کسر جرمی گونه ها و آهنگ واکنش برای واکنش های موثر بررسی می شوند.

۳-۱- دینامیک پدیده خاموشی - اشتعال مکرر با استفاده از کانتور OH

کانتورهای کسر جرمی رادیکال OH برای کانالی با عرض ۱ mm، سرعت جریان ورودی ۱۰ cm/s و مخلوط با نسبت هم ارزی ۰/۵ در شکل ۲ نشان داده شده است. در شرایط اشاره شده رژیم خاموشی- اشتعال مکرر مشاهده می شود. این فرایند را می توان به پنج فاز شامل فازهای آغازش، اشتعال، انتشار، واکنش های ضعیف و جریان تقسیم بندی نمود [۱۰].

برای سرعت های جریان ورودی در نزدیکی حد شعله وری پایین، فرایند دوره های از اشتعال و خاموشی برای شعله مشاهده می شود. کانتورهای کسر جرمی رادیکال OH برای کانالی با عرض ۱ mm، سرعت جریان ورودی ۱۰ cm/s و مخلوط با نسبت هم ارزی ۰/۵ در شکل ۲ نشان داده شده است.

مخلوط هیدروژن- هوا تحت تأثیر دمای بالای دیوار محترق می شود و در نزدیکی دیوار واکنش ها آغاز می شوند (فاز آغازش^۱) (شکل ۲- الف). با ایجاد رادیکال های آزاد در نزدیکی دیوار واکنش ها شدت می یابند و مقدار ماکزیمم کسر جرمی رادیکال OH بر روی محور تقارن کانال قرار می گیرد (فاز اشتعال^۲) (شکل ۲- ب).

¹ Initiation phase

² Ignition phase

جدول ۱- سینتیک شیمیایی جزئی برای احتراق H_2-O_2 توسط یترو و همکاران [۱۴]

No.	Reaction	A(mole.cm.K.s)	n	E (kcal/mole)
H2-O2 Chain Reactions				
R1	$H+O_2=O+OH$	1.94E+14	0.0	16440
R2	$O+H_2=H+OH$	5.080E+04	2.67	6290
R3	$H_2+OH=H_2O+H$	2.16E+08	1.51	3430
R4	$O+H_2O=OH+OH$	2.95E+06	2.02	13400
H2-O2 Dissociation/Recombination Reactions				
R5	$H_2+M=H+H+M$ H2O/12.0/ H2/2.5/	4.570E+19	-1.40	104000
R6	$O+O+M=O_2+M$ H2O/12.0/ H2/2.5/	6.170E+15	-0.50	0
R7	$O+H+M=OH+M$ H2O/12.0/ H2/2.5/	4.720E+18	-1.0	0
R8	$H+OH+M=H_2O+M$ H2O/12.0/ H2/2.5/	2.24E+22	-2.0	0
Formation and Consumption of HO2				
R9	$H+O_2(+M)=HO_2(+M)$ LOW /6.70E+19 -1.42 0.0/ TROE/ 1.0 1E-30 1E+30/ H2O/12.0/ H2/2.5/ O2/0.78/	4.52E+13	0.0	0.0
R10	$HO_2+H=H_2+O_2$	6.62E+13	0.0	2130
R11	$HO_2+H=OH+OH$	1.69E+14	0.0	874
R12	$HO_2+O=OH+O_2$	1.75E+13	0.0	-397
R13	$HO_2+OH=H_2O+O_2$	1.90E+16	-1.0	0.0
Formation and Consumption of H2O2				
R14	$HO_2+HO_2=H_2O_2+O_2$ DUP	4.200E+14	0.0	11980
R15	$HO_2+HO_2=H_2O_2+O_2$ DUP	1.30E+11	0.0	-1629
R16	$H_2O_2(+M)=OH+OH(+M)$ LOW / 1.20E+17 0.0 45500 / TROE/ 0.502 1E-30 1E+30 / H2O/12.0/ H2/2.5/	3.0E+14	0.0	48460
R17	$H_2O_2+H=H_2O+OH$	1.0E+13	0.0	3590
R18	$H_2O_2+H=HO_2+H_2$	4.820E+13	0.0	7950
R19	$H_2O_2+O=OH+HO_2$	9.64E+06	2.0	3970
R20	$H_2O_2+OH=H_2O+HO_2$ DUP	1.000E+12	0.0	0
R21	$H_2O_2+OH=H_2O+HO_2$ DUP	5.800E+14	0.0	9557

واکنش‌ها کاهش می‌یابد (فاز واکنش های ضعیف^۲) (شکل ۲-ه). با گذشت زمان، مخلوط نسوخته هیدروژن/هوا مجدداً به محفظه احتراق وارد می‌شود (فاز جریان^۳) (شکل ۲-و) و چرخه بعدی خاموشی-اشتعال آغاز می‌گردد.

سپس جبهه شعله به دو بخش تقسیم می‌شود و به سمت بالادست و پایین دست جریان منتشر می‌گردد (فاز انتشار^۱) (شکل ۲-ج). با حرکت جبهه شعله به سمت بالادست جریان مخلوط سرد هیدروژن-هوا ورودی، و با انتشار جبهه شعله به سمت پایین دست جریان، مخلوط نسوخته هیدروژن / هوا باقیمانده از چرخه قبلی محترق می‌شوند (شکل ۲-د). با سرد شدن جبهه شعله انتشاری در بالادست جریان و همچنین مصرف سوخت توسط جبهه انتشاری در پایین دست جریان، شدت

² Weak reaction phase

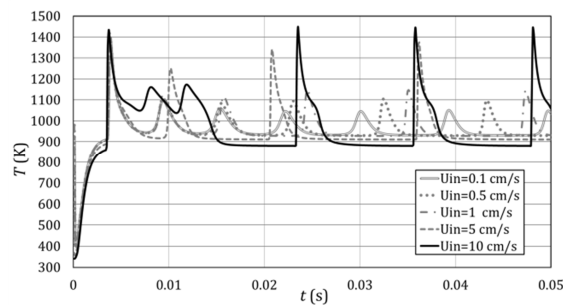
³ Flowing phase

¹ Propagation phase

معکوس بازه زمانی بین دو قله در فرایند خاموشی- اشتعال، فرکانس این پدیده در نظر گرفته می‌شود [۴].

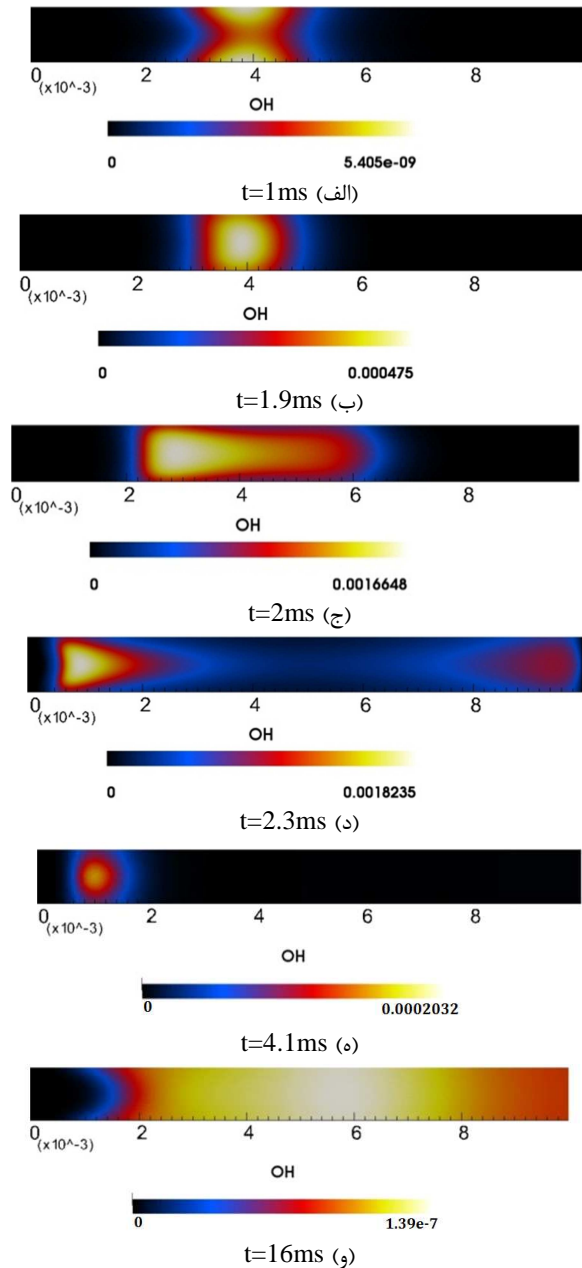
۳-۲-۱- تأثیر سرعت ورودی بر مشخصه‌های پدیده خاموشی - اشتعال مکرر

تأثیر سرعت جریان ورودی بر مشخصه‌های پدیده خاموشی- اشتعال مکرر با استفاده از نمودار تغییرات زمانی یک نقطه مشخص از میدان جریان بررسی می‌شود. نقطه مورد نظر در فاصله یک میلیمتری از ابتدای بخش آزمایش و بر روی محور تقارن کانالی با عرض ۱ mm، قرار دارد. تغییرات زمانی دمای نقطه مورد نظر در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات زمانی دما برای یک نقطه مشخص در جریان در سرعت‌های جریان ورودی مختلف (کانال با عرض ۱ mm و نسبت هم ارزی هیدروژن-هوا برابر با ۰٫۵)

در زمان‌های اولیه با توجه به سرد بودن جریان ورودی (K) ۳۰۰، دمای جریان تحت تأثیر دمای بالای دیوار ها بالا می‌رود و دمای نقطه تعیین شده از مقدار K ۳۰۰ تا دمای K ۹۶۰ پیش گرم می‌شود. مخلوط سوخت و هوا محترق می‌شود. با گذشت زمان برای سرعت های جریان ورودی مختلف، پدیده‌های ناپایای مختلف و تصادفی در ابتدای آغاز پدیده خاموشی - اشتعال مکرر مشاهده می‌شود. برای سرعت جریان ورودی ۱۰ cm/s بعد از مشاهده دو قله دمایی با حدودا K ۱۱۵۰، فرایند دوره‌ای و منظم خاموشی و روشنی شعله آغاز می‌شود. در سرعت‌های جریان ورودی کمتر، پدیده دوره‌ای منظم خاموشی - اشتعال شعله سریعتر اتفاق می‌افتد. با صرف نظر از پدیده‌های ابتدایی و تصادفی شعله، تغییرات دامنه و فرکانس برای سرعت‌های جریان ورودی مختلف در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. خطوط پر نشان دهنده تغییرات دامنه و فرکانس پدیده خاموشی - اشتعال مکرر در سرعت های جریان ورودی مختلف برای کار حاضر و خطوط خط چین، نشان دهنده تغییرات دامنه و فرکانس پدیده خاموشی - اشتعال مکرر در سرعت‌های جریان ورودی مختلف برای شبیه‌سازی مستقیم انجام



شکل ۲ - کانتور کسر جرمی رادیکال OH در زمان‌های مختلف در رژیم خاموشی - اشتعال مکرر برای سرعت جریان ورودی ۱۰ cm/s و نسبت هم ارزی ۰٫۵ در کانالی با عرض ۱ mm

۳-۲-۲- بررسی مشخصه‌های پدیده خاموشی - اشتعال مکرر

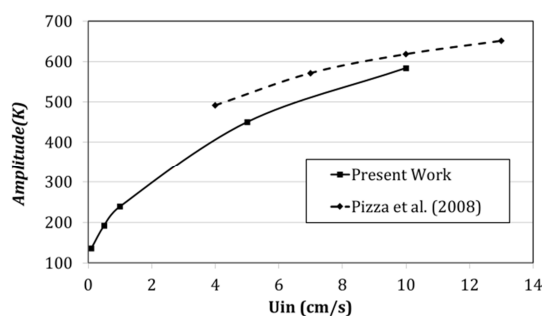
مشخصه‌های پدیده خاموشی- اشتعال مکرر با در نظر گرفتن سه پارامتر شامل سرعت جریان ورودی، نسبت هم ارزی مخلوط سوخت و هوا و ضخامت کانال بررسی می‌شود. برای بررسی مشخصه‌های پدیده خاموشی - اشتعال از دو متغیر دامنه و فرکانس نوسانات استفاده می‌شود. دامنه نوسان به صورت اختلاف بین دمای بیشینه جریان و دمای بیشینه دیوار (K ۹۶۰) در فرایند خاموشی- اشتعال شعله تعریف می‌شود. همچنین نسبت

باعث می شود که در سرعت های جریان ورودی پایین، دامنه نوسانات کمتری برای شعله مشاهده شود.

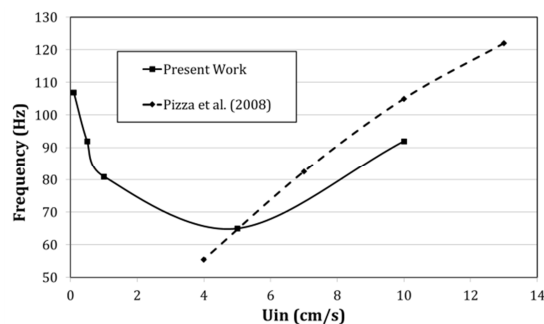
تغییرات فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر برای سرعت های جریان ورودی مختلف، رفتاری کاهش-افزایشی دارد. با توجه به نتایج بدست آمده، مشاهده می شود که در سرعت های جریان ورودی کمتر از 5 cm/s با افزایش سرعت جریان ورودی، فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر کاهش می یابد. در حالیکه برای سرعت های جریان ورودی بیشتر از 5 cm/s با افزایش سرعت جریان ورودی، فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر افزایش می یابد. همانطور که بیان گردید، با افزایش سرعت جریان ورودی، دامنه پدیده خاموشی - اشتعال مکرر افزایش می یابد. بدین مفهوم که با افزایش سرعت ورودی جریان، دمای بیشینه شعله افزایش می یابد. با افزایش مقدار دمای بیشینه شعله، سرعت سوزش شعله نیز افزایش می یابد که باعث حرکت سریعتر جبهه شعله به بالادست و پایین دست جریان می شود. با حرکت جبهه شعله به سمت پایین دست جریان، مخلوط سوخت و هوای موجود سریعتر مصرف می شود و شعله سریعتر خاموش می شود. همچنین در حرکت جبهه شعله به سمت بالادست جریان، شعله سریعتر به مخلوط سرد ورودی می رسد و سریعتر دمای جبهه شعله افت پیدا می کند. بنابراین زمان کمتری برای انجام یک چرخه خاموشی-اشتعال نیاز می باشد و فرکانس این پدیده با افزایش سرعت جریان ورودی، افزایش می یابد.

در سرعت های جریان ورودی کمتر از 5 cm/s مشاهده می شود که با کاهش میزان سرعت ورودی جریان، فرکانس پدیده خاموشی - اشتعال مکرر افزایش و دامنه آن کاهش می یابد. بدین مفهوم که دمای بیشینه جبهه شعله کاهش می یابد. با کاهش دمای شعله، سینتیک های دما پایین فعال می شوند و سوخت ورودی تمایل بیشتری به تبدیل شدن به گونه های سنگین تر نظیر رادیکال هیدروپروکسی HO_2 ، هیدروپروکساید H_2O_2 و آب نشان می دهد. در حالیکه میزان گونه های سبک تر نظیر H ، O و OH که مربوط به سینتیک های دما بالا می باشد کاهش می یابد [۵]. در این حالت به علت کمبود رادیکال های سبک درون محفظه برای آغاز واکنش های مربوط به تجزیه سوخت، بخشی از سوخت بدون انجام واکنش درون کانال باقی می ماند. در صورت ایجاد شرایط گرمایی، واکنش های شیمیایی گسترده تر اما با آهنگ آزاد شدن گرما کمتر درون کانال مشاهده می شوند که باعث ایجاد توزیع گرمایی یکنواخت تری می شود. اما از آنجایی که گونه های سنگین تر در محفظه احتراق وجود دارند و تمایل به جذب حرارت بیشتر دارند، دمای جریان افزایش چندانی ندارد. از آنجایی که مقدار اتلاف حرارت از محفظه به علت بالا بودن مقیاس زمانی اقامت سیال زیاد می باشد، گرما آزاد شده سریعاً اتلاف می شود و دمای شعله

شده توسط پیزا و همکاران [۴] می باشد. با ارزیابی نتایج به دست آمده از کار حاضر در مقایسه با شبیه سازی مستقیم پیزا و همکاران [۴] مشاهده می شود که نتایج کار حاضر از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. برای سرعت ورودی 10 cm/s فرکانس پدیده خاموشی - اشتعال مکرر مقدار 92 Hz محاسبه گردید که با مقدار ارائه شده در شبیه سازی مستقیم توسط پیزا و همکاران (106.9 Hz) در حدود 14% درصد اختلاف دارد. مقدار دامنه این پدیده نیز 584 K می باشد که نسبت به کار پیزا و همکاران (618 K) در حدود 5.5% درصد اختلاف دارد. با توجه به ناپایا بودن پدیده و همچنین شرایط مختلف روش حل عددی، مقدار خطا قابل قبول می باشد.



شکل ۴- تغییرات دامنه پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با سرعت ورودی (نتایج کار حاضر و مقایسه با شبیه سازی مستقیم توسط پیزا و همکاران [4])، کانال با عرض 1 mm و نسبت هم ارزی هیدروژن-هوا برابر با 0.5



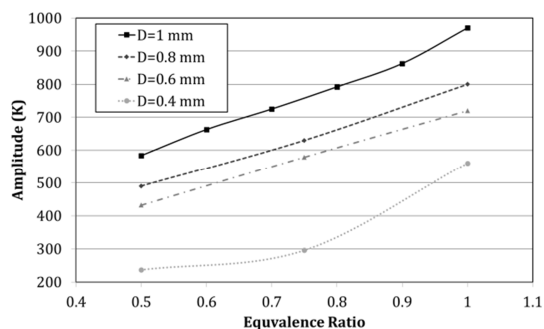
شکل ۵- تغییرات فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با سرعت ورودی (نتایج کار حاضر و مقایسه با شبیه سازی مستقیم توسط پیزا و همکاران [4])، کانال با عرض 1 mm و نسبت هم ارزی هیدروژن-هوا برابر با 0.5

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل های ۴ و ۵ مشاهده می شود که با افزایش سرعت جریان ورودی از مقدار 0.1 cm/s تا 10 cm/s ، مقدار دامنه، از مقدار 136 K تا مقدار 654 K افزایش می یابد. در سرعت های جریان ورودی پایین، مقیاس زمانی اقامت سیال افزایش می یابد، بنابراین میزان اتلاف گرما از محفظه بیشتر می شود. با افزایش میزان اتلاف گرما از محفظه احتراق، دمای بیشینه شعله کاهش می یابد که این امر

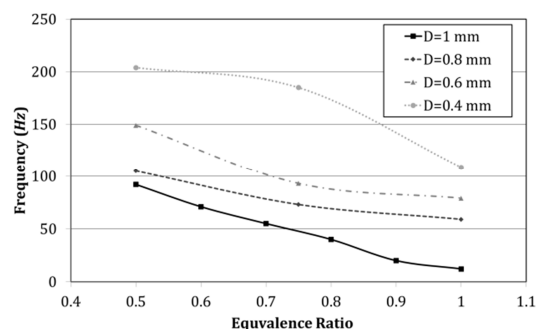
۳-۲-۳- تأثیر قطر کانال بر روی پدیده خاموشی - اشتعال مکرر

در این بخش تأثیر قطر کانال بر روی رژیم خاموشی- اشتعال مکرر بررسی می شود. چهار قطر کانال، شامل قطرهای ۰.۴ mm، ۰.۶ mm، ۰.۸ mm و ۱ mm و همچنین نسبت‌های هم ارزی مختلف در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که با کاهش عرض کانال دامنه پدیده خاموشی- اشتعال مکرر کاهش می‌یابد در حالیکه فرکانس پدیده خاموشی- اشتعال مکرر افزایش می‌یابد. با کاهش عرض کانال، نسبت سطح به حجم کانال افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت سطح به حجم کانال، اتلاف گرما از جداره‌های کانال افزایش می‌یابد و مقدار بیشینه دمای جریان درون کانال کاهش می‌یابد. بنابراین دامنه پدیده خاموشی - اشتعال مکرر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش اتلاف حرارت، شدت انرژی آزاد شده ناشی از فرایند احتراق در مدت زمان کمتری کاهش می‌شود بنابراین مقدار فرکانس پدیده خاموشی- اشتعال مکرر با کاهش عرض کانال، افزایش می‌یابد.



شکل ۷- تغییرات دامنه پدیده خاموشی- اشتعال مکرر با نسبت هم ارزی برای کانال‌های با قطر متفاوت (سرعت ورودی جریان برابر با ۱۰ cm/s)



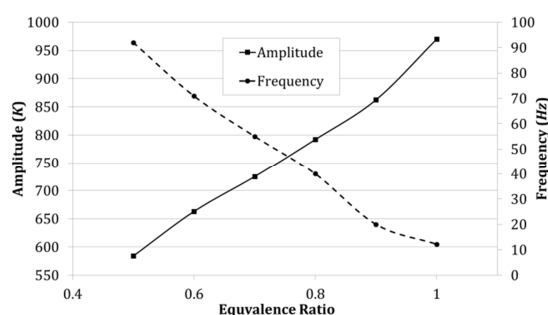
شکل ۸- تغییرات فرکانس پدیده خاموشی- اشتعال مکرر با نسبت هم ارزی برای کانال‌های با قطر متفاوت (سرعت ورودی جریان برابر با ۱۰ cm/s)

تغییرات دامنه و فرکانس برای نسبت‌های هم ارزی مختلف در کانال‌های با عرض متفاوت نیز در شکل‌های ۷ و ۸ بررسی

کاهش می‌یابد. اما از آنجایی که بخشی از سوخت به صورت نسوخته در محفظه احتراق وجود دارد، با جذب گرما از دیوارها واکنش‌ها مجدداً آغاز می‌شوند و پدیده خاموشی - اشتعال مکرر اتفاق می‌افتد. بنابراین بازه زمانی بین دو قله دمایی در پدیده خاموشی - اشتعال مکرر کاهش می‌یابد که نشان دهنده افزایش میزان فرکانس این پدیده می‌باشد. در این شرایط شعله در جهت ایجاد شعله‌های پایا در نزدیکی حد شعله‌وری پایین حرکت می‌کند که به شعله‌های ضعیف^۱ معروف می‌باشد و در کارهای مختلفی به آن اشاره شده است [۱].

۳-۲-۳- تأثیر نسبت هم ارزی بر روی رژیم خاموشی - اشتعال مکرر

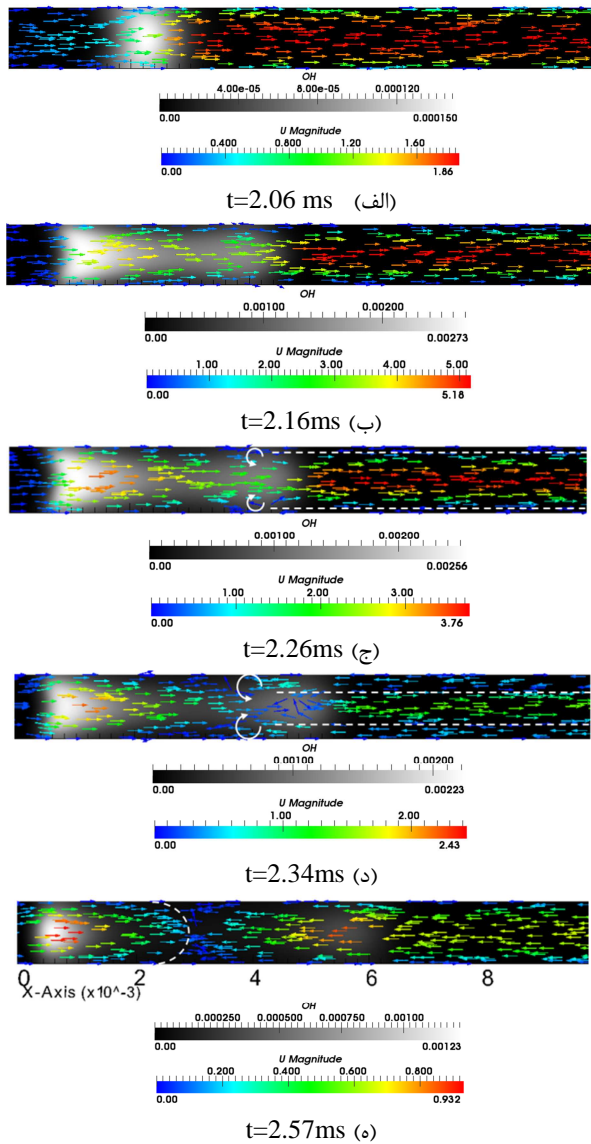
در این بخش تأثیر نسبت هم ارزی بر روی پدیده خاموشی- اشتعال مکرر برای کانالی با عرض یک میلی‌متر و سرعت ورودی ۱۰ cm/s بررسی می‌گردد. تغییرات دو پارامتر دامنه و فرکانس برای نسبت هم ارزی‌های ۰.۵، ۰.۶، ۰.۷، ۰.۸، ۰.۹ و ۱ در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش نسبت هم ارزی، دامنه پدیده خاموشی- اشتعال مکرر افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه با افزایش نسبت هم ارزی از مقدار ۰.۵ تا مقدار ۱ دامنه بیشینه در کانال افزایش می‌یابد بنابراین دامنه پدیده خاموشی - اشتعال مکرر با افزایش نسبت هم ارزی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه نسبت سطح جانبی به حجم کانال و سرعت ورودی جریان ثابت می‌باشند، با افزایش دمای بیشینه جریان، مدت زمان بیشتری برای کاهش دمای جبهه شعله و خاموشی شعله نیاز می‌باشد. بنابراین فرکانس پدیده خاموشی- اشتعال مکرر با افزایش نسبت هم ارزی کاهش می‌یابد.



شکل ۶- تغییرات دامنه و فرکانس پدیده خاموشی- اشتعال مکرر با نسبت هم ارزی (کانال با عرض ۱ mm و سرعت ورودی جریان برابر با ۱۰ cm/s)

¹ weak flame

شده در شکل ۹- ه 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 مجددا آن را به سمت عقب براند ادامه خواهد داشت.



شکل ۹- نمایش کانتور های OH به همراه بردارهای سرعت جریان برای سرعت جریان ورودی 10 cm/s و نسبت هم ارزی 0.5 در کانالی با عرض 1 mm

برای بررسی کمی این رفتار، تغییرات سرعت جریان بر روی محور تقارن برای کانال با ضخامت 1 میلیمتر و نسبت هم ارزی 0.5 برای زمان های مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. زمان های انتخاب شده از ابتدای فاز انتشار تا زمان جدایش شعله را نشان می دهند. در ابتدای فاز انتشار ($t=2.06 \text{ ms}$) سرعت جریان به علت کاهش چگالی افزایش می یابد اما با گذشت زمان، سرعت جبهه شعله انتشاری به پایین دست جریان کاهش

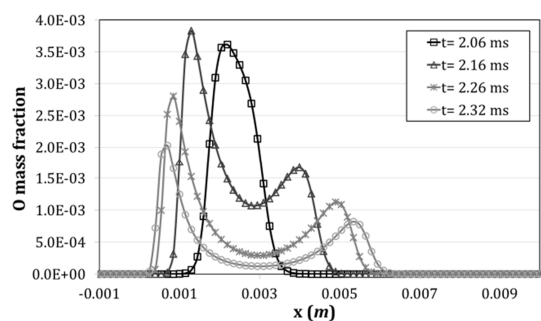
شده اند. همانطور که در بخش قبل بیان شد با افزایش نسبت هم ارزی میزان گرمای آزاد شده از واکنش افزایش می یابد که این باعث افزایش دمای جریان می شود. بنابراین مدت زمان بیشتری برای کاهش دما و اتلاف گرما از محفظه نیاز است بنابراین فرکانس پدیده خاموشی - اشتعال مکرر با افزایش نسبت هم ارزی کاهش می یابد. دامنه پدیده خاموشی - اشتعال مکرر با افزایش نسبت هم ارزی افزایش می یابد که این امر ناشی از افزایش دمای جریان با افزایش نسبت هم ارزی می باشد.

۳-۳-۳ دوشاخگی جبهه شعله در پدیده خاموشی-اشتعال مکرر

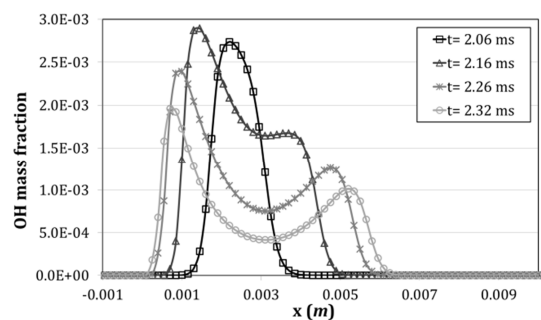
یکی از پدیده های مشاهده شده در حین انتشار شعله در کانال های گرم شونده در پدیده خاموشی - اشتعال مکرر، دوشاخگی جبهه شعله می باشد که در فاز انتشار اتفاق می افتد. هدف از این بخش بررسی جزئیات دوشاخگی شعله در پدیده خاموشی اشتعال مکرر می باشد. این بررسی با استفاده از دو دیدگاه هیدرودینامیکی و سینتیکی انجام می شود. در دیدگاه هیدرودینامیکی، رفتار بردارهای سرعت، و در دیدگاه سینتیکی رفتار کسر جرمی گونه های مختلف و همچنین آهنگ واکنش برای واکنش های موثر، در زمان جدایش جبهه شعله انتشاری بررسی می شوند.

۳-۳-۱-۱ دوشاخگی جبهه شعله در پدیده خاموشی - اشتعال مکرر از دیدگاه هیدرودینامیکی

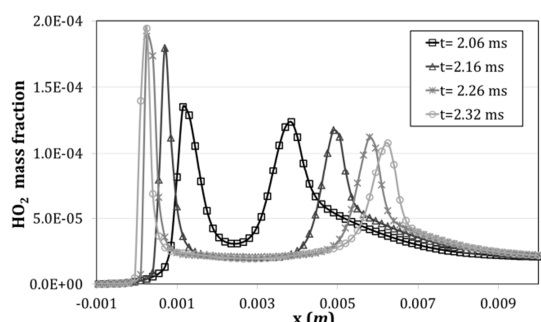
برای بررسی دوشاخگی جبهه شعله در پدیده خاموشی - اشتعال مکرر از بردارهای سرعت که بر روی کانتور رادیکال OH قرار داده شده است، استفاده شده است. در شکل ۹ بردارهای سرعت، در زمان های دوشاخگی جبهه شعله نشان داده شده است. در زمان اولیه تشکیل شعله ($t=2.06 \text{ ms}$) مشاهده می شود که بردارهای سرعت در جهت جریان خروجی و مثبت می باشند (شکل ۹- الف). این حالت تا هنگامی که شعله در طول کانال گسترش می یابد حفظ می شود (شکل ۹- ب). در زمان $t=2.26 \text{ ms}$ ، در اثر کاهش سرعت در نزدیکی دیوار، فشار در نزدیکی دیوار افزایش می یابد که منجر به ایجاد ناحیه چرخشی به دنبال آن ایجاد یک جریان در خلاف جهت در نزدیکی دیوار می شود که مرز آن در شکل ۹- ج با خط چین نشان داده شده است که این مرز نشان دهنده سرعت صفر می باشد. این جریان در جهت مخالف باعث می شود که با گذشت زمان این ناحیه چرخشی رشد می کند (شکل ۹- د) تا هنگامی که دو ناحیه چرخشی با یکدیگر ادغام می شوند و جریانی در خلاف جهت جریان ورودی ایجاد می شود و سپس به سمت بالا دست جریان حرکت می کند (شکل ۹- ه) خط چین نشان داده



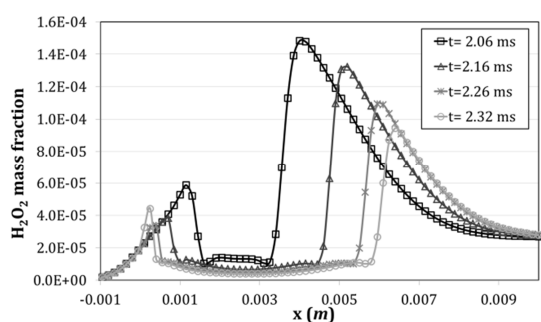
(ج)



(د)



(ه)

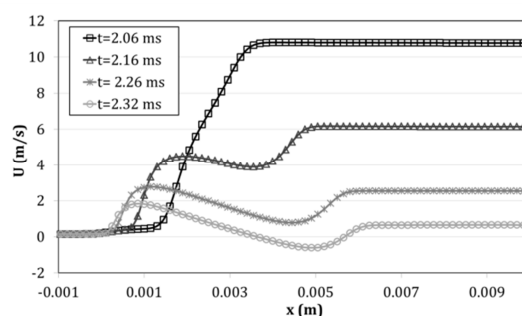


(و)

شکل ۱۱- تغییرات کسر جرمی گونه‌های O_2 (الف)، H_2O (ب)، O (ج)، OH (د)، HO_2 (ه) و H_2O_2 (و) در امتداد محور تقارن کانال برای زمان‌های مختلف

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۱۱، سه نوع رفتار برای گونه‌ها با گذشت زمان مشاهده می‌شود. کسر جرمی گونه‌های O_2 (شکل ۱۱-الف) و H_2O (شکل ۱۱-ب) در ناحیه بین دو جبهه شعله (ناحیه بین دو قله) با گذشت زمان افزایش می‌یابند. مقدار کسر جرمی گونه‌های O (شکل ۱۱-ج)، OH

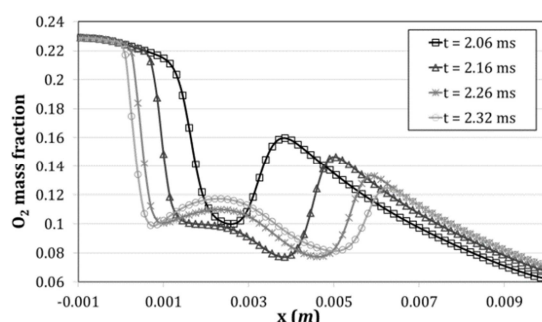
می‌یابد. با گذشت زمان مقدار کاهش سرعت، افزایش می‌یابد ($t=2.16$ ms و $t=2.26$ ms) تا هنگامی که اندازه سرعت در پشت جبهه شعله انتشاری به پایین دست جریان منفی و در خلاف جهت جریان ورودی می‌شود ($t=2.32$ ms) که در این لحظه جدایش جبهه شعله اتفاق می‌افتد.



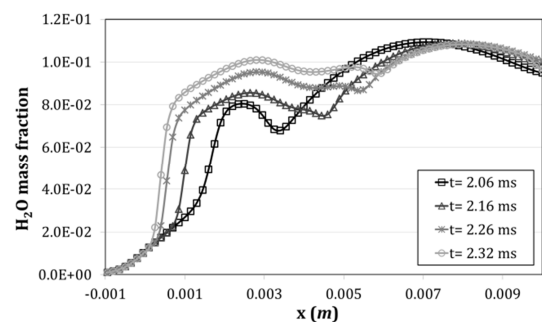
شکل ۱۰- تغییرات سرعت بر روی محور تقارن (کانال با عرض ۱ میلی‌متر و سوخت هیدروژن-هوا با نسبت هم ارزی ۰٫۵) برای زمان‌های مختلف

۳-۳-۲- دوشاخگی جبهه شعله در پدیده خاموشی - اشتعال مکرر از دیدگاه سینتیکی

در این بخش دوشاخگی جبهه شعله از دیدگاه واکنش‌های شیمیایی بررسی می‌شود. برای بررسی این پدیده، مقدار کسر جرمی برخی از گونه‌های شرکت‌کننده در واکنش بر روی محور تقارن کانال در زمان‌های مختلف در شکل ۱۱ (الف - و) نشان داده شده است.

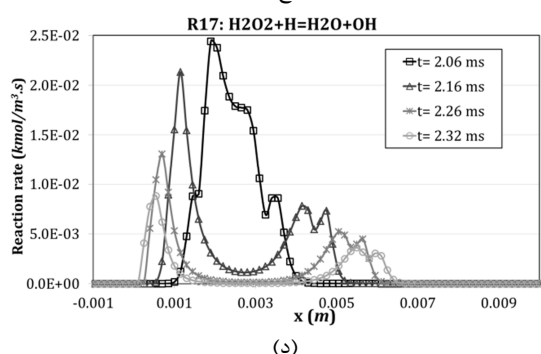
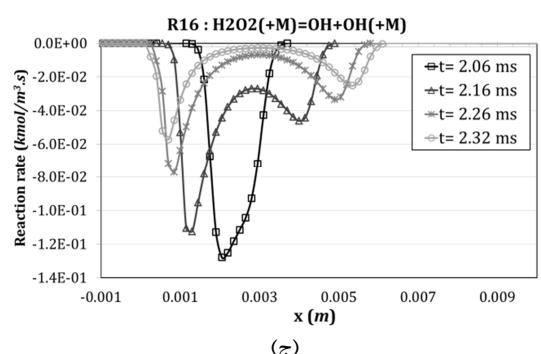
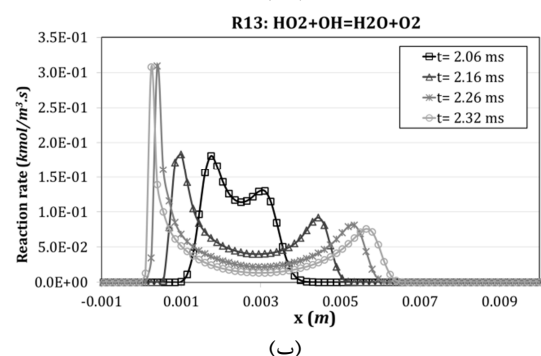
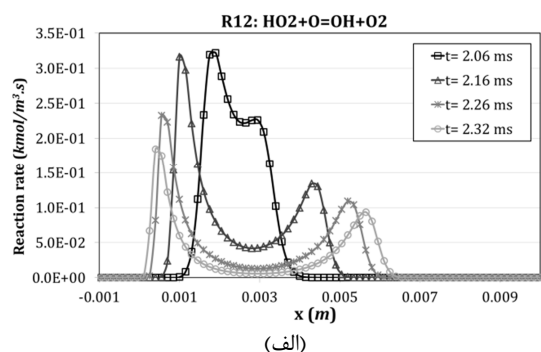


(الف)



(ب)

R18 و R21 با گونه‌های H و OH واکنش داده و گونه‌های H₂O و HO₂ تولید می‌شوند.



(شکل ۱۱-د)، H₂ و H با گذشت زمان در ناحیه بین دو جبهه شعله کاهش می‌یابند. با این تفاوت که در هنگام جدایش، مقدار قابل توجهی از گونه‌های OH و O همچنان در کانال حضور دارند، در حالیکه مقدار گونه‌های H و H₂ تقریباً ناچیز می‌باشد. کسر جرمی گونه‌های HO₂ (شکل ۱۱-ه) و H₂O₂ (شکل ۱۱-و) با گذشت زمان در ناحیه بین دو جبهه شعله تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

با توجه به بررسی هیدرودینامیکی انجام شده در بخش قبل مشاهده گردید که در نزدیکی دیواره‌ها جریانی معکوس به وجود می‌آید که با رشد آن جدایش جبهه شعله اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج نشان داده شده در این بخش دیده می‌شود که جریان برگشتی حاوی مقداری اکسیژن می‌باشد. با گذشت زمان و ایجاد جریان برگشتی و به دنبال آن رشد گردابه‌ها در نزدیکی دیوار، مقدار اکسیژن در ناحیه بین دو جبهه شعله افزایش می‌یابد. اما در مورد سایر گونه‌ها نمی‌توان به طور دقیق بحث نمود به همین منظور آهنگ واکنش برای بعضی از واکنش‌ها در زمان‌های مختلف استخراج گردیده است تا با استفاده از آنها بتوان این پدیده را بهتر تفسیر نمود.

واکنش‌های با آهنگ واکنش سریع (نظیر واکنش‌های R1، R2، R3، R10 و R11) باعث مصرف سوخت ورودی و تشکیل رادیکال‌های سبک در ناحیه شعله می‌شود. بنابراین با کاهش مقدار سوخت در ناحیه بین دو جبهه شعله، آهنگ واکنش این واکنش‌ها بشدت کاهش می‌یابد و در واقع واکنش‌های با آهنگ واکنش کند (نظیر واکنش‌های R12 (شکل ۱۲-الف)، R13 (شکل ۱۲-ب)، R16 (شکل ۱۲-ج)، R17 (شکل ۱۲-د)، R18 (شکل ۱۲-ه) و R21 (شکل ۱۲-و)) در ناحیه بین دو جبهه شعله تأثیرگذارتر خواهند بود. بنابراین در شکل ۱۲ رفتار آهنگ واکنش برخی از واکنش‌های موثر در این پدیده با گذشت زمان بر روی محور تقارن کانال نشان داده شده است.

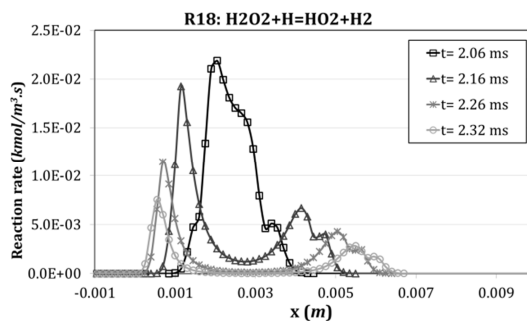
واکنش‌های انتخاب شده را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم‌بندی نمود. واکنش‌های مربوط به تخریب گونه HO₂ و واکنش‌هایی که به تولید و یا تخریب گونه H₂O₂ مربوط می‌شوند. در واکنش‌های R12 و R13 گونه HO₂ با گونه‌های O و OH واکنش داده و گونه‌های H₂O، O₂ و OH تولید می‌شوند. البته واکنش R13 در ناحیه جدایش فعال‌تر از واکنش R12 می‌باشد. به طوری که مقدار آهنگ واکنش R13 در زمان جدایش برابر 1.36×10^{-2} ثانیه می‌باشد در حالیکه آهنگ واکنش برای واکنش R12 در زمان جدایش برابر با 0.5×10^{-2} می‌باشد. براین اساس آهنگ تولید گونه H₂O بیشتر از آهنگ تولید گونه OH می‌باشد. در واکنش R16 گونه H₂O₂ تبدیل به گونه‌های OH می‌شود. با توجه به مقدار H₂O₂ تولیدی در واکنش R16، این گونه در واکنش‌های R17،

می‌توان در این دانست که از آنجایی که جبهه شعله در حرکت به سمت بالادست به سوخت نسوخته ورودی می‌رسد بنابراین میزان سوخت در جبهه شعله افزایش می‌یابد و واکنش‌های مرتبط به آن شدت می‌یابد و به دنبال آن شدت واکنش‌های مرتبط با رادیکال H نیز افزایش می‌یابد و بخش اعظم آن در جبهه شعله مصرف می‌شود و بخش کمی از رادیکال H به ناحیه پشت جبهه شعله می‌رسد.

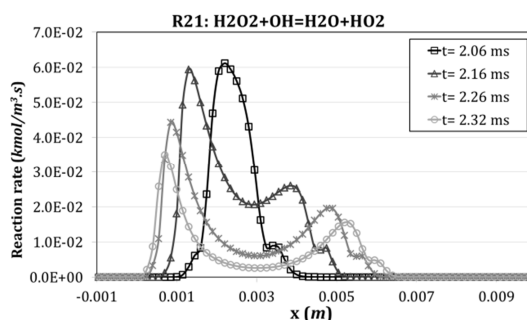
با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در ناحیه بین دو جبهه شعله در اثر ایجاد جریان برگشتی مقداری اکسیژن وارد می‌شود و با توجه به وجود رادیکالهایی نظیر OH، واکنش‌های با آهنگ واکنش کند فعال می‌شوند این واکنش‌ها در جهت تولید گونه‌های سنگین نظیر H_2O_2 ، H_2O و HO_2 حرکت می‌کنند که باعث جذب انرژی بیشتر و کاهش دما در ناحیه بین دو جبهه شعله می‌شوند که این کاهش دما باعث خاموشی و در نتیجه جدایش جبهه شعله می‌شود. بنابراین تولید گونه H_2O در ناحیه بین دو جبهه شعله را می‌توان مهمترین عامل برای جدایش شعله از دیدگاه شیمیایی دانست. همچنین تولید گونه‌های H_2O_2 و HO_2 در این ناحیه در تکمیل این فرایند می‌توانند موثر باشند. از سوی دیگر فعال شدن واکنش‌هایی نظیر R17 و R18 در ناحیه بین دو جبهه شعله، باعث مصرف و کاهش رادیکال H در این ناحیه می‌شود. از سوی دیگر، از آنجایی که رادیکال H معیاری برای خاموشی شعله می‌باشد بنابراین با کاهش میزان رادیکال H خاموشی اتفاق می‌افتد.

۴- نتیجه‌گیری

در کار حاضر، پدیده خاموشی- اشتعال مکرر برای مخلوط هیدروژن-هوا (با نسبت هم ارزی 0.5) در یک میکرو کانال گرم شونده به صورت عددی شبیه سازی گردید. در شبیه‌سازی عددی از فرمول‌بندی عدد ماخ پایین، سینتیک تفصیلی و ضرایب نفوذ مولکولی مختلف برای گونه‌ها استفاده شد. تأثیر پارامترهای سرعت جریان ورودی، نسبت هم ارزی و عرض کانال بر دامنه و فرکانس پدیده خاموشی- اشتعال مکرر بررسی گردید. نتایج نشان دادند که افزایش سرعت ورودی باعث، افزایش دامنه پدیده خاموشی اشتعال می‌شود در حالیکه فرکانس این پدیده رفتاری کاهشی - افزایش دارد. با افزایش نسبت هم ارزی و عرض کانال، دامنه پدیده خاموشی اشتعال مکرر افزایش و فرکانس آن کاهش می‌یابد. دوشاخگی جبهه شعله با استفاده از دیدگاه‌های هیدرودینامیکی و شیمیایی مطالعه شد. ایجاد جریان برگشتی و تشکیل نواحی چرخشی در نزدیکی دیوار باعث دوشاخگی جبهه شعله از دیدگاه هیدرودینامیکی می‌شود. از دیدگاه شیمیایی، مقدار کسر جرمی گونه‌های اکسیژن و آب در ناحیه بین دو جبهه



(e)



(o)

شکل ۱۲- تغییرات آهنگ واکنش برای واکنش‌های R12، R13، R16، R17، R18، R21 در امتداد محور تقارن کانال در زمان‌های مختلف

مانند شکل ۱۱، در لحظه جدایش مقدار قابل توجهی از رادیکال OH در ناحیه بین دو جبهه شعله وجود دارد. وجود این مقدار رادیکال OH می‌تواند ناشی از تجزیه سوخت ورودی در واکنش‌های اولیه و با آهنگ واکنش بالا نظیر واکنش‌های R1 و R2 باشد. در حالیکه میزان رادیکال H در ناحیه بین دو جبهه شعله ناچیز می‌باشد که می‌توان علت آن را این دانست که رادیکال H علاوه بر اینکه در واکنش‌های R2 و R3 تولید می‌شود اما در واکنش‌های با آهنگ واکنش سریع R1، R10 و R11 مصرف می‌شود. بنابراین بخشی از مقدار رادیکال OH موجود در ناحیه بین دو جبهه شعله باعث فعال بودن واکنش‌های R16 و R21 می‌شود که در طی این واکنش‌ها، گونه‌های سنگین H_2O_2 و H_2O و HO_2 تولید می‌شوند. اما از آنجایی که رادیکال H تنها در نزدیکی جبهه شعله وجود دارد واکنش‌های مرتبط با رادیکال H تنها در نزدیکی جبهه شعله فعال می‌شوند. همانطور که مشاهده می‌شود واکنش‌های R17 و R18 که مربوط به مصرف رادیکال H هستند نزدیک جبهه شعله فعال می‌باشند. در نمودار آهنگ واکنش این واکنش‌ها برای جبهه شعله انتشاری به سمت پایین دست جریان دو قله مشاهده می‌شود که یک قله مربوط به جبهه شعله و قله دیگر مصرف گونه H را در پشت جبهه شعله تحت تأثیر واکنش با گونه H_2O_2 نشان می‌دهد در حالیکه در جبهه شعله در حرکت به سمت بالا دست تنها یک قله مشاهده می‌شود که علت آن را

- [9] Jackson T. L., Buckmaster J., Lu Z., Kyritsis D. C., Massa L., "Flames in narrow circular tubes", Proc. Combust. Inst., vol. 31, no. 1, pp. 955–962, 2007.
- [10] Nakamura H., Fan A., Minaev S., Sereshchenko E., Fursenko R., Tsuboi Y., 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, Apr. 2012.
- [11] Alipoor A., Mazaheri K., shamounipour A., "Dynamics of lean hydrogen/air flame regimes in micro scale combustion", Modares Mechanical Engineering, 14(3), 2014, pp. 94-102. (in Farsi)
- [12] Alipoor A., Mazaheri K., "Studying the repetitive extinction-ignition dynamics for lean premixed hydrogen-air combustion in a heated microchannel", International Journal of Energy (accepted manuscript).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.027>
- [13] Tsuboi Y., Yokomori T., Maruta K., "Lower limit of weak flame in a heated channel", Proc. Combust. Inst., vol. 32, no. 2, pp. 3075–3081, 2009.
- [14] Yetter R. A., Dryer F. L., Rabitz H., "A Comprehensive Reaction Mechanism for Carbon Monoxide/Hydrogen/Oxygen Kinetics", Combust. Sci. Technol., vol. 79, pp. 97–128, 1991.
- [15] "Transport: A Software package for the evaluation of gas-phase, multi component transport properties", 2000.

شعله افزایش می‌یابد و همچنین مقدار کسر جرمی گونه‌های H_2O_2 و HO_2 ثابت می‌ماند در حالیکه مقدار کسر جرمی گونه‌های سبک نظیر O ، OH ، H و H_2 در ناحیه بین دو جبهه شعله به علت کمبود سوخت به شدت کاهش می‌یابد. با بررسی متغیر آهنگ واکنش برای واکنش‌های مختلف مشاهده شد که با حضور گونه اکسیژن در ناحیه بین دو جبهه شعله ناشی از جریان برگشتی واکنش‌های مربوط به گونه‌های H_2O ، H_2O_2 و HO_2 فعال‌تر می‌شوند و با جذب انرژی توسط گونه‌های سنگین، کاهش دما و دوشاخگی جبهه شعله اتفاق می‌افتد. در بخش انتهایی رفتار سرعت انتشاری جبهه شعله برای نسبت‌های هم ارزی مختلف بررسی گردید. با افزایش نسبت هم ارزی جبهه شعله با سرعت بیشتری و در مدت زمان کمتری وارد ناحیه خاموشی می‌شود. نکته قابل توجه این است که برای جبهه شعله انتشاری در پایین دست جریان در نسبت هم ارزی 0.6، دوشاخگی دیگری نیز مشاهده می‌شود.

مراجع

- [1] Maruta K., Kataoka T., Il Kim N., Minaev S., Fursenko R., "Characteristics of combustion in a narrow channel with a temperature gradient", Proc. Combust. Inst., vol. 30, no. 2, pp. 2429–2436, 2005.
- [2] Richecoeur F., 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.
- [3] Pizza G., Frouzakis C. E., Mantzaras J., Tomboulides A. G., Boulouchos K., "Dynamics of premixed hydrogen/air flames in micro channels", Combust. Flame, vol. 155, no. 1, pp. 2–20, 2008.
- [4] Pizza G., Frouzakis C. E., Mantzaras J., Tomboulides A. G., Boulouchos K., "Dynamics of premixed hydrogen / air flames in microchannels", Combust. Flame, vol. 152, no. 3, pp. 433–450, 2008.
- [5] Pizza G., Frouzakis C. E., Mantzaras J., Tomboulides a. G., Boulouchos K., "Three-dimensional simulations of premixed hydrogen/air flames in microtubes", J. Fluid Mech., vol. 658, pp. 463–491, 2010.
- [6] Fan Y., Suzuki Y., Kasagi N., "Experimental study of micro-scale premixed flame in quartz channels", Proc. Combust. Inst., vol. 32, no. 2, pp. 3083–3090, 2009.
- [7] Fan A., Minaev S. S., Sereshchenko E. V, Tsuboi Y., Oshibe H., Nakamura H., Maruta K., "Dynamic Behavior of Splitting Flames in a Heated Channel", Combust. Explos. Shock Waves, vol. 45, no. 3, pp. 245–250, 2009.
- [8] 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.