

مطالعه عددی تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی مشخصه‌های دینامیک خاموشی - اشتعال مکرر برای احتراق پیش مخلوط رقیق هیدروژن/هوا در یک میکرو کانال گرم شونده

علیرضا علی پور^۱ و کیومرث مظاهری^۲

۱- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، alipoor.alireza@gmail.com

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس (نویسنده مخاطب)، kiumars@modares.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۳/۳/۲۷، پذیرش: ۹۳/۷/۲۸)

چکیده: در تحقیق حاضر، تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی مشخصه‌های پدیده خاموشی-اشتعال مکرر برای مخلوط رقیق هیدروژن-هوا (با نسبت هم‌ارزی ۰/۵) در یک میکروکانال، تحت گرادیان دمایی معین، به صورت عددی بررسی شده است. در شبیه‌سازی عددی از فرمول بندی عدد ماخ پایین، سینتیک تفصیلی و ضرایب نفوذ مولکولی مختلف برای گونه‌ها استفاده شده است. با استفاده از پارامترهای دامنه و فرکانس استخراج شده از میدان جریان، مشخصه‌های این پدیده مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جریان ورودی، دامنه پدیده خاموشی-اشتعال مکرر افزایش می‌یابد، در حالی که فرکانس آن رفتاری کاهش-افزایشی دارد. به منظور مطالعه دقیق‌تر این پدیده، تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر از دیدگاه واکنش‌های شیمیایی با استفاده از متغیر نرخ واکنش بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در سرعت‌های بالای جریان ورودی، واکنش‌های تولید گونه‌های سبک‌تر نظیر O ، H و OH غلبه دارند، در حالی که در سرعت‌های پایین جریان ورودی، واکنش‌ها به تولید گونه‌های سنگین نظیر H_2O ، HO_2 و H_2O_2 تمایل بیشتری دارند. همچنین، تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی سرعت جبهه شعله انتشاری بررسی شده است. در سرعت‌های پایین جریان ورودی، شعله در مدت زمان بیشتری از یک چرخه مشاهده می‌شود، در حالی که در سرعت‌های جریان ورودی بالاتر، شعله سریع‌تر وارد ناحیه خاموشی می‌شود.

کلیدواژگان: احتراق در مقیاس میکرو، رژیم خاموشی - اشتعال مکرر، دامنه، فرکانس، نرخ واکنش

مقدمه

با توجه به دانسیته انرژی بالای سوخت هیدروژن و سوخت‌های هیدروکربنی، استفاده گسترده از این سوخت‌ها در وسایل تولید انرژی در مقیاس میکرو و مزو در آینده‌ای نزدیک پیش‌بینی می‌شود. همین موضوع بررسی پدیده‌های احتراق در مقیاس‌های میکرو و مزو را ضروری می‌سازد. انتشار شعله در محفظه‌های احتراقی میکرو و مزو در کارهای آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی مختلفی بررسی شده است. دینامیک‌های احتراقی مختلفی برای انتشار شعله در محفظه‌های میکرو و مزو گزارش شده است. احتراق بدون شعله^۱ [۲،۱]، احتراق خاموشی-اشتعال مکرر^۲ [۴،۳]، شعله پایای متقارن^۳ [۶،۵]، شعله پایای نامتقارن^۴ [۷،۸،۲] و شعله‌های لاله‌ای شکل^۵ [۱۰،۹] از جمله رژیم‌هایی است که در این مقیاس مشاهده شده است.

1. Mild or flameless combustion
2. Periodic repetitive ignition/extinction
3. Steady symmetric flame
4. Steady asymmetric flame
5. Tulip flame

ماروتا و همکاران انتشار شعله متان-هوا و پروپان-هوا را در میکروکانال‌های گرم‌شونده مستقیم و U شکل با قطر داخلی ۲ میلی‌متر به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند [۱]. آن‌ها 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 کردند. رژیم پایای متقارن و رژیم ناپایای خاموشی-اشتعال مکرر در کار آزمایشگاهی ریچکور و کریستیس بر روی انتشار شعله متان-هوا در کانال‌های منحنی با قطرهای داخلی متفاوت بررسی شد [۳]. در کار ایشان نشان داده شد که انحنای کانال تاثیر ویژه‌ای بر روی ضخامت شعله و پایداری احتراق خواهد داشت. پیزا و همکارانش با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)، احتراق مخلوط رقیق هیدروژن-هوا (با نسبت هم‌ارزی ۰/۵) را در میکروکانال‌های گرم‌شونده به صورت دوبعدی [۱۱،۸] و سه‌بعدی [۲]، بررسی کردند. در کار آن‌ها، رژیم‌های احتراق پایای بدون شعله، رژیم خاموشی-اشتعال مکرر و رژیم پایای متقارن، رژیم پایای نامتقارن و همچنین رژیم‌های گذرا، نظیر رژیم نوسانی، گزارش شد، اما در مورد جزئیات و یا علت ایجاد این رژیم‌ها بحث مفصلی انجام نشده است.

فن و همکاران [۱۲،۱۴]، 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 هم‌ارزی و سرعت‌های ورودی مختلف به دست آمد. مطالعات ایشان نشان می‌دهند محدوده شعله‌وری با کاهش عرض کانال باریک‌تر، و با افزایش دمای دیوار کانال پهن‌تر می‌شود.

ماروتا و همکاران، براساس تحلیل خطی پایا، نوسانات شعله و مشخصه‌های احتراق پیش‌آمیخته استوکیومتری متان-هوا را در یک میکروکانال گرم‌شونده بررسی کردند [۱]. ماینوف و همکاران رفتار انتشار شعله پیش‌آمیخته متان-هوا را با استفاده از معادله یک‌بعدی نفوذ-حرارتی مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. جکسون و همکاران [۴] برای حل تحلیلی فرایند خاموشی اشتعال شعله از مدل ریاضی شامل معادله دما برای فاز گازی، واکنش تک‌مرحله‌ای 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 ساده‌کننده و قابل قبولی نشان داده شده است. اما در هیچ یک از این کارها، اشاره‌ای در مورد جزئیات و قابلیت این روش‌ها برای بیان جزئیات این پدیده نشده است.

کردیمف و همکاران [۱۶]، دینامیک شعله‌های پیش‌مخلوط با عدد لوئیس واحد را در کانال‌های دوبعدی با دمای دیوار ثابت با استفاده از روش‌های عددی براساس مدل نفوذ-حرارتی و شیمی یک‌مرحله‌ای بررسی کردند. در کار ایشان تاثیر ارتفاع کانال، دمای دیوار و سرعت جریان ورودی بر روی پایداری و دینامیک شعله بررسی شد. در مطالعه عددی دیگر [۱۷] ناکامورا و همکاران جزئیات رفتار پدیده خاموشی-اشتعال مکرر را برای مخلوط استوکیومتری متان-هوا در یک کانال تحت گرادیان دمایی معین بررسی کردند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که برای مخلوط متان-هوا، دوشاخه شدن شعله، دو بار اتفاق می‌افتد. اولین دوشاخه شدن شعله، هنگام انتشار شعله اتفاق می‌افتد. سوخت متان به طور کامل در یکی از جبهه‌های شعله مصرف می‌شود، در حالی که CO در محدوده گسترده‌ای پشت جبهه شعله بدون واکنش باقی می‌ماند. هنگامی که واکنش‌ها ضعیف می‌شوند. جبهه شعله برای دومین بار به دوشاخه تبدیل می‌شود که ناشی از حضور گونه‌های میانی نظیر CH_3 ، CO، H و OH در پایین دست جریان است. در این کار، برای شبیه‌سازی مخلوط استوکیومتری متان-هوا از مدل یک‌بعدی بر مبنای مدل نفوذ حرارت شامل معادلات پیوستگی، بقای انرژی و بقای گونه‌ها استفاده شده است.

با مروری بر کارهای انجام‌شده، مشاهده می‌شود که یکی از رژیم‌های اصلی احتراق در مقیاس میکرو، رژیم خاموشی-اشتعال مکرر است که در کارهای مختلف آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی به آن اشاره شده است. اما تنها در مرجع [۱۷] فیزیک

حاکم بر این پدیده با استفاده از مدل یک‌بعدی نفوذ-حرارتی برای مخلوط استوکیومتری متان-هوا بررسی شده است. در این مرجع رفتار پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با استفاده از متغیر نرخ آزاد شدن حرارت، دما و کسر مولی گونه‌های مختلف بررسی شده است. استفاده از مدل یک بعدی نفوذ-حرارتی می‌تواند تاثیر بسزایی بر روی دینامیک‌های شعله بگذارد و مشاهده رفتارهایی نظیر لاله‌ای شکل شدن جبهه شعله و بررسی علت جدایش جبهه شعله امکان‌پذیر نیست. بنابراین، شبیه‌سازی دقیق‌تر پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با استفاده از معادلات بقایی شامل بقای جرم، تکانه، انرژی و گونه‌ها و در نظر گرفتن حداقل دو بعد نیاز است.

در کار اخیر نگارندگان مقاله [۱۸]، انتشار شعله هیدروژن-هوا درون یک میکروکانال گرم‌شونده به صورت عددی با استفاده از معادلات بقایی (شامل بقای جرم، تکانه، انرژی و گونه‌ها) بررسی شد. در این کار، با تغییر سرعت جریان ورودی، رژیم‌های خاموشی-اشتعال مکرر، رژیم پایای متقارن و رژیم پایای نامتقارن مشاهده شد. در سرعت‌های پایین و در نزدیکی حد شعله‌وری پایین، رژیم خاموشی-اشتعال مکرر مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت جریان ورودی و برقراری تعادل بین سرعت جریان ورودی و سرعت سوزش شعله، شعله پایای متقارن مشاهده می‌شود. با افزایش بیشتر سرعت جریان ورودی، شعله ناپایدار می‌شود و شعله‌های پایای نامتقارن درون کانال شکل می‌گیرد. در کار دیگر [۱۹]، توسط همین گروه، پدیده خاموشی-اشتعال مکرر به صورت جزیی با استفاده از نمودارهای دما، کسر مولی گونه‌های H_2 ، O_2 ، OH و H_2O و همچنین نمودارهای نرخ آزاد شدن حرارت برای فازهای مختلف بررسی شد. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهند که در فازهای انتشار و واکنش‌های ضعیف سه قله برای نرخ آزاد شدن حرارت و در فازهای آغازش، اشتعال و جریان دو قله برای نرخ آزاد شدن حرارت مشاهده می‌شود. همچنین، با استفاده از بردارهای سرعت نشان داده شد که ایجاد گردابه‌ها در نزدیکی دیوار باعث جدایش جبهه شعله می‌شود.

در کار حاضر، تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی مشخصه‌های احتراقی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر در میکروکانال‌های گرم‌شونده بررسی می‌شود. برای شبیه‌سازی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر از معادلات بقایی با فرمول‌بندی عدد ماخ پایین و به صورت دوبعدی استفاده می‌شود. همچنین، سینتیک تفصیلی برای فاز گازی و ضرایب نفوذ مولکولی مختلف برای گونه‌های مختلف به کار گرفته می‌شود. از سوی دیگر، علی‌رغم اهمیت سوخت هیدروژن به عنوان سوختی با آلاینده‌گی کم و با توجه به اینکه تاکنون کار جامعی در مورد جزئیات پدیده خاموشی اشتعال مکرر در زمینه سوخت هیدروژن انجام نشده است، هدف دیگر این کار بررسی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر برای سوخت هیدروژن است.

در بخش اول مقاله، دینامیک کلی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با استفاده از کانتورهای رادیکال OH بررسی می‌شود. سپس، تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با استفاده از دو متغیر فرکانس و دامنه بررسی می‌شود. به منظور تبیین رفتار این دو متغیر، از نمودار تغییرات زمانی دما، H_2 به عنوان سوخت ورودی به محفظه احتراق، گونه OH به عنوان گونه فعال در جبهه شعله و گونه H_2O به عنوان محصولات استفاده می‌شود. به منظور مطالعه دقیق‌تر رفتار واکنش‌های مختلف، نرخ واکنش برای هر یک از واکنش‌ها استفاده می‌شود. پدیده خاموشی-اشتعال مکرر به ۵ فاز شامل فازهای آغازین، اشتعال، انتشار، واکنش‌های ضعیف و جریان تقسیم‌بندی می‌شود و نرخ واکنش برای هر یک از فازها در دو سرعت ورودی 10 cm/s و 0.5 cm/s مطالعه می‌شود. در بخش پایانی، تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی سرعت انتشاری جبهه شعله در پدیده خاموشی-اشتعال مکرر بررسی می‌شود. برای این بررسی از نمودارهای مکان بیشینه مقدار رادیکال H بر حسب زمان استفاده می‌شود.

در کار حاضر، یک میکروکانال گرم‌شونده با عرض ۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود که مخلوط هیدروژن-هوا با نسبت هم‌ارزی ۰/۵ به درون آن تزریق می‌شود. به منظور بررسی تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر، سرعت‌های جریان ورودی در محدوده 0.1 cm/s تا 10 cm/s در نظر گرفته شده است.

روش عددی

در کار حاضر، برای شبیه‌سازی احتراق در مقیاس کوچک، معادلات نویر استوکس به‌همراه معادله بقای انرژی و معادلات بقای گونه‌ها با استفاده از فرمول‌بندی عدد ماخ پایین حل می‌شوند [۲].

بقای جرم:

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

بقای تکانه:

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

در این روابط، ρ ، u ، μ به ترتیب دانسیته، بردار سرعت و گرانیوی دینامیکی‌اند. تانسور تنش (S) به صورت $\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)I$ بیان می‌شود که I ماتریس واحد است.

معادله انرژی در سیال:

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

در این رابطه، λ رسانش حرارتی مخلوط و c_p و h_i به ترتیب ظرفیت حرارتی و انتالپی گونه i ام هستند.

با توجه به آنچه که در بالا گفته شد، می‌توان بیان کرد که در جریان‌های با عدد ماخ پایین $\hat{p}_d \ll \hat{p}_t$ ؛ پس معادله حالت گاز کامل به شکل زیر نوشته می‌شود:

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

\bar{W} وزن مولکولی میانگین مخلوط و R ثابت گاز ایدئال است.

معادله بقا 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، $\dot{\omega}_i$ نرخ تشکیل و یا ازبین رفتن گونه شیمیایی i در اثر واکنش‌ها، و Y_i ، V_i به ترتیب کسر جرمی و بردار سرعت نفوذی است.

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

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

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

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

v_{ij}' و v_{ij}'' ضرایب استوکیومتری واکنش‌های رفت و برگشت برای i گونه و j واکنش است و q_i نرخ واکنش برای هریک از واکنش‌هاست.

سرعت نفوذ گونه‌ها V_i به صورت زیر محاسبه می‌شود.

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

که V_i^* از تئوری سینتیک گازها به دست می‌آید. V_c به عنوان تصحیح‌کننده بقای جرم کل بیان می‌شود [۲].

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

D_{mi} ، نفوذ گونه i در مخلوط و $X_i=Y_i W/W_i$ کسر مولی است. برای محاسبه ضریب نفوذ جرمی دوتایی گونه i در گونه j ، از رابطه چپمن-انسکگ^۱ استفاده می‌شود [۲۰].

یکی از هندسه‌های متداول برای بررسی احتراق در مقیاس کوچک، میکروکانال گرم‌شونده است که در کارهای مختلفی از جمله مراجع [۲]، [۱۷]، [۲۱] استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در این هندسه بخشی از کانال به‌عنوان بخش مورد آزمایش در نظر گرفته می‌شود و دمای دیواره‌های آن با استفاده از منبع خارجی افزایش داده می‌شود. در کار حاضر، عرض کانال یک میلی‌متر و طول کانال ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ۱۰ میلی‌متر انتهای کانال به‌عنوان بخش مورد بررسی در نظر گرفته شده است و توزیع دمای نشان داده شده در شکل ۱ بر روی آن قرار گرفته است. به‌طوری که بر روی یک بیستم ابتدای بخش مورد بررسی کانال، توزیع دما به‌صورت تانژانت هاپرپولیک از دمای ورودی ($T_{in}=300$ K) تا دمای ۹۶۰ کلوین و بعد از آن دمای ثابت ۹۶۰ کلوین است. این توزیع دما براساس مرجع [۱۱] در نظر گرفته شده است. مخلوط هیدروژن و هوا با نسبت هم‌ارزی ۰/۵ از یک سمت کانال وارد می‌شود. 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 صفر برای گونه‌ها ($\frac{dY}{dn} = 0$) بر روی دیوار تنظیم می‌شود. برای خروجی کانال نیز مقدار گرادیان صفر ($\frac{dY_i}{dn} = 0$ و $\frac{du}{dn} = 0$) برای متغیرها در نظر گرفته می‌شود.

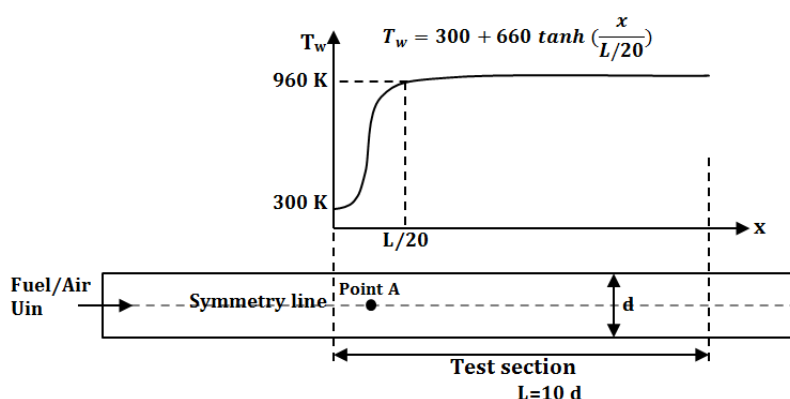


Figure 1- The schematic of heated micro channel with temperature distribution on the external walls [11]

شکل ۱- طرحواره مسئله مورد بررسی به همراه توزیع دمای دیوار [۱۱]

برای سینتیک فاز گازی از مکانیزم ۹ گونه‌ای و ۲۷ واکنشی یترو همکاران [۲۲] استفاده شده است که در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین، برای محاسبه ضرایب نفوذ مولکولی از اطلاعات انتقال مولکولی نرم‌افزار کمکین [۲۳] استفاده شده است. برای حل مسئله، از بسته نرم‌افزاری منبع باز این‌فوم^۲ و از حلگر ReactingFoam برای شبیه‌سازی جریان‌های واکنشی استفاده می‌شود که البته با توجه به نیازهای مسئله حاضر تغییراتی در آن داده شده است. این تغییرات شامل استفاده از فرمول‌بندی عدد ماخ پایین، محاسبه ضرایب نفوذ مولکولی برای گونه‌های مختلف و افزودن جمله‌های مرتبط با نفوذ مولکولی در معادلات انرژی و بقای گونه‌هاست.

به منظور بررسی حلگر ایجادشده و تعیین تعداد سلول مورد نیاز برای شبیه‌سازی انتشار شعله، ساختار شعله یک‌بعدی حاصل از شبیه‌سازی توسط حلگر ایجادشده با نتایج استخراج‌شده از نرم‌افزار کمکین مقایسه شود. به همین منظور، یک دامنه محاسباتی دوبعدی در نظر گرفته شد که برای مرزهای بالا و پایین آن شرط‌های مرزی پریودیک در نظر گرفته شده است.

1. Chapman-Enskog
2. OpenFOAM

سرعت جریان ورودی برابر با سرعت شعله آرام محاسبه شده توسط کد PREMIX نرم افزار کمکین در نظر گرفته می شود. شکل ۲ تغییرات سرعت و دما را در امتداد محور کانال یک بعدی برای مخلوط هیدروژن-هوا با نسبت هم‌ارزی ۰/۵ نشان می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده سرعت سوزش شعله آرام برای مخلوط هیدروژن-هوا با نسبت هم‌ارزی ۰/۵ برابر با ۶۰ cm/s است. دمای شعله به دمای بی درروی ۱۵۸۰ K می رسد. نتایج به دست آمده از شبیه سازی توسط نرم افزار این فوم و کد کمکین انطباق مناسب دارند. تغییرات کسر جرمی گونه های مختلف در امتداد محور کانال در شکل ۳ نشان داده شده است که توسط مقدار بیشینه هریک، بی بعد شده اند.

جدول ۱- سینتیک شیمیایی جزئی برای احتراق H_2-O_2 توسط یتر و همکاران [۲۲]Table 1: Detailed reaction mechanism for H_2/O_2 by Yetter et al. [22]

No.	Reaction	A(mole.cm.K.s)	n	E (kcal/mole)
H2-O2 Chain Reactions				
R1	H+O2=O+OH	1.94E+14	0.0	16440
R2	O+H2=H+OH	5.080E+04	2.67	6290
R3	H2+OH=H2O+H	2.16E+08	1.51	3430
R4	O+H2O=OH+OH	2.95E+06	2.02	13400
H2-O2 Dissociation/Recombination Reactions				
R5	H2+M=H+H+M H2O/12.0/ H2/2.5/	4.570E+19	-1.40	104000
R6	O+O+M=O2+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=H2O+M H2O/12.0/ H2/2.5/	2.24E+22	-2.0	0
Formation and Consumption of HO2				
R9	H+O2(+M)=HO2(+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	HO2+H=H2+O2	6.62E+13	0.0	2130
R11	HO2+H=OH+OH	1.69E+14	0.0	874
R12	HO2+O=OH+O2	1.75E+13	0.0	-397
R13	HO2+OH=H2O+O2	1.90E+16	-1.0	0.0
Formation and Consumption of H2O2				
R14	HO2+HO2=H2O2+O2 DUP	4.200E+14	0.0	11980
R15	HO2+HO2=H2O2+O2 DUP	1.30E+11	0.0	-1629
R16	H2O2(+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	H2O2+H=H2O+OH	1.0E+13	0.0	3590
R18	H2O2+H=HO2+H2	4.820E+13	0.0	7950
R19	H2O2+O=OH+HO2	9.64E+06	2.0	3970
R20	H2O2+OH=H2O+HO2 DUP	1.000E+12	0.0	0
R21	H2O2+OH=H2O+HO2 DUP	5.800E+14	0.0	9557

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 هم‌ارزی ۰/۵ مقدار ۰/۳۹ mm محاسبه می شود. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل های ۲ و ۳، مشاهده می شود با در نظر گرفتن ۱۵ سلول محاسباتی درون جبهه شعله می توان به خوبی جبهه شعله را شبیه سازی کرد. بنابراین، سلول های در نظر گرفته شده برای شبیه سازی پدیده انتشار شعله درون کانال $25\mu m * 25\mu m$ است.

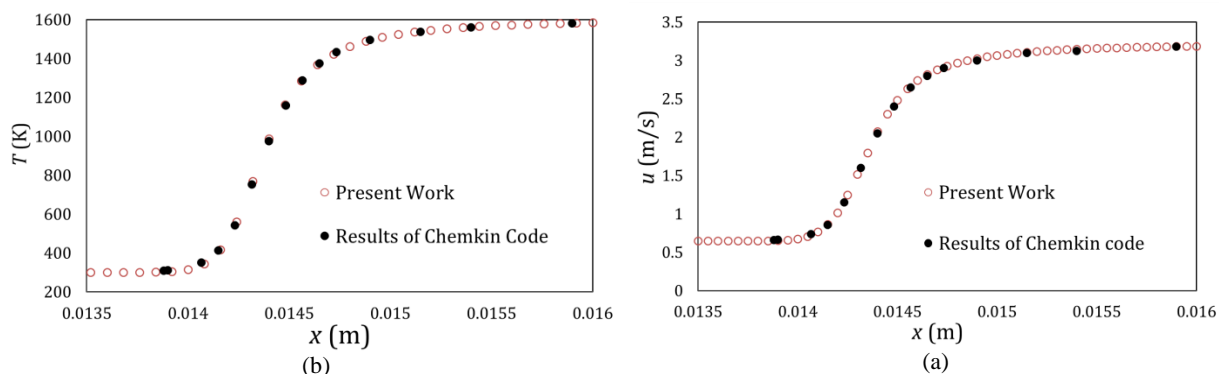


Figure 2- Variation of velocity (a) and temperature (b) along symmetry line of channel for Hydrogen-air mixture ($\phi=0.5$); comparison CHEMKIN code with OpenFOAM

شکل ۲- تغییرات سرعت (الف) و دما (ب) در امتداد محور کانال یک بعدی برای مخلوط هیدروژن-هوا با نسبت هم ارزی ۰/۵، مقایسه کد کمکین و نرم افزار اپن فوم

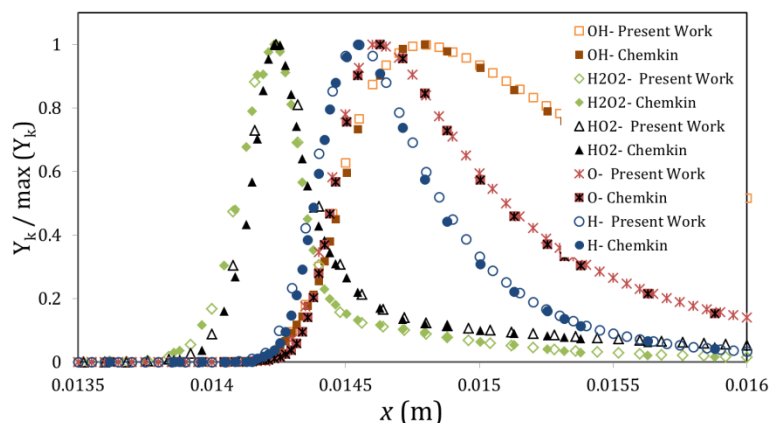


Figure 3- Variation of species mass fraction along symmetry line of channel for Hydrogen-air mixture ($\phi=0.5$); comparison CHEMKIN code with OpenFOAM

شکل ۳- تغییرات کسر جرمی گونه های مختلف در امتداد محور کانال یک بعدی برای مخلوط هیدروژن-هوا با نسبت هم ارزی ۰/۵، مقایسه نتایج کد کمکین و نرم افزار اپن فوم

نتایج و بحث

برای بیان دینامیک پدیده خاموشی-اشتعال، ابتدا دینامیک کلی این پدیده با استفاده از کانتورهای کسر جرمی گونه OH به عنوان گونه فعال در ناحیه واکنش بررسی می شود. تاثیر سرعت جریان ورودی با استفاده از دو متغیر فرکانس و دامنه بررسی می شود که این متغیرها با استفاده از نمودار تغییرات دما با زمان به دست می آید. همچنین، برای بحث بر روی متغیرهای دامنه و فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر از نمودارهای تغییرات زمانی گونه های H_2 ، OH و H_2O استفاده می شود. برای بحث دقیق تر بر روی تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر، از نرخ واکنش برای واکنش های گوناگون استفاده می شود. پدیده خاموشی-اشتعال مکرر به ۵ فاز شامل فازهای آغازین، اشتعال، انتشار، واکنش های ضعیف و جریان تقسیم بندی می شود [۱۷] و رفتار نرخ واکنش برای هر یک از واکنش ها در فازهای مختلف بر روی محور تقارن کانال بررسی می شود. در بخش انتهایی، تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با استفاده از نمودارهای تغییرات مقدار ماکزیمم گونه H با زمان و تغییرات مکان مقدار ماکزیمم گونه H با زمان بررسی می شود. با استفاده از این متغیر می توان

میزان سرعت جبهه شعله و همچنین نواحی خاموشی و اشتعال شعله را مشخص کرد. برای این بررسی سرعت جریان ورودی در محدوده $0/1 \text{ cm/s}$ تا 10 cm/s در نظر گرفته شده است. با توجه به عدد رینولدز محاسبه شده می توان از آرام بودن جریان اطمینان حاصل کرد.

دینامیک پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با استفاده از کانتور رادیکال OH

برای سرعت های جریان ورودی در نزدیکی حد شعله وری پایین، فرایند دوره ای از اشتعال و خاموشی برای شعله مشاهده می شود. کانتورهای کسر جرمی رادیکال OH برای کانالی با عرض 1 mm ، سرعت جریان ورودی 10 cm/s و مخلوط با نسبت هم آرزوی $0/5$ در شکل ۴ نشان داده شده است. مخلوط هیدروژن-هوا تحت تاثیر دمای بالای دیوار محترق می شود و در نزدیکی دیوار واکنش ها آغاز می شوند، (فاز آغازش) (شکل ۴-الف). با ایجاد رادیکال های آزاد در نزدیکی دیوار، واکنش ها شدت می یابند و مقدار بیشینه کسر جرمی رادیکال OH بر روی محور تقارن کانال قرار می گیرد (فاز اشتعال) (شکل ۴-ب). سپس، جبهه شعله به دو بخش تقسیم می شود و به سمت بالادست و پایین دست جریان منتشر می شود (فاز انتشار) (شکل ۴-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 باقی مانده از چرخه قبلی محترق می شوند (شکل ۴-د). با سرد شدن جبهه شعله انتشاری به بالادست جریان و همچنین مصرف سوخت توسط جبهه انتشاری به پایین دست جریان، شدت واکنش ها کاهش می یابد (فاز واکنش های ضعیف) (شکل ۴-ه). با گذشت زمان، مخلوط نسوخته هیدروژن-هوا مجدداً به محفظه احتراق وارد می شود (فاز جریان) (شکل ۴-و) و چرخه بعدی خاموشی-اشتعال آغاز می شود.

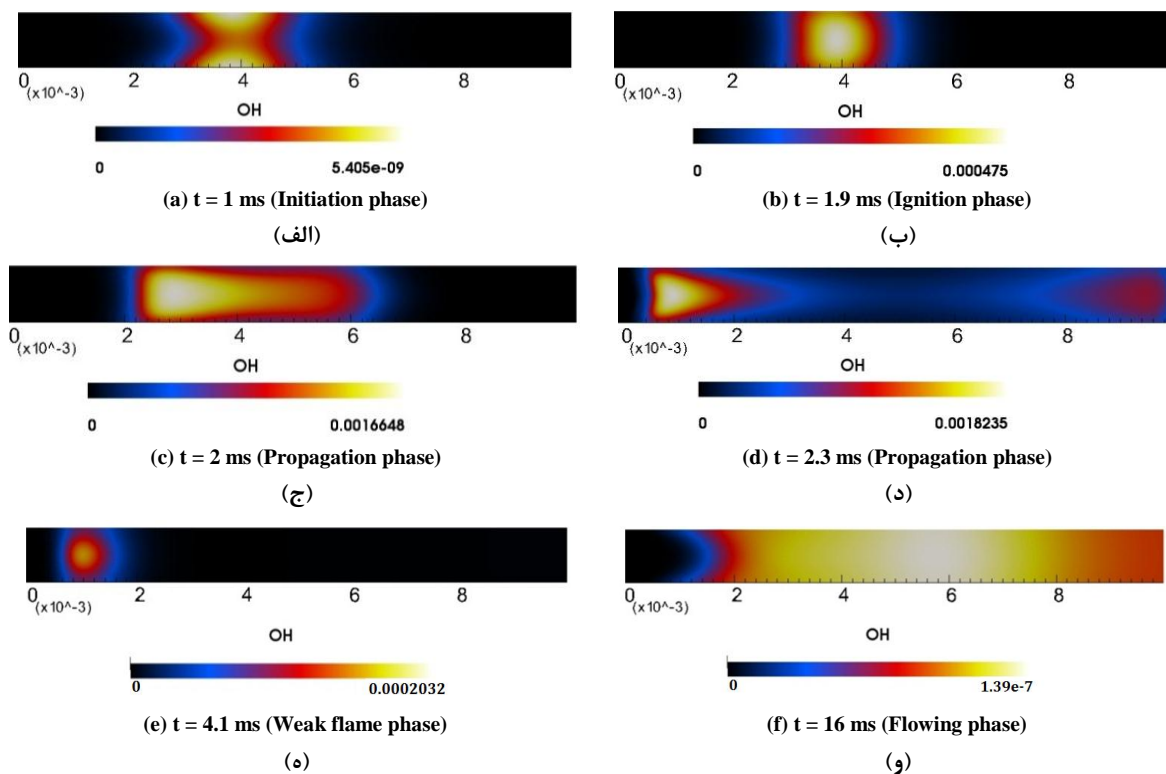


Figure 4- Repetitive extinction-ignition dynamics using OH mass fraction (Y_{OH})
(channel width = 1 mm , inlet velocity = 10 cm/s and equivalence ratio = 0.5)

شکل ۴- کانتور کسر جرمی رادیکال OH در زمان های مختلف در رژیم خاموشی-اشتعال مکرر برای سرعت جریان ورودی 10 cm/s و نسبت هم آرزوی $0/5$ در کانالی با عرض 1 mm

تأثیر سرعت ورودی بر مشخصه‌های پدیده خاموشی-اشتعال مکرر

در این بخش، تأثیر سرعت جریان ورودی بر مشخصه‌های پدیده خاموشی-اشتعال مکرر بررسی می‌شود. برای این منظور، تغییرات زمانی یک نقطه مشخص از میدان (در فاصله یک میلی‌متری از ابتدای بخش آزمایش و بر روی محور تقارن کانالی با عرض 1 mm) بررسی شده است (شکل ۵).

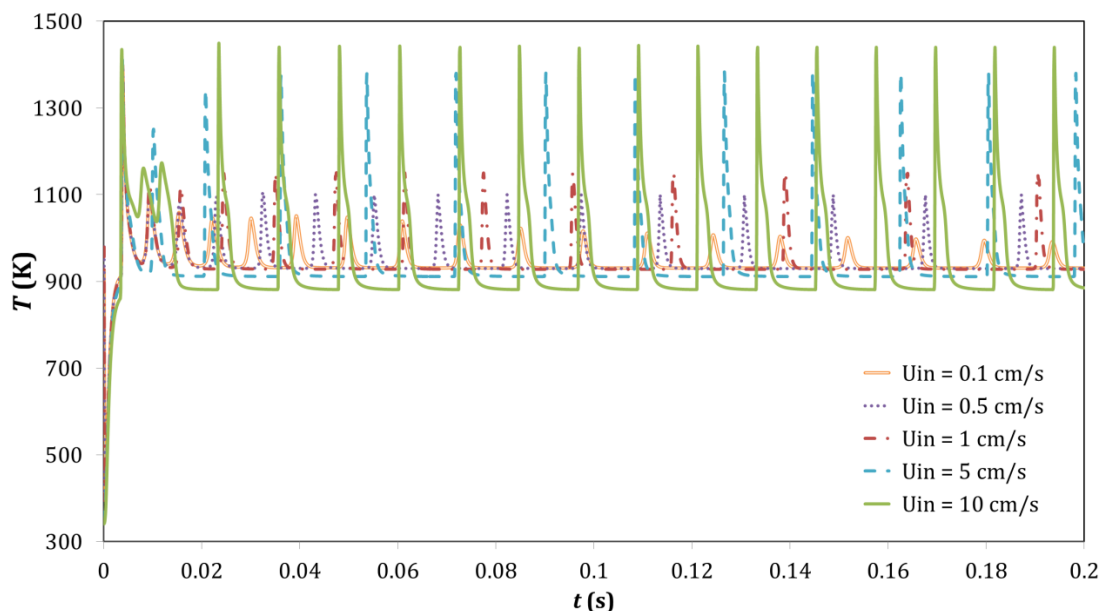


Figure 5- Temporal variation of temperature of point A for different inlet velocities (channel width=1mm and equivalence ratio=0.5)

شکل ۵- تغییرات زمانی دما برای یک نقطه مشخص در جریان در سرعت‌های جریان ورودی مختلف (کانال با عرض 1 mm و نسبت هم‌ارزی هیدروژن-هوا برابر با ۰/۵)

در زمان‌های اولیه، دمای جریان تحت تأثیر دمای دیوارها افزایش می‌یابد و دمای نقطه تعیین‌شده از مقدار ۳۰۰ کلوین به ۹۶۰ کلوین می‌رسد. با گذشت زمان، با توجه به سرعت‌های مختلف برای جریان ورودی و همچنین سردبودن جریان ورودی و نیاز به گرم‌شدن آن توسط دیوار، در ابتدای پدیده خاموشی-اشتعال مکرر، پدیده‌های ناپایای مختلف و تصادفی مشاهده می‌شود. برای جریان با سرعت ورودی ۱۰ cm/s بعد از مشاهده دو قله دمایی با دمای حدوداً ۱۱۵۰ کلوین، فرایند دوره‌ای و منظم خاموشی و اشتعال شعله آغاز می‌شود. در سرعت‌های کمتر جریان ورودی، پدیده دوره‌ای منظم خاموشی-اشتعال شعله سریع‌تر اتفاق می‌افتد. با صرف‌نظر کردن از پدیده‌های ابتدایی و تصادفی شعله، دو پارامتر فرکانس و دامنه برای بیان کمی مشخصه‌های این پدیده به کار برده می‌شود. دامنه نوسان به صورت اختلاف بین دمای بیشینه جریان و دمای بیشینه دیوار در فرایند خاموشی-اشتعال شعله تعریف می‌شود. همچنین، نسبت معکوس بازه زمانی بین دو قله دما در فرایند خاموشی-اشتعال، فرکانس این پدیده در نظر گرفته می‌شود.

تغییرات دامنه و فرکانس برای سرعت‌های مختلف جریان ورودی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. خطوط پر نشان‌دهنده تغییرات دامنه و فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر در سرعت‌های جریان ورودی مختلف برای کار حاضر و خطوط خط‌چین، نشان‌دهنده تغییرات دامنه و فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر در سرعت‌های جریان ورودی مختلف برای شبیه‌سازی مستقیم انجام‌شده توسط پیزا و همکاران [۱۱] است. با ارزیابی نتایج به‌دست آمده از کار حاضر در مقایسه با شبیه‌سازی مستقیم پیزا و همکاران [۱۱] مشاهده می‌شود که نتایج کار حاضر از دقت قابل قبولی برخوردارند. برای سرعت

ورودی 10 cm/s فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر مقدار 92 Hz محاسبه شد که با مقدار ارائه شده در شبیه سازی مستقیم توسط پیزا و همکاران ($106/9 \text{ Hz}$) حدود 14% درصد اختلاف دارد. مقدار دامنه این پدیده نیز 584 کلوین است که نسبت به کار پیزا و همکاران (618 کلوین) در حدود $5/5\%$ درصد اختلاف وجود دارد که با توجه به ناپایا بودن پدیده و همچنین شرایط مختلف روش حل عددی، مقدار خطای قابل قبولی است.

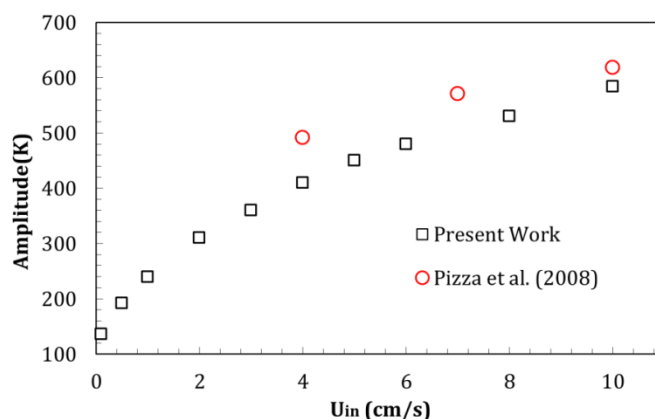


Figure 6- Variation of FREI amplitude with inlet velocity (channel width = 1 mm and equivalence ratio = 0.5)

شکل ۶- تغییرات دامنه پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با سرعت ورودی (کانال با عرض 1 mm و نسبت هم‌ارزی هیدروژن-هوا برابر با $0/5$)

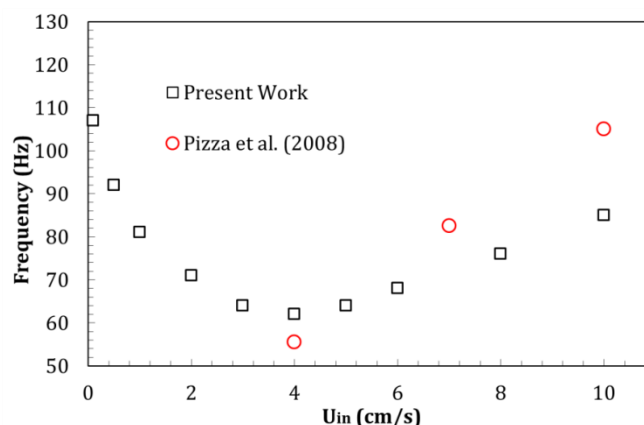


Figure 7- Variation of FREI frequency with inlet velocity (channel width = 1 mm and equivalence ratio = 0.5)

شکل ۷- تغییرات فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با سرعت ورودی (کانال با عرض 1 mm و نسبت هم‌ارزی هیدروژن-هوا برابر با $0/5$)

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۷، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت جریان ورودی از $0/1 \text{ cm/s}$ تا 10 cm/s ، مقدار دامنه از مقدار 136 کلوین تا مقدار 564 کلوین افزایش می‌یابد. در سرعت‌های جریان ورودی پایین، مقیاس زمانی اقامت سیال افزایش می‌یابد. بنابراین، میزان اتلاف حرارت از محفظه بیشتر می‌شود. با افزایش میزان اتلاف حرارت از محفظه احتراق، دمای بیشینه شعله کاهش می‌یابد که این امر باعث می‌شود در سرعت‌های جریان ورودی پایین، دامنه کمتری برای شعله مشاهده شود.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تغییرات فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر، برای سرعت‌های جریان ورودی مختلف، رفتاری کاهش-افزایشی دارد. در سرعت‌های جریان ورودی کمتر از 5 cm/s با افزایش سرعت جریان ورودی، فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر کاهش می‌یابد. در حالی که برای سرعت‌های جریان ورودی بیشتر از 5 cm/s با افزایش سرعت جریان ورودی، فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر همواره افزایش می‌یابد. همان‌طور که بیان شد، با افزایش سرعت جریان ورودی، دامنه پدیده خاموشی-اشتعال مکرر همواره افزایش می‌یابد. بدین مفهوم که با افزایش سرعت جریان ورودی، دمای بیشینه شعله افزایش می‌یابد. با افزایش دمای بیشینه شعله سرعت سوزش شعله نیز افزایش می‌یابد که باعث حرکت سریع‌تر جبهه شعله به بالادست و پایین‌دست جریان می‌شود. با حرکت جبهه شعله به سمت پایین‌دست جریان، مخلوط سوخت و هوای موجود سریع‌تر مصرف می‌شود و شعله سریع‌تر خاموش می‌شود. همچنین، در حرکت جبهه شعله به سمت بالادست جریان، شعله سریع‌تر به مخلوط سرد ورودی می‌رسد و سریع‌تر دمای جبهه شعله افت پیدا می‌کند. بنابراین، زمان کمتری برای انجام یک چرخه خاموشی-اشتعال نیاز است و فرکانس این پدیده، با افزایش سرعت جریان ورودی، افزایش می‌یابد.

در سرعت‌های جریان ورودی کمتر از 5 cm/s مشاهده می‌شود که با کاهش سرعت جریان ورودی، فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر افزایش می‌یابد. دامنه پدیده خاموشی-اشتعال مکرر، با کاهش سرعت جریان ورودی کاهش می‌یابد؛ بدین مفهوم که دمای بیشینه جبهه شعله کاهش می‌یابد. با کاهش دمای جریان، سینتیک‌های دمایی پایین هیدروژن فعال می‌شوند و مخلوط ورودی تمایل بیشتری به تبدیل به گونه‌های سنگین‌تر نظیر رادیکال هیدروپروکسی HO_2 ، هیدروپروکساید H_2O_2 و آب دارد، در حالی که میزان گونه‌های سبک‌تر نظیر H ، O و OH ، که مربوط به سینتیک‌های دما بالاست، کاهش می‌یابد [۲]. در این حالت، به علت کمبود رادیکال‌های سبک درون محفظه برای آغاز واکنش‌های مربوط به تجزیه سوخت، بخشی از سوخت بدون انجام واکنش درون کانال باقی می‌ماند. بنابراین، توزیع یکنواخت‌تری از سوخت درون محفظه احتراق مشاهده می‌شود. در صورت ایجاد شرایط حرارتی، واکنش‌های شیمیایی گسترده‌تر اما با نرخ آزاد شدن حرارت کمتر درون کانال مشاهده می‌شوند که باعث ایجاد توزیع حرارتی یکنواخت‌تری می‌شود، اما، از آنجایی که گونه‌های سنگین‌تر در محفظه احتراق وجود دارند و تمایل به جذب حرارت بیشتری دارند، دمای بیشینه جریان تقریباً ثابت باقی می‌ماند. این شرایط به شرایط احتراق Mild نزدیک است. از آنجایی که اتلاف حرارت از محفظه به علت بالابودن مقیاس زمانی اقامت سیال بالاست، حرارت آزاد شده به سرعت اتلاف می‌شود و دمای شعله 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 پدیده خاموشی-اشتعال مکرر کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش میزان فرکانس این پدیده است. در این شرایط، شعله در جهت ایجاد شعله‌های پایا در نزدیکی حد شعله‌وری پایین حرکت می‌کند که به شعله‌های ضعیف^۱ معروف است و در کارهای مختلفی به آن اشاره شده است.

به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار شعله درون کانال، تغییرات گونه هیدروژن (H_2) به عنوان سوخت ورودی به محفظه، تغییرات رادیکال هیدروکسید (OH) به عنوان گونه فعال در جبهه شعله و نشان‌دهنده جبهه شعله و همچنین رفتار گونه آب (H_2O) به عنوان محصول واکنش با گذشت زمان برای یک نقطه مشخص در بالادست جریان درون کانال (در فاصله یک میلی‌متری از ابتدای بخش آزمایش و بر روی محور تقارن کانال) برای سرعت‌های ورودی مختلف در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت جریان ورودی، سوخت هیدروژن با شیب بیشتری مصرف می‌شود، به طوری که در سرعت جریان ورودی 0.1 cm/s کمترین شیب برای مصرف هیدروژن مشاهده می‌شود. اختلاف مقدار بیشینه و کمینه گونه H_2 ، با افزایش سرعت ورودی جریان، افزایش می‌یابد، به طوری که کاهش میزان سوخت H_2 در سرعت جریان ورودی 1.0 cm/s ، بعد از عبور جبهه شعله تا نزدیکی صفر می‌رسد، در حالی که با کاهش مقدار سرعت جریان ورودی،

1. Weak flame

اختلاف مقدار بیشینه و کمینه گونه هیدروژن کاهش می‌یابد. همچنین، با کاهش سرعت جریان ورودی، شیب مصرف گونه H_2 کمتر می‌شود، به طوری که در سرعت 0.1 cm/s بخش قابل توجهی از سوخت هیدروژن درون محفظه بدون انجام واکنش باقی می‌ماند که این امر موید همین موضوع است که توزیع یکنواخت‌تری از سوخت درون محفظه باقی می‌ماند.

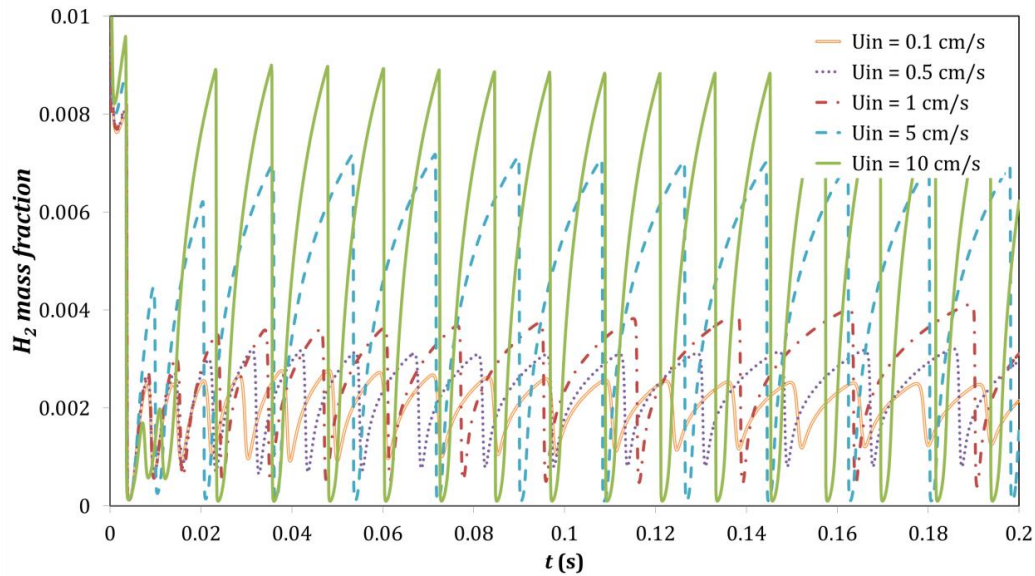


Figure 8- Temporal variation of H_2 mass fraction of point A for different inlet velocity (channel width = 1 mm and equivalence ratio = 0.5)

شکل ۸- تغییرات زمانی گونه H_2 برای یک نقطه مشخص در جریان در سرعت‌های جریان ورودی مختلف (کانال با عرض 1 mm و نسبت هم ارزی 0/5)

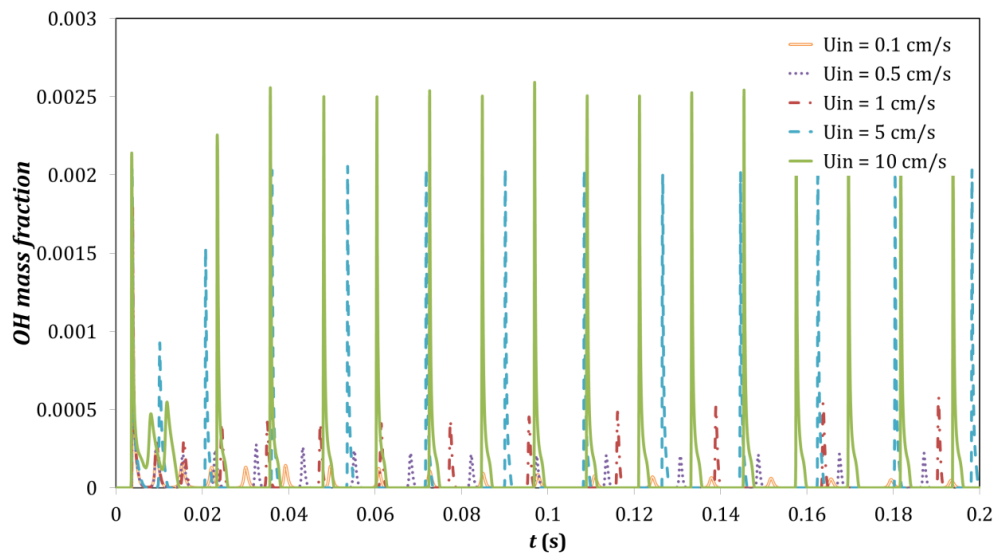


Figure 9- Temporal variation of OH mass fraction of point A for different inlet velocity (channel = 1 mm width and equivalence ratio = 0.5)

شکل ۹- تغییرات زمانی گونه OH برای یک نقطه مشخص در جریان در سرعت‌های جریان ورودی مختلف (کانال با عرض 1 mm و نسبت هم ارزی 0/5)

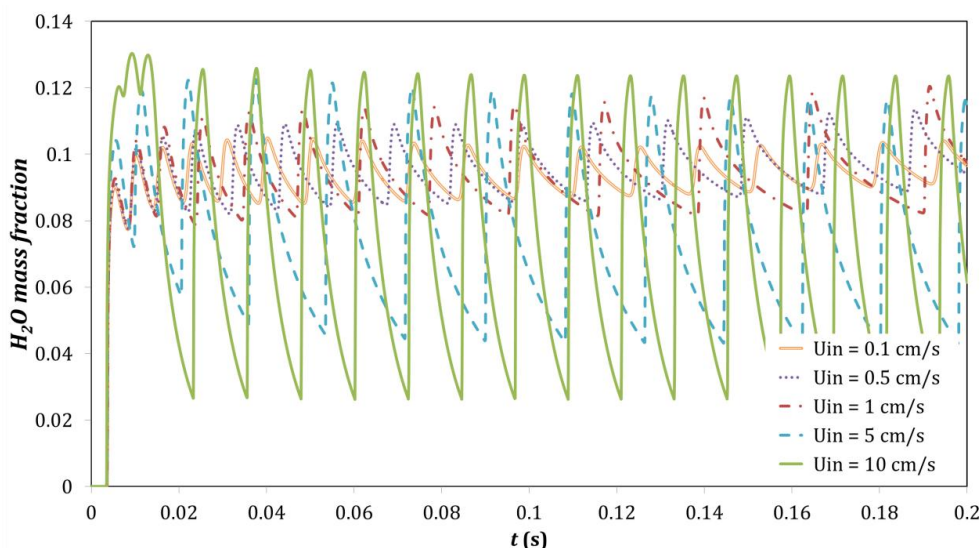


Figure 10- Temporal variation of H_2O mass fraction of point A for different inlet velocity (channel width = 1 mm and equivalence ratio = 0.5)

شکل ۱۰- تغییرات زمانی گونه H_2O برای یک نقطه مشخص در جریان در سرعت‌های جریان ورودی مختلف (کانال با عرض 1 mm و نسبت هم ارزی ۰/۵)

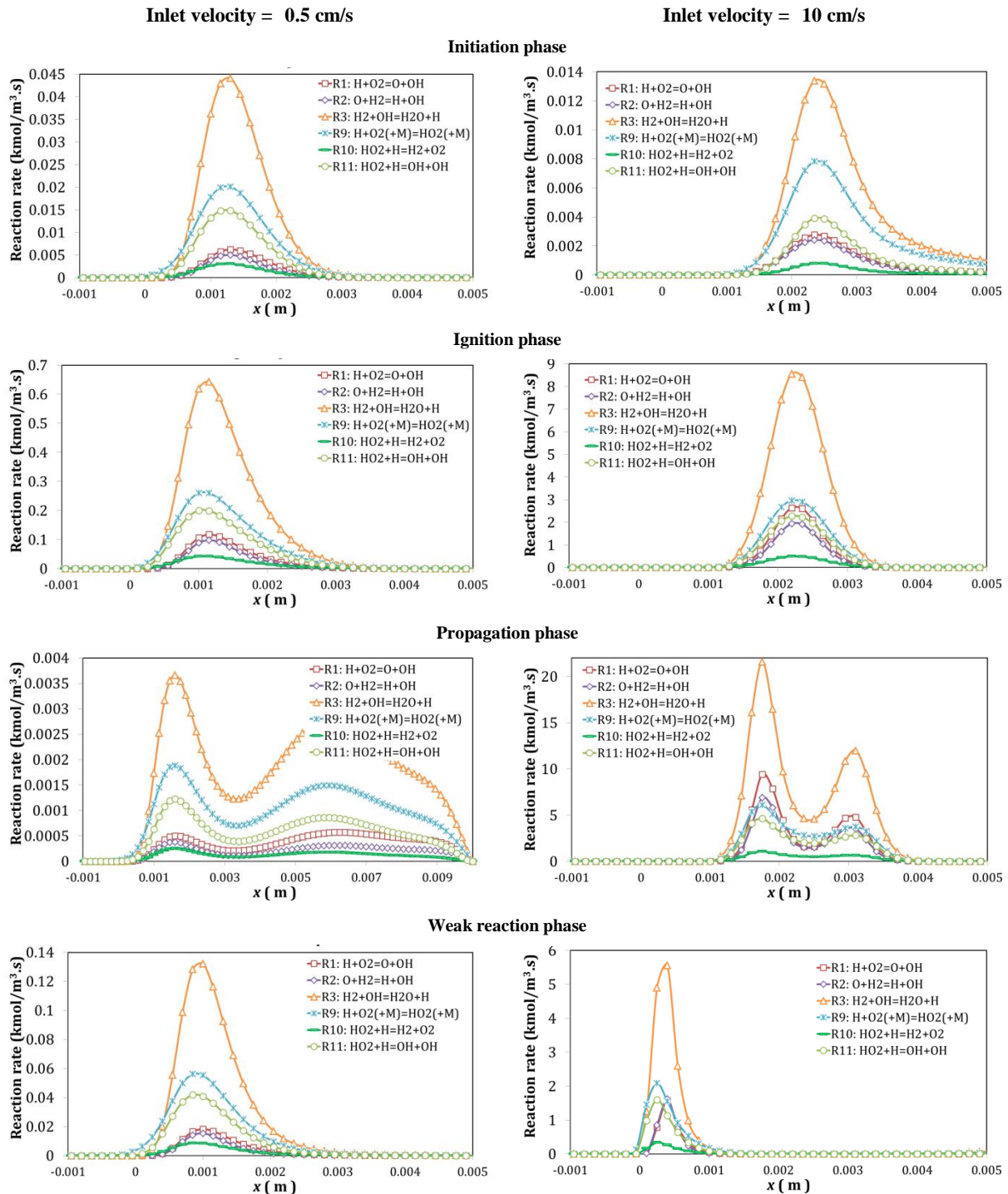
از آنجایی که رادیکال OH به‌عنوان رادیکال فعال در جبهه شعله شناخته می‌شود، می‌توان از آن به‌عنوان معیاری برای بررسی رفتار شعله استفاده کرد (شکل ۹). در سرعت‌های جریان ورودی بالاتر میزان گونه OH تولیدی افزایش می‌یابد که به علت فعال شدن سینتیک‌های دمابالاست و سوخت ورودی به جبهه شعله سریعاً به رادیکال‌های فعالی نظیر OH تبدیل می‌شود. در حالی که با کاهش سرعت جریان ورودی، میزان رادیکال OH تولیدی به‌شدت کاهش می‌یابد که علت آن پایین بودن دمای جریان و کاهش شدت واکنش‌های مربوط به تولید رادیکال OH است.

با توجه به رفتار گونه‌های سنگین‌تر مانند H_2O (شکل ۱۰)، دیده می‌شود که با کاهش سرعت جریان ورودی، تغییرات کمتر با زمان و سطح میانگین بالاتری از H_2O درون محفظه مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده فعالیت بیشتر واکنش‌های مربوط به آن است، در حالی که برای سرعت‌های جریان ورودی بالاتر، مقدار آن به‌شدت کاهش می‌یابد. جهت بررسی دقیق‌تر این موضوع، توجه به مسیر واکنش‌ها می‌تواند حائز اهمیت باشد. لذا، در بخش بعد، پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با استفاده از مسیر واکنش‌های مربوط به احتراق هیدروژن-هوا بررسی می‌شود.

بررسی تغییرات سرعت بر روی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر از دیدگاه واکنش‌های شیمیایی

در این بخش، تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با استفاده از نرخ واکنش بررسی می‌شود. برای این بررسی سرعت‌های جریان ورودی ۱۰ cm/s و ۰/۵ cm/s، نسبت هم‌ارزی ۰/۵ و عرض 1 mm در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، می‌توان فرایند خاموشی-اشتعال مکرر را به ۵ فاز شامل فازهای آغازش، اشتعال، انتشار، واکنش‌های ضعیف و جریان تقسیم‌بندی کرد. نرخ واکنش بر روی محور تقارن کانال برای هر یک از فازهای پدیده خاموشی-اشتعال مکرر در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. با استفاده از نرخ واکنش هر واکنش می‌توان نرخ تولید و مصرف هر گونه بر واحد حجم، ناشی از هر واکنش را محاسبه کرد. بر این اساس، واکنش‌های شیمیایی به دو دسته، واکنش‌های با نرخ واکنش سریع و واکنش‌های با نرخ واکنش کند، تقسیم‌بندی می‌شوند و برای فازهای مختلف این متغیر بررسی می‌شود.

با بررسی نتایج نشان داده شده در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که واکنش با بالاترین نرخ واکنش مربوط به واکنش $R3: H_2+OH=H_2O+H$ است. این واکنش جزو واکنش‌های آغازین (اولیه) است. سوخت ورودی به محفظه در ترکیب با رادیکال OH ، گونه‌های آب و رادیکال H را تولید می‌کند. واکنش‌های $R9: H+O_2(+M)=HO_2(+M)$ و $R11: HO_2+H=OH+OH$ واکنش‌هایی‌اند که در مرحله بعد فعال می‌شوند.



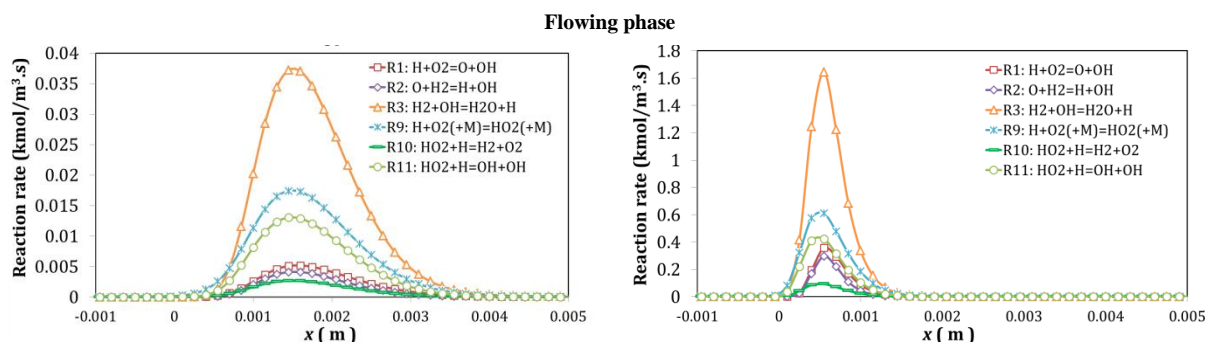


Figure 11- Variation of reaction rate for fast reactions on symmetry line of the channel for different phases in FREI phenomenon (Left column for 0.5 cm/s inlet velocity and right column for 10 cm/s)

(channel width=1 mm and equivalence ratio=0.5)

شکل ۱۱- تغییرات نرخ واکنش بر روی محور تقارن کانال برای واکنش‌های با نرخ واکنش تند در فازهای مختلف پدیده خاموشی- اشتعال

مکرر برای سرعت جریان ورودی ۱۰ cm/s (سمت راست) و ۰/۵ cm/s (سمت چپ)، کانال با عرض ۱ mm و نسبت هم ارزی ۰/۵

واکنش R9 مربوط به واکنش رادیکال H با اکسیژن ورودی به محفظه احتراق است که در نتیجه آن گونه HO_2 تولید می‌شود که در واکنش R11، HO_2 تولیدی با رادیکال H واکنش داده و رادیکال OH تولید می‌شود. در واکنش‌های $\text{R1: H+O}_2=\text{O+OH}$ ، $\text{R2: O+H}_2=\text{H+OH}$ و $\text{R10: HO}_2+\text{H}=\text{H}_2+\text{O}_2$ واکنش‌های سوخت و اکسیدکننده به رادیکال‌های OH، H و O تبدیل می‌شوند. با مقایسه نرخ واکنش‌های مختلف برای سرعت‌های ورودی ۱۰ cm/s و ۰/۵ cm/s می‌توان مشاهده کرد که در فاز آغازش، واکنش R3 برای سرعت جریان ورودی ۰/۵ cm/s در مقایسه با سرعت جریان ورودی ۱۰ cm/s نرخ واکنش بیشتری دارد، به طوری که گونه H_2O بیشتری از واکنش گونه‌های H_2 و OH تولید می‌شود و از طرف دیگر قله واکنش R9 در سرعت جریان ورودی ۱۰ cm/s در مقایسه با سرعت ۰/۵ cm/s به قله واکنش R3 نزدیک‌تر است که نشان‌دهنده فعال‌تر بودن این واکنش و تولید بیشتر گونه HO_2 از طریق این واکنش است. در حالی که واکنش R11 در سرعت ورودی ۰/۵ cm/s فعال‌تر است و HO_2 تولیدی از واکنش‌های قبل نظیر R9 با شدت بیشتری مصرف و رادیکال‌های OH را تولید می‌کند. رفتار واکنش‌های R1، R2 و R10 تقریباً مشابه یکدیگرند، با این اختلاف که واکنش‌های R1 و R2 در سرعت ۱۰ cm/s فعال‌ترند و گونه‌های سبک نظیر H، O و OH تولید می‌شوند. بنابراین، در فاز آغازش برای سرعت ورودی ۰/۵ cm/s، واکنش در جهت حفظ گونه‌های سنگین‌تر نظیر HO_2 و H_2O است، در حالی که در سرعت جریان ورودی ۱۰ cm/s واکنش‌های در جهت تولید گونه‌های سبک‌تر نظیر H، O و OH فعال‌تر خواهند بود.

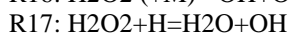
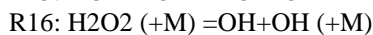
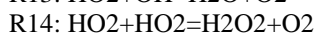
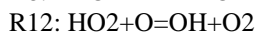
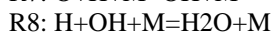
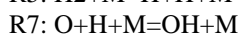
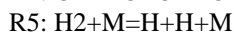
با ورود به فاز اشتعال، مشاهده می‌شود که شدت واکنش‌ها در سرعت ورودی ۱۰ cm/s نسبت به سرعت ورودی ۰/۵ cm/s به شدت افزایش می‌یابد، به طوری که مقدار قله واکنش R3 از مقدار ۰/۰۱۴ kmol/m³.s به مقدار ۹ kmol/m³.s می‌رسد. شدت واکنش‌های R1 و R2 افزایش می‌یابد، به طوری که شدت آنها به نزدیکی واکنش‌های R9 و R11 می‌رسد. این واکنش‌ها در جهت تولید گونه‌های سبک حرکت می‌کنند. در حالی که در سرعت ورودی ۰/۵ cm/s افزایش شدت کمتری دارند، قله نمودارها به سمت بالادست جریان حرکت کرده است و ناحیه گسترده‌تری نسبت به سرعت جریان ورودی ۱۰ cm/s مشاهده می‌شود. بنابراین، در فاز اشتعال، برای سرعت ورودی بالاتر، واکنش‌های مربوط به تولید گونه‌های سبک‌تر فعال‌ترند، در حالی که در سرعت‌های ورودی کمتر، واکنش‌های مربوط به تولید گونه‌های سنگین‌تر غالب‌اند.

در فاز انتشار، دوشاخه‌شدن برای جبهه شعله نیز در واکنش‌های مختلف مشاهده می‌شود. نرخ واکنش برای سرعت جریان ورودی ۱۰ cm/s در مقایسه با فاز اشتعال افزایش می‌یابد، در حالی که برای سرعت ورودی ۰/۵ cm/s شدت واکنش‌ها کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در سرعت جریان ورودی ۰/۵ cm/s ناحیه واکنشی گسترده در سراسر کانال است که این نیز از

ویژگی‌های احتراق بدون شعله است. رفتار شدت واکنش‌ها برای سرعت 0.5 cm/s همانند فازهای قبلی است و واکنش‌ها در جهت تولید گونه‌های سنگین‌تر حرکت می‌کنند. در سرعت‌های ورودی بالاتر شدت واکنش‌های R1 و R2 نیز افزایش می‌یابد و مقدار قله مربوط به واکنش‌های R9 و R11 نیز بیشتر می‌شود.

در فاز واکنش‌های ضعیف و جریان، شدت واکنش‌ها کاهش می‌یابد، به طوری که در سرعت جریان ورودی 10 cm/s مقدار قله واکنش‌های R1 و R2 به کمتر از مقدار قله واکنش‌های R9 و R11 می‌رسد. در حالی که در سرعت جریان ورودی 0.5 cm/s رفتار واکنش‌ها همانند فازهای قبل است. البته، ناحیه واکنشی در فاز واکنش‌های ضعیف کمی کاهش می‌یابد که در فاز جریان کشیدگی ناحیه واکنش همچنان دیده می‌شود.

در ادامه، واکنش‌های با نرخ واکنش پایین بررسی می‌شود، تا بتوان دید جامع و کاملی در مورد واکنش‌های انجام‌شده در فرایند خاموشی-اشتعال مکرر برای سرعت‌های ورودی مختلف به دست آورد. در این بخش، واکنش‌های لیست‌شده در زیر در نظر گرفته شده است.



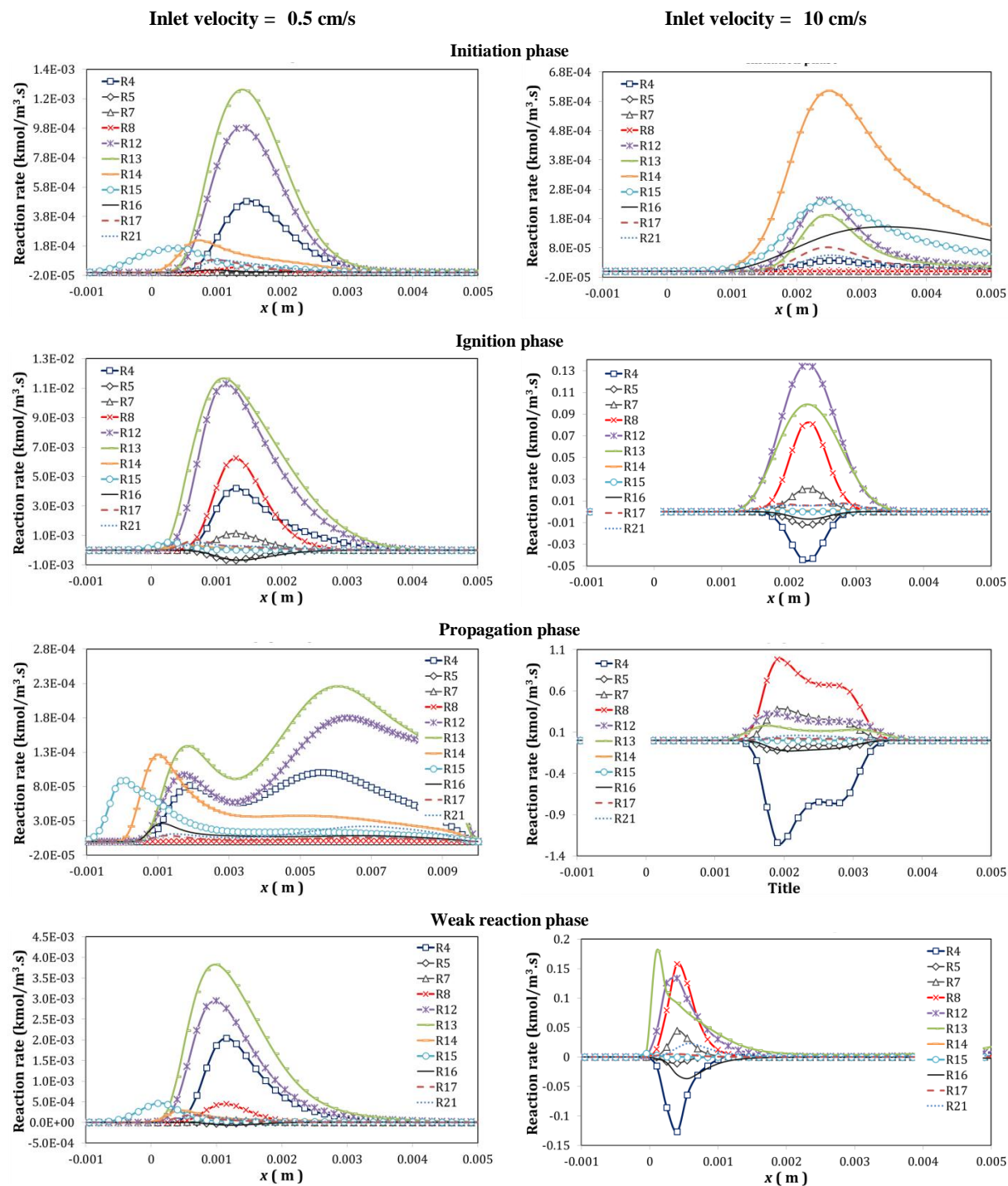
واکنش‌های R4، R5 و R7 مربوط به تولید گونه‌های سبک است. در این واکنش‌ها رادیکال‌های سوخت، آب و رادیکال H با رادیکال O واکنش داده و رادیکال OH تولید می‌شود. در واکنش‌های R12، R13، R14 و R15، گونه HO_2 که در واکنش R9 تولید شده با گونه‌های O، OH و HO_2 واکنش داده و رادیکال‌های OH، H_2O و H_2O_2 تولید می‌شود. در واکنش‌های R16، R17 و R21، گونه H_2O_2 تولیدی مصرف و به گونه‌های OH و H_2O تبدیل می‌شود.

در شکل ۱۲، نرخ واکنش برای هر یک از واکنش‌های بالا بر روی محور تقارن کانال برای دو سرعت 10 cm/s و 0.5 cm/s نشان داده شده است. برخلاف واکنش‌های با نرخ واکنش سریع، واکنش‌های با نرخ واکنش کند رفتارهای متفاوتی در سرعت‌های جریان ورودی مختلف دارند.

در فاز آغازش و برای سرعت ورودی 10 cm/s ، واکنش غالب مربوط به واکنش R14 است که در این واکنش گونه H_2O_2 تولید می‌شود. در مرحله بعد واکنش‌های R12، R15 و R13 وجود دارد که در این واکنش‌ها به ترتیب گونه‌های OH، H_2O و H_2O_2 تولید می‌شوند. سایر واکنش‌ها شدت کمتری دارند، در حالی که در سرعت جریان ورودی 0.5 cm/s رفتار واکنش‌ها متفاوت است، به طوری که واکنش غالب در این حالت مربوط به واکنش‌های R13 و R12 است که در آنها به ترتیب گونه‌های H_2O و OH تولید می‌شود. در مرحله بعد واکنش R4 فعال است که در این واکنش گونه OH تولید می‌شود. نکته قابل توجه در این فاز جلوتر بودن قله واکنش‌های R14 و R15 است که در هر دوی این واکنش‌ها، گونه‌های سنگین H_2O_2 تولید می‌شود.

در فاز اشتعال شدت کلیه واکنش‌ها افزایش می‌یابد و همان‌طور که در واکنش‌های با نرخ واکنش سریع دیده شد، افزایش نرخ واکنش‌ها برای سرعت جریان ورودی 10 cm/s نسبت به سرعت جریان ورودی 0.5 cm/s خیلی بیشتر است. در هر دو سرعت جریان ورودی، واکنش‌های R12 و R13 شدت می‌یابند، به طوری که در سرعت جریان ورودی 10 cm/s تولید OH به واسطه واکنش R12 افزایش می‌یابد، در حالی که در سرعت جریان 0.5 cm/s تولید H_2O به واسطه واکنش R13 بیشتر است.

واکنش R8 نیز در هر دو حالت گونه H_2O را تولید می‌کند، اما نکته قابل توجه در مورد واکنش R4 است که در دو سرعت جریان ورودی، حرکت واکنش در جهت معکوس یکدیگرند. واکنش در سرعت 0.5 cm/s در جهت تولید گونه‌های OH است، در حالی که در سرعت 10 cm/s ، واکنش در جهت تولید گونه‌های H_2O و O حرکت می‌کند. نکته قابل توجه دیگر معکوس شدن جهت واکنش‌های R5 و R16 است که به ترتیب در جهت تولید گونه‌های H_2 و H_2O_2 حرکت می‌کنند.



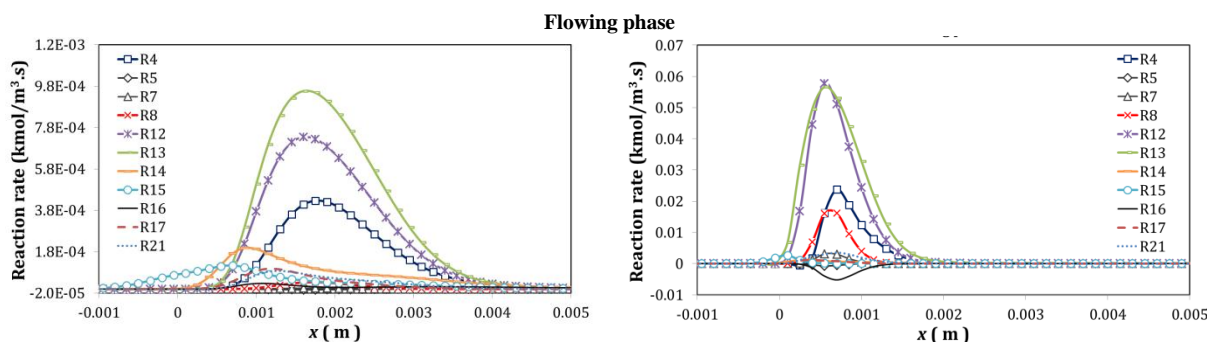


Figure 12- Variation of reaction rate for slow reactions on symmetry line of the channel for different phases in FREI phenomenon (Left column for 0.5 cm/s inlet velocity and right column for 10 cm/s) (channel width=1 mm and equivalence ratio=0.5)

شکل ۱۲- تغییرات نرخ واکنش بر روی محور تقارن کانال برای واکنش‌های با نرخ واکنش تند در فازهای مختلف پدیده خاموشی-اشتعال مکرر برای سرعت جریان ورودی ۱۰ cm/s (سمت راست) و ۰/۵ cm/s (سمت چپ)، کانال با عرض ۱ mm و نسبت هم ارزی ۰/۵

در فاز انتشار و در سرعت ورودی ۰/۵ cm/s شدت واکنش‌ها کاهش می‌یابد، اما توزیع گسترده‌ای از واکنش‌ها مشاهده می‌شود. واکنش R13 واکنش غالب در این فاز است که در جهت تولید H_2O_2 حرکت می‌کند. رفتار واکنش‌های R14 و R15 نیز که در جهت تولید H_2O_2 حرکت می‌کنند قابل توجه است که مقدار قله آن جلوتر از سایر واکنش‌هاست. شدت واکنش R15 نیز افزایش می‌یابد، در حالی که در سرعت ورودی ۱۰ cm/s این افزایش شدت واکنش در جهت خلاف مشاهده می‌شود. در سرعت ورودی ۱۰ cm/s واکنش R8 غالب است که گونه H_2O تولید می‌شود و همچنین واکنش R7 نیز در جهت تولید گونه OH حرکت می‌کند. نکته قابل توجه در این فاز رفتار واکنش‌های R5 و R16 است که در فاز آغازش هر دو در جهت معکوس رفتار می‌کردند، در حالی که در فاز انتشار و در سرعت ورودی ۰/۵ cm/s این رفتار معکوس می‌شود.

در فاز واکنش‌های ضعیف، شدت کلی واکنش‌ها برای سرعت ورودی ۰/۵ cm/s افزایش یافته در حالی که برای سرعت ورودی ۱۰ cm/s کاهش می‌یابد که علت آن می‌تواند تمرکز بیشتر واکنش‌های مربوط به گونه‌های سنگین در فاز واکنش‌های ضعیف باشد. در سرعت ورودی ۱۰ cm/s، قله واکنش R13 به سمت بالادست جریان منحرف می‌شود که نشان‌دهنده شدت یافتن این واکنش در این ناحیه است. رفتار سایر گونه‌ها نیز همانند فاز قبلی است. در فاز جریان شدت واکنش‌ها کاهش می‌یابد و رفتار واکنش R4 برای هر دو سرعت در یک جهت قرار می‌گیرد، به طوری که در هر دو سرعت واکنش R4 در جهت تولید گونه OH حرکت می‌کند.

با توجه به بررسی انجام‌شده بر روی نرخ واکنش در فازهای مختلف، مشاهده می‌شود که در سرعت‌های جریان ورودی پایین، واکنش‌های در جهت تولید گونه‌های سنگین غالب‌اند، در حالی که در سرعت جریان ورودی بالاتر و در فازهای اشتعال، انتشار و واکنش ضعیف، واکنش‌ها تمایل بیشتری برای حرکت در جهت تولید گونه‌های سبک‌تر دارند. گونه‌های سبک‌تر ضریب نفوذ بالاتری دارند و سریع‌تر از گونه‌های سنگین‌تر حرکت می‌کنند و با رسیدن به گونه‌های سوخت شدت واکنش‌ها را افزایش می‌دهند، در حالی که گونه‌های سنگین‌تر با جذب انرژی بیشتر، دما و شدت واکنش‌ها را کاهش می‌دهند که باعث گسترده‌گی ناحیه واکنش می‌شوند.

تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی تغییرات سرعت جبهه شعله

در این بخش، تغییرات سرعت جبهه شعله در پدیده خاموشی-اشتعال مکرر با استفاده از نمودار مکان-زمان بررسی می‌شود. برای بررسی سرعت جبهه شعله مکان بیشینه رادیکال H به‌عنوان جبهه شعله در نظر گرفته می‌شود و تغییرات آن برحسب زمان بررسی می‌شود. همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، در ناحیه‌ای که بخش قابل توجهی از سوخت مصرف می‌شود (جبهه شعله) رادیکال H تولید و سپس در واکنش‌های بعدی مصرف می‌شود. بنابراین، رادیکال H به‌عنوان نمایانگر جبهه شعله

در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن تغییرات مکان شعله نسبت به زمان می‌توان سرعت جبهه شعله را تخمین زد. متغیر دیگری که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ استفاده شده است، مربوط به بیشینه کسر جرمی گونه H است. با استفاده از این متغیر می‌توان در مورد خاموشی و اشتعال شعله صحبت کرد. براساس مرجع [۱۱] هنگامی که مقدار بیشینه رادیکال H بیشتر از مقدار 10^{-7} باشد، شعله در حالت اشتعال و هنگامی که کمتر از این مقدار باشد، شعله در حالت خاموشی قرار دارد. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ تغییرات مکان بیشینه رادیکال H و مقدار بیشینه رادیکال H بر حسب زمان برای سرعت‌های ورودی 0.5 cm/s و 10 cm/s نشان داده شده است. برای این تحلیل، یک چرخه پدیده خاموشی-اشتعال مکرر انتخاب و زمان شروع چرخه $t=0$ در نظر گرفته می‌شود تا امکان مقایسه شرایط مختلف برقرار شود. محور بیشینه کسر جرمی رادیکال H در مقیاس لگاریتمی و محور مکان بیشینه کسر جرمی گونه H در مقیاس خطی است.

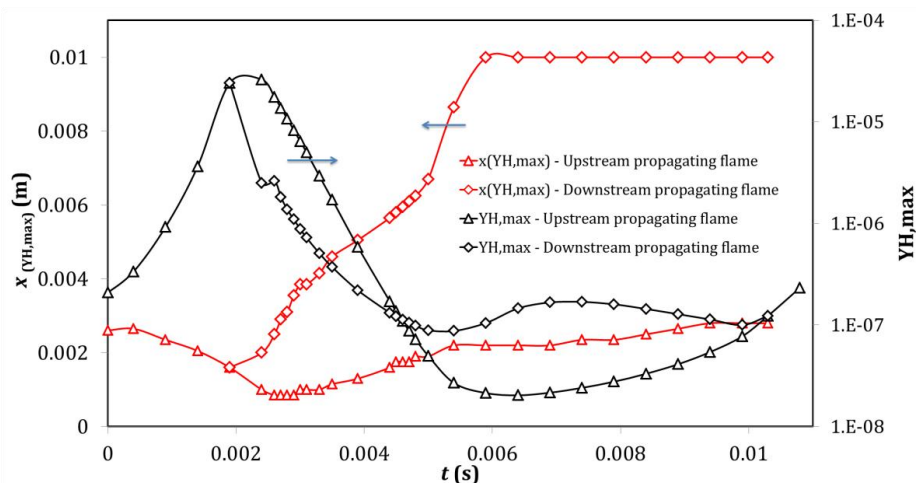


Figure 13- Temporal variation of maximum value of H mass fraction and their locations on midplane for 0.5 cm/s inlet velocity (channel width = 1 mm and equivalence ratio = 0.5)

شکل ۱۳- تغییرات زمانی مکان مقدار بیشینه رادیکال H و مقدار بیشینه رادیکال H برای سرعت ورودی 0.5 cm/s ، کانال با عرض ۱ mm و نسبت هم ارزی 0.5

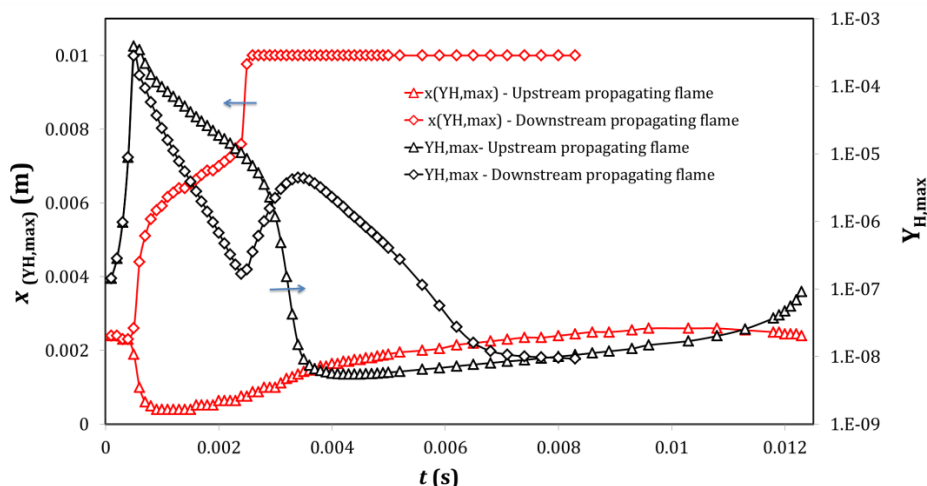


Figure 14- Temporal variation of maximum value of H mass fraction and their locations on midplane for 10 cm/s inlet velocity (channel width = 1 mm and equivalence ratio = 0.5)

شکل ۱۴- تغییرات زمانی مکان مقدار بیشینه رادیکال H و مقدار بیشینه رادیکال H برای سرعت ورودی 10 cm/s ، کانال با عرض ۱ mm و نسبت هم ارزی 0.5

مدت زمان یک چرخه خاموشی-اشتعال برای سرعت جریان ورودی 0.5 cm/s برابر با 10.8 ms و برای سرعت جریان ورودی 10 cm/s برابر با 12.3 ms است. در سرعت ورودی 0.5 cm/s ، در ابتدای فرایند، اشتعال جریان مشاهده می شود و شعله با سرعت تقریبی 70 cm/s به سمت بالادست جریان حرکت می کند و در مکان 1.6 mm جدایش جبهه شعله اتفاق می افتد. در این حالت مقدار بیشینه کسر جرمی رادیکال H بیشترین مقدار (2.61×10^{-5}) را دارد. جبهه شعله در حرکت به سمت بالادست با سرعت تقریبی 70 cm/s تا مکان 0.8 mm از ابتدای بخش آزمایش حرکت می کند و سپس به سرعت صفر می رسد و جهت حرکت جبهه شعله معکوس می شود. جبهه شعله با سرعت 50 cm/s به سمت پایین دست جریان حرکت می کند تا هنگامی که به مکان 1.9 mm از ابتدای بخش آزمایش می رسد و بعد از آن وارد بخش خاموشی می شود. مقدار بیشینه کسر جرمی به کمترین مقدار خود یعنی 2.03×10^{-8} در مکان 2.22 mm می رسد. با گذشت زمان و حرکت جبهه شعله به سمت پایین دست جریان، مقدار بیشینه کسر جرمی رادیکال H مجدداً افزایش می یابد. در این شرایط سرعت جبهه شعله مقدار 13 cm/s را دارد و شعله به سمت پایین دست جریان منتقل می شود، اما شعله همچنان در ناحیه خاموشی قرار دارد. بخش دیگر شعله، که به سمت پایین دست جریان حرکت می کند، سرعت بیشتری نسبت به شعله در حال حرکت به بالادست جریان دارد که مقدار سرعت آن در حدود 180 cm/s است و در زمان 5.9 ms به انتهای کانال می رسد. اما در زمان 4.6 ms به ناحیه خاموشی وارد می شود و مجدداً با رسیدن شعله به انتهای کانال، شدت واکنشها افزایش می یابد و مقدار بیشینه کسر جرمی رادیکال H به ناحیه اشتعال وارد می شود و تا انتهای چرخه در ناحیه اشتعال قرار دارد. در سرعت جریان ورودی 10 cm/s ، مدت زمان یک چرخه خاموشی-اشتعال برابر با 12.3 ms است. شدت واکنشها در مدت زمان اندکی افزایش می یابد و دوشاخه شدن جبهه شعله در مکان 2.3 mm اتفاق می افتد و جبهه شعله با سرعت 360 cm/s به سمت بالادست جریان حرکت می کند و تا مکان 0.8 mm از ابتدای بخش آزمایش می رسد. سپس سرعت جبهه شعله صفر می شود و جهت بردار سرعت معکوس می شود. جبهه شعله به سمت پایین دست کانال حرکت می کند و با سرعت 23 cm/s تا مکان 2.6 mm از ابتدای بخش آزمایش بر می گردد. این جبهه شعله در مکان 1.43 mm وارد ناحیه خاموشی می شود و سپس در مکان 2.35 mm جبهه شعله وارد ناحیه اشتعال می شود. بخش دیگر جبهه شعله، که بعد از جدایش به سمت پایین دست جریان حرکت می کند، با سرعت 120 cm/s به انتهای کانال می رسد و شدت آن کاهش می یابد. اما در انتهای کانال شدت آن افزایش می یابد. علت این پدیده را می توان این گونه بیان کرد که شدت جبهه شعله در حرکت به سمت بالادست کاهش می یابد و وارد ناحیه خاموشی می شود. بنابراین، بخشی از سوخت به صورت نسوخته به پایین دست جریان منتقل می شود و به جبهه شعله، که در مکان انتهای کانال قرار دارد، می رسد و باعث افزایش نرخ آزاد شدن حرارت و شدت بخشیدن به واکنشها می شود، به طوری که قله مقدار بیشینه رادیکال H هنگامی شکل می گیرد که جبهه شعله در بالادست جریان در ناحیه خاموشی قرار دارد. با گذشت زمان و افزایش میزان بیشینه مقدار رادیکال H در جبهه بالادست جریان، مقدار بیشینه رادیکال H در جبهه پایین دست جریان کاهش می یابد تا هنگامی که چرخه به پایان برسد و چرخه جدید آغاز شود. با مقایسه رفتار جبهه شعله برای سرعت های جریان ورودی 0.5 cm/s و 10 cm/s مشاهده می شود که انتقال جبهه شعله در سرعت ورودی 10 cm/s سریع تر از سرعت ورودی 0.5 cm/s اتفاق می افتد. مقدار بیشینه رادیکال H در سرعت ورودی 0.5 cm/s برابر 2.5×10^{-5} و در سرعت ورودی 10 cm/s برابر با 3.9×10^{-4} است. بنابراین، در سرعت ورودی 10 cm/s شدت واکنشها افزایش می یابد و جبهه شعله سریع تر وارد ناحیه خاموشی می شود که این نشان دهنده این است که شدت واکنشها کاهش می یابد، اما همچنان واکنشها ادامه می یابند.

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر برای مخلوط رقیق هیدروژن-هوا (با نسبت هم آرزوی 0.5) در یک میکروکانال تحت گرادین دمایی مشخص برای دیوار، به صورت عددی بررسی شد. تاثیر سرعت جریان

ورودی بر روی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر در سه بخش بررسی شد. ابتدا، با استفاده از کانتورهای رادیکال OH، دینامیک کلی حاکم بر پدیده خاموشی-اشتعال مکرر بررسی شد. در رژیم خاموشی-اشتعال مکرر، فرایند اشتعال در نزدیکی دیوار و تحت تاثیر دمای دیوار آغاز می‌شود و شعله به سمت بالادست و پایین دست جریان کشیده می‌شود تا هنگامی که جدایش در جبهه شعله اتفاق می‌افتد. با حرکت جبهه شعله به سمت بالادست جریان، مواد نسوخته و روادی مصرف می‌شود و با حرکت به سمت پایین دست جریان، مواد نسوخته در بخش محصولات مصرف می‌شود. برای بررسی مشخصه‌های پدیده خاموشی-اشتعال مکرر از دو متغیر دامنه و فرکانس استفاده شد. با افزایش سرعت جریان ورودی دامنه پدیده خاموشی-اشتعال مکرر افزایش می‌یابد، در حالی که فرکانس پدیده خاموشی-اشتعال مکرر رفتاری کاهشی-افزایشی دارد. با کاهش سرعت جریان ورودی و افزایش زمان اقامت سیال درون محفظه احتراق، میزان حرارت اتلافی از محفظه افزایش می‌یابد. بنابراین، دامنه پدیده خاموشی-اشتعال مکرر کاهش می‌یابد. در بخش دوم، تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی پدیده خاموشی-اشتعال مکرر از دیدگاه واکنش‌های شیمیایی بررسی شد. در این بخش، از متغیر نرخ واکنش برای بررسی واکنش‌های موثر بر این پدیده در فازهای مختلف استفاده شد. با استفاده از نتایج به دست آمده مشاهده شد که در سرعت‌های جریان ورودی بالا واکنش‌ها در جهت تولید گونه‌های سبک نظیر H₂O، H و OH حرکت می‌کنند، در حالی که در سرعت‌های جریان پایین، واکنش‌ها در جهت تولید گونه‌های سنگین نظیر H₂O، HO₂ و H₂O₂ حرکت می‌کنند. در بخش انتهایی، تاثیر سرعت جریان ورودی بر روی سرعت جبهه شعله انتشاری بررسی شد. در سرعت‌های جریان ورودی پایین، شعله در مدت زمان بیشتری از یک چرخه در ناحیه اشتعال قرار دارد، در حالی که در سرعت‌های جریان ورودی بالاتر، مدت زمان اشتعال شعله کاهش می‌یابد.

منابع

1. K. Maruta, T. Kataoka, N. II Kim, S. Minaev, and R. Fursenko, "Characteristics of Combustion in a Narrow Channel with a Temperature Gradient," *Proceeding of the Combustion Institute*, 30, No. 2, 2005, pp. 2429-2436.
2. G. Pizza, C. E. Frouzakis, J. Mantzaras, A. G. Tomboulides, and K. Boulouchos, "Three-Dimensional Simulations of Premixed Hydrogen/Air Flames in Microtubes," *Journal of Fluid Mechanics*, 658, 2010, pp. 463-491.
3. F. Richecoeur and D. C. Kyritsis, "Experimental Study of Flame Stabilization in Low Reynolds and Dean Number Flows in Curved Mesoscale Ducts," *Proceeding of the Combustion Institute*, 30, No. 2, 2005, pp. 2419-2427.
4. T. L. Jackson, J. Buckmaster, Z. Lu, D. C. Kyritsis, and L. Massa, "Flames in Narrow Circular Tubes," *Proceeding of the Combustion Institute*, 31, No. 1, 2007, pp. 955-962.
5. V. Kurdyumov and E. Fernández-Tarrazo, "Lewis Number Effect on the Propagation of Premixed Laminar Flames in Narrow Open Ducts," *Combustion and Flame*, 128, 2002, pp. 382-394.
6. C. H. Tsai, "The Asymmetric Behavior of Steady Laminar Flame Propagation in Ducts," *Combustion Science and Technology*, 180, No. 3, 2008, pp. 533-545.
7. U. Dogwiler, P. Benz, and J. Mantzaras, "Two-Dimensional Modelling for Catalytically Stabilized Combustion of a Lean Methane-Air Mixture with Elementary Homogeneous and Heterogeneous Chemical Reactions," *Combustion and Flame*, 116, 1999, pp. 243-258.
8. G. Pizza, C. E. Frouzakis, J. Mantzaras, A. G. Tomboulides, and K. Boulouchos, "Dynamics of Premixed Hydrogen/Air Flames in Micro Channels," *Combustion and Flame*, 155, 2008, pp. 2-20.
9. M. J. Kwon, B. J. Lee, and S. H. Chung, "An Observation of Near-Planar Spinning Premixed Flames in a Sudden Expansion Tube," *Combustion and Flame*, 105, 1996, pp. 180-188.
10. B. Xu and Y. Ju, "Experimental Study of Spinning Combustion in a Mesoscale Divergent Channel," *Proceeding of the Combustion Institute*, 31, 2007, pp. 3285-3292.
11. G. Pizza, C. E. Frouzakis, J. Mantzaras, A. G. Tomboulides, and K. Boulouchos, "Dynamics of Premixed Hydrogen / Air Flames in Microchannels," *Combustion and Flame*, 152, No. 3, 2008, pp. 433-450.
12. Y. Fan, Y. Suzuki, and N. Kasagi, "Experimental Study of Micro-Scale Premixed Flame in Quartz Channels," *Proceeding of the Combustion Institute*, 32, No. 2, 2009, pp. 3083-3090.
13. A. Fan, S. S. Minaev, E. V. Sereshchenko, Y. Tsuboi, H. Oshibe, H. Nakamura, and K. Maruta, "Dynamic Behavior of Splitting Flames in a Heated Channel," *Combustion Explosion and Shock Waves*, 45, No. 3, 2009, pp. 245-250.
14. Y. Fan, Y. Suzuki, and N. Kasagi, "Quenching Mechanism Study of Oscillating Flame in Micro Channels using Phase-Locked OH-PLIF," *Proceeding of the Combustion Institute*, 33, No. 2, 2011, pp. 3267-3273.
15. S. Minaev, K. Maruta, and R. Fursenko, "Nonlinear Dynamics of Flame in a Narrow Channel with a Temperature Gradient," *Combustion Theory and Modeling*, 11, No. 2, 2007, pp. 187-203.
16. V. N. Kurdyumov, G. Pizza, C. E. Frouzakis, and J. Mantzaras, "Dynamics of Premixed Flames in a Narrow Channel With a Step-Wise Wall Temperature," *Combustion and Flame*, 156, No. 11, 2009, pp. 2190-2200.

17. H. Nakamura, A. Fan, S. Minaev, E. Sereshchenko, R. Fursenko, Y. Tsuboi, and K. Maruta, "Bifurcations and Negative Propagation Speeds of Methane/Air Premixed Flames with Repetitive Extinction and Ignition in a Heated Microchannel," *Combustion and Flame*, vol. 159, No. 4, 2012, pp. 1631-1643.
18. A. Alipoor, K. Mazaheri and A. shamounipour, "Dynamics of Lean Hydrogen/Air Flame Regimes in Micro Scale Combustion", *Modares Mechanical Engineering*, 14, No. 3, 2014, pp. 94-102. (in Farsi)
19. A. Alipoor, K. Mazaheri, "Studying the repetitive extinction-ignition dynamics for lean premixed hydrogen-air combustion in a heated microchannel", *International Journal of Energy*, 73, 2014, pp. 367-379.
20. S. R. Turns, *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*, Second Edi., Mc Graw Hill, NewYork 2000.
21. Y. Tsuboi, T. Yokomori, and K. Maruta, "Lower Limit of Weak Flame in a Heated Channel," *Proceeding of Combustion Institute*, 32, No. 2, 2009, pp. 3075-3081.
22. R. A. Yetter, F. L. Dryer, and H. Rabitz, "A Comprehensive Reaction Mechanism for Carbon Monoxide/Hydrogen/Oxygen Kinetics," *Combustion Science and Technology*, 79, 1991, pp. 97-128.
23. Technical Report: "Transport: A Software package for the evaluation of gas-phase, multi component transport properties," CHEMKIN Collection, no: TRA-036-1, 2000.

English Abstract

Numerical Study of the Inlet Velocity Effect on Characteristics of Repetitive Extinction-Ignition Dynamics for Lean Premixed Hydrogen-Air Combustion in a Heated Micro Channel

Alireza Alipoor and Kiumars Mazaheri

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

In the present study, the effects of inlet velocity on characteristics of Repetitive Extinction-Ignition Dynamics are numerically investigated. Hydrogen-air mixture (with equivalence ratio = 0.5) enters into a heated micro channel with a prescribed wall temperature. Low Mach number approach is considered for governing equations in numerical simulation and also detailed chemistry, and different mass diffusivity of species is utilized. The dynamic behavior is studied by two parameter, 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. For detailed study of this phenomenon the chemical reaction approach is used by considering the reaction rate parameter. The results illustrate that for high inlet velocities the reactions tend to produce light species such as O, H and OH. The effects of inlet velocity on flame propagation velocity are also studied. For lower inlet velocities, flame stays longer in an extinction-ignition period in the channel, while increasing the inlet velocity causes the flame to extinguish faster.

Keywords: Combustion in small scale, Repetitive extinction-ignition dynamics, Amplitude, Frequency, Reaction rate