

مطالعه‌ی عددی حدود خاموشی و ساختار شعله‌های نفوذی جریان مخالف H_2/O_2 در حضور رقیق‌کننده‌های Ar و He

علی اسدی^{۱*}، جواد خادم^۲

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

(*علی اسدی: aliasadi450@gmail.com)

چکیده

شعله‌های جریان مخالف نفوذی آرام اطلاعات مفیدی را درباره‌ی ویژگی‌های اساسی احتراق غیرپیش‌آمیخته فراهم می‌کنند. مطالعات زیادی روی شعله‌های جریان مخالف H_2/O_2 انجام شده است. اکثر مطالعات قبلی شامل سیستم‌های رقیق‌نشده یا هیدروژن رقیق‌شده (با CO_2 یا N_2) در مقابل جریان اکسیدکننده است که در شرایط مختلف از قبیل شدت‌های کرنش، فشارها و دماهای ورودی بررسی شده است. هدف اصلی در این تحقیق بررسی حدود خاموشی شعله و چگونگی تغییر دما در برابر نرخ کرنش است. اثر گازهای Ar و He نیز به عنوان رقیق‌کننده بر احتراق H_2/O_2 و حدود خاموشی آن بررسی شده است. انطباق خوب نتایج عددی کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی، دقت بالای حل عددی را نشان می‌دهد. افزایش درصد رقیق‌کننده کاهش ماکزیمم دما و ماکزیمم کسر مولی رادیکال‌های فعال H و OH را منجر می‌شود. کاهش تولید رادیکال H باعث می‌شود که سوخت کمتر تحت تاثیر این گونه قرار گرفته و در نتیجه در سمت اکسیدکننده بیشتر نفوذ کند. افزایش درصد رقیق‌کننده باعث کاهش حد بلوآف (Blow Off) و کونچینگ (Quenching) در احتراق هیدروژن می‌شود و حدود احتراق پذیری باریکتر می‌شود. اما افزایش دمای جریان‌های ورودی و فشار محیط، حدود احتراق پذیری را گسترده‌تر می‌کند.

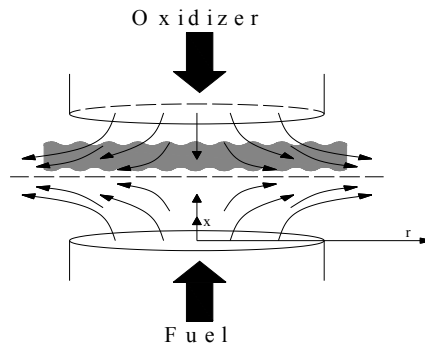
واژه‌های کلیدی: شعله‌های جریان مخالف، شعله‌های نفوذی، حدود خاموشی، رقیق‌کننده، مکانیزم شیمیایی

۱- مقدمه

تئوری شعله‌ی نفوذی جریان مخالف از سال‌ها پیش مورد بررسی قرار گرفته است. شعله‌ی جریان مخالف، ناحیه‌ی برخورد دو جت مختلف‌الجهت پایدار سوخت و اکسیدکننده است. به علت سرعت متغیر در دهانه‌ی مشعل و سایر تاثیرات فرعی، اغلب شعله‌ها صاف (تخت) نیستند. در مدل گفته شده که بر اساس برخورد دو جت گاز جریان مخالف به یک باریکه‌ی شعله است، صفحه‌ی تخت شعله عمود بر محور نازل است که این در شکل (۱) نشان داده شده است. مطالعات زیادی روی شعله‌های جریان مخالف H_2/Air انجام شده است. اخیراً ریبرت و همکارانش [۱] مطالعات عددی موجود در این زمینه را جمع‌آوری کرده‌اند. مطالعه‌ی عددی روی شعله‌ی نفوذی جریان مخالف H_2/Air رقیق‌شده با CO_2 در دمای اتاق توسط پارک و همکارانش [۲] انجام شده است. اثر رقیق‌ساز CO_2 بر شعله‌ی جریان مخالف نفوذی H_2/O_2 در شرایط مختلف شامل دمای ورودی، فشار و سطوح مختلف رقیق‌سازی با CO_2 بررسی شده است [۳]. در این مقاله اثر افزایش CO_2 به صورت دمای آدیاباتیک شعله و نیز کاهش صدور NO_x نمایان شده است. با افزایش فشار محیط، دمای آدیاباتیک شعله افزایش و ضخامت شعله کاهش می‌یابد.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی

۲- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک- دانشگاه بیرجند



شکل ۱- هندسه‌ی متقارن محوری جریان مخالف نفوذی

بررسی ساختار شعله و صدور NO در شعله‌های جریان مخالف غیر پیش‌آمیخته‌ی H₂/Air رقیق شده با CO₂ در مقاله‌ی [۴] ارائه شده است. در این تحقیق تغییرات دمای ماکزیمم در برابر دمای اکسیدکننده بررسی شده است. افزایش دمای اکسیدکننده باعث افزایش ماکزیمم دما می‌شود، اما افزایش رقیق‌ساز CO₂ ماکزیمم دما را کاهش می‌دهد.

مطالعه‌ی عددی روی ساختار شعله و صدور NO همچنین روی محدوده‌ی وسیعی از دماهای اتمسفر و دماهای هوای پیش گرم شده در شعله‌های آرام H₂/Air رقیق شده با بخار آب [۵] انجام شده است. در این مطالعه تولید قابل توجه OH مشاهده شد که بخاطر اثرات شیمیایی بخار آب اضافه شده است و همچنین صدور NO در مکانیزم حرارتی کاهش یافت.

مطالعه‌ی دیگری روی حدود احتراق و ساختار ناحیه‌ی واکنش شعله‌های جریان مخالف غیرپیش‌آمیخته‌ی متان و هوای پیش گرم شده در حالت رقیق شده با نیتروژن در مقاله‌ی [۶] انجام شده است. در این مطالعه حدود خاموشی در دمای بیشتر از ۱۳۰۰K دیگر ظاهر نمی‌شود.

در کار حاضر شبیه‌سازی احتراق هیدروژن با استفاده از مدل جریان مخالف نفوذی در حضور رقیق‌سازهای Ar و He انجام شده است. اثر رقیق‌کننده بر دمای احتراق و تولید گونه‌های H و OH بررسی گردید و در ادامه اثر رقیق‌کننده بر حدود خاموشی شعله مطالعه شد. در این تحقیق مکانیزم دریر و همکارانش [۷] که شامل ۲۵ واکنش برگشت‌پذیر از ۶ گونه است، به عنوان سنتیک شیمیایی انتخاب شده است.

۲- مدل‌سازی ریاضی و معادلات حاکم

معادلات حاکم برای هندسه‌ی جریان مخالف نفوذی که در شکل (۱) نشان داده شده است، به شرح زیر است:

معادله‌ی بقای جرم:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r) = 0 \quad (1)$$

که در آن u و v به ترتیب مولفه‌های سرعت شعاعی و محوری و ρ چگالی می‌باشد. با توجه به فرضیه‌ی ون کارمان [۸] که در آن $\frac{v}{r}$ و سایر متغیرها باید تابعی از فقط x باشند، تعریف می‌کنیم:

$$G(x) = -\frac{\rho v}{r}, \quad F(x) = \frac{\rho u}{2} \quad (2)$$

با جایگذاری F و G در معادله‌ی پیوستگی و ساده‌سازی نتیجه می‌شود:

$$G(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (3)$$

معادله‌ی مومنتم شعاعی با مقدار ویژه‌ی زیر ارضا می‌شود:

$$H = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} = const \quad (4)$$

و معادله‌ی مومنتم شعاعی به صورت زیر است:

$$H - 2 \frac{d}{dx} \left(\frac{FG}{\rho} \right) + \frac{3G^2}{\rho} + \frac{d}{dx} \left[\mu \frac{d}{dx} \left(\frac{G}{\rho} \right) \right] = 0 \quad (5)$$

معادلات انرژی و بقای گونه‌ها به فرم زیر می‌باشند:

$$\rho u \frac{dT}{dx} - \frac{1}{C_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho}{C_p} \sum_k C_{pk} Y_k V_k \frac{dT}{dx} + \frac{1}{C_p} \sum_k h_k \dot{\omega}_k = 0 \quad (6)$$

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho Y_k V_k) - \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (7)$$

که سرعت نفوذی V_k در معادله‌ی (۷) از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$V_k = \frac{1}{X_k \bar{W}} \sum_{j=1}^K W_j D_{kj} \frac{dX_j}{dx} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k} \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

یا به شکل فرمولاسیون میانگین برای ترکیب داریم:

$$V_k = \frac{1}{X_k} D_{km} \frac{dX_k}{dx} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k} \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

که

$$D_{km} = \frac{1 - Y_k}{\sum_{j \neq k} X_j / D_{jk}} \quad (10)$$

و همچنین \bar{W} و X ، D_k^T ، D_{jk} ، D_{km} ، D_{kj} به ترتیب ضرایب چند جزئی، میانگین ترکیب، دوتایی، نفوذ حرارتی، کسر مولی گونه‌ها و وزن مولکولی می‌باشند.

با توجه به اینکه F و G فقط توابعی از x هستند و نیز با توجه به روابط بالا، u ، T ، ρ ، Y_k نیز فقط توابعی از x می‌باشند. شرایط مرزی برای جریان‌های سوخت (F) و اکسیدکننده (O) در نازل‌ها به شکل زیر هستند.

$$\begin{aligned} x=0: \quad F &= \frac{\rho_F u_F}{2}, \quad G=0, \quad T=T_F, \quad \rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_F \\ x=L: \quad F &= \frac{\rho_O u_O}{2}, \quad G=0, \quad T=T_O, \quad \rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_O \end{aligned} \quad (11)$$

از شرایط مرزی ورودی، شار جرمی کلی شامل نفوذ و جابجایی نسبت به کسر گونه‌ها ($Y_k = Y_{k,F}$) مشخص می‌شود. معادلات دیفرانسیلی (۳) تا (۷) و شرایط مرزی (۱۱) یک مسئله‌ی مقدار مرزی را برای متغیرهای وابسته‌ی (Y_k, F, G, H, T) تشکیل می‌دهند.

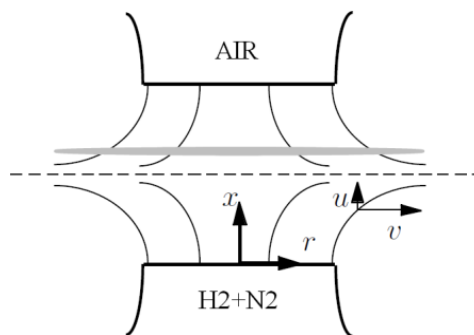
انفصال این معادلات دیفرانسیلی مطابق روش‌های شناخته شده صورت می‌گیرد. ترم نفوذ با استفاده از طرح تفاضل مرکزی با خطای مرتبه‌ی دو در فاصله‌ی مش‌بندی منفصل می‌شود. برای ایجاد همگرایی بهتر در انفصال جمله جابجایی از طرح آپویند که قادر به تشخیص جهت جریان است، استفاده می‌شود. دقت این طرح از مرتبه‌ی یک می‌باشد، اما از ایجاد نوسانات در طول حل روی مش‌بندی درشت جلوگیری می‌کند. حل معادلات با استفاده از OPPDIF [۹] که یک کد عددی به زبان فرترن است، انجام گرفته است.

۳- آزمایش

با استفاده از مدل جریان مخالف نفوذی آزمایشی را در نظرمی‌گیریم که در آن سوخت، گاز هیدروژن و اکسیدکننده هوا است (شکل ۲). در این آزمایش از گاز نیتروژن به عنوان رقیق‌ساز استفاده می‌شود. به منظور ساده‌سازی فرض شده است که به جای اینکه مومنتم‌های سوخت و اکسیدکننده یکسان باشد، سرعت‌های جریان آنها با هم برابر باشند. لذا شعله‌ی ایجاد شده بر

حسب اینکه مومنتم سوخت بیشتر باشد یا اکسیدکننده و نیز اینکه سوخت تا چه حد توسط رقیق کننده تحت تاثیر قرار بگیرد، به سمت سوخت یا هوا جابجا می شود. فشار محیط ثابت و برابر ۱ اتمسفر است. دمای سمت اکسیدکننده ۳۰۰K، دمای سمت سوخت ۱۰۰۰K و فاصله بین دهانه های دو نازل نیز ۲cm در نظر گرفته می شود. آزمایش برای نرخ کرنش های مختلف انجام شده است. نرخ کرنش توسط شادری و ویلیامز [۱۰] به صورت زیر تعریف شده است.

$$a = \frac{2V_{ox}}{L} \left(1 + \frac{V_F \sqrt{\rho_F}}{V_{ox} \sqrt{\rho_{ox}}} \right) \quad (12)$$

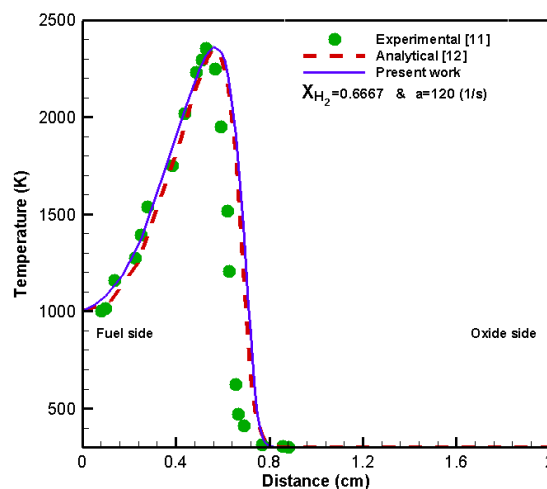


شکل ۲- مدل آزمایشگاهی

۴- نتایج

بررسی اعتبار نتایج:

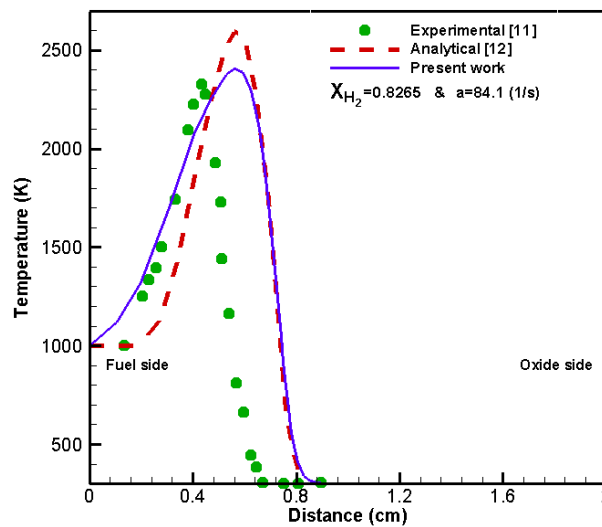
به منظور بررسی اعتبار نتایج، پس از مدل سازی مدل آزمایشگاهی به مقایسه ی منحنی دمای احتراق حاصل از کار حاضر با نتایج مدل آزمایشگاهی [۱۱] که در بخش قبل معرفی شد و منحنی دمای حاصل از نتایج تحلیلی هو و آیساک [۱۲] که به روش تبدیلات تشابهی انجام شده می پردازیم. مقایسه ی حالت اول که برای نرخ کرنش 120 s^{-1} و کسر مولی هیدروژن ۰/۶۶۶۷ انجام شده، در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی دما بر حسب فاصله در احتراق جریان مخالف نفوذی هیدروژن برای حالت اول

همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج عددی کار حاضر که بوسیله‌ی OPPDIF انجام شده و نتایج تحلیلی هو و آیساک [۱۲] با دقت بسیار خوبی بر هم منطبق هستند. نتایج هر دو کار عددی و تحلیلی نیز با دقت خوبی بر نتایج آزمایشگاهی [۱۱] منطبق هستند.

مقایسه‌ی دوم برای حالتی است که در آن نرخ کرنش $84/1s^{-1}$ و کسر مولی هیدروژن $0/8265$ است (شکل ۴). حل عددی کار حاضر نسبت به حل تحلیلی هو و آیساک [۱۲] در این حالت، انطباق بهتری بر نتایج آزمایشگاهی دارد و ماکزیمم دما را با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کند. ماکزیمم دما در نتایج عددی و تحلیلی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی است. دلیل اختلاف نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی و تحلیلی که در حالت دوم (شکل ۴) بیشتر می‌باشد، چشم‌پوشی از تشعشع و نیز تفاوت در تعداد واکنش‌ها و گونه‌های در نظر گرفته شده برای مکانیزم سنتیک شیمیایی است. همچنین ضریب تصحیح تشعشع برای اندازه‌گیری دما در ترموکوپل‌های آزمایش در نظر گرفته نشده است. بنابراین ممکن است که اختلاف نتایج آزمایشگاهی با نتایج حل عددی و تحلیلی در شکل‌های (۳) و (۴) واقعی نباشد.

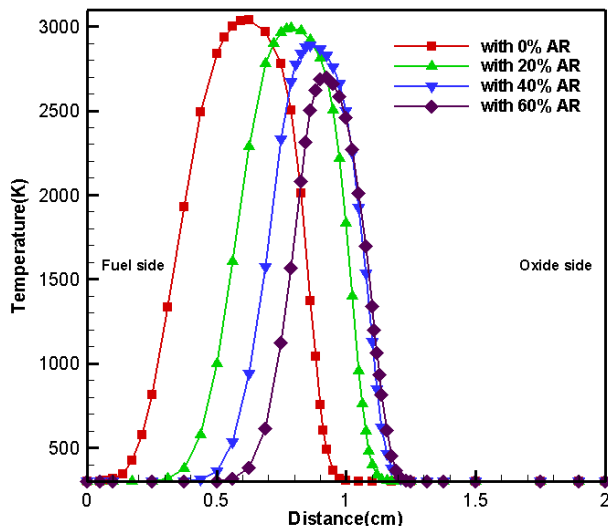


شکل ۴- منحنی دما بر حسب فاصله در احتراق جریان مخالف نفوذی هیدروژن برای حالت دوم

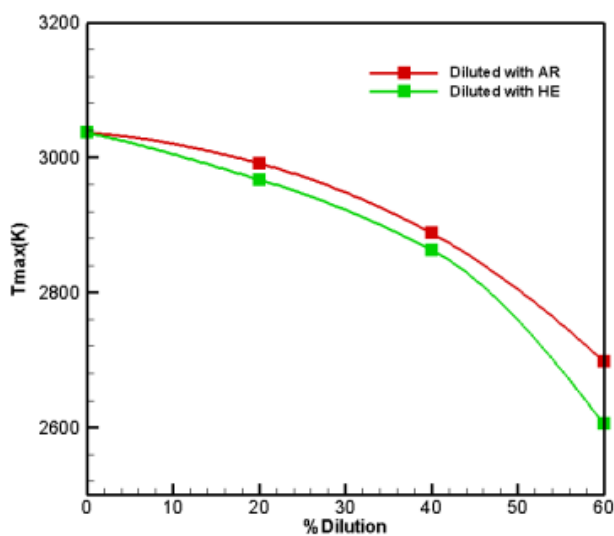
احتراق H_2/O_2 و اثر رقیق‌کننده بر آن:

مدل‌سازی برای چهار شعله با درصد رقیق‌سازی ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ اجرا شده است. فشار محیط ثابت و برابر ۱ atm در نظر گرفته می‌شود و فاصله‌ی دهانه‌ی دو نازل ۲ cm است. دمای ورودی واکنش‌دهنده‌ها در دهانه‌ی نازل‌ها ۳۰۰ K در نظر گرفته شده است.

شکل (۵) منحنی‌های دما بر حسب فاصله‌ی دو نازل را در درصدهای مختلف رقیق‌سازی با Ar نشان می‌دهد. افزایش درصد رقیق‌کننده‌ی Ar باعث کاهش غلظت‌های گونه‌های حاضر در واکنش می‌شود و بنابراین شدت واکنش‌ها کاهش می‌یابد. با کاهش شدت واکنش‌ها، شدت واکنش کلی کاهش یافته و در نتیجه ماکزیمم دما کاهش می‌یابد. رقیق‌کننده‌ی He نیز اثر مشابهی بر منحنی‌های دما دارد. برای مقایسه‌ی همزمان اثر هر دو رقیق‌کننده بر دما، منحنی‌های ماکزیمم دما بر حسب درصد رقیق‌کننده رسم شده‌اند (شکل ۶). همانطور که مشاهده می‌شود منحنی مربوط به حالت رقیق‌سازی با He زیر منحنی مربوط به حالت رقیق‌سازی با Ar قرار گرفته است و این یعنی در یک درصد خاص رقیق‌سازی، رقیق‌کننده‌ی He توانایی بیشتری در کاهش دما دارد. افزایش ۶۰ درصد رقیق‌کننده‌ی He به سوخت، ماکزیمم دما را در حدود ۴۳۰ K کاهش می‌دهد.



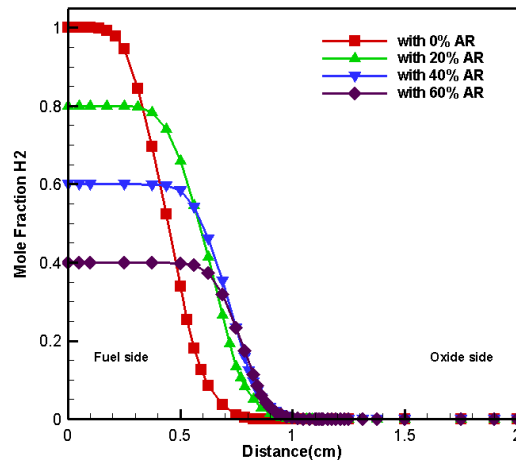
شکل ۵- منحنی‌های دما بر حسب فاصله در درصدهای مختلف رقیق‌سازی



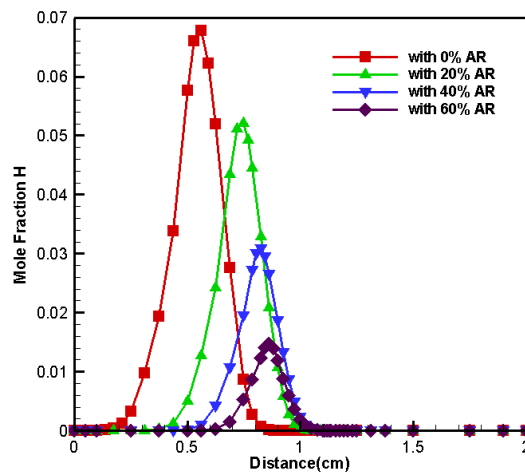
شکل ۶- منحنی‌های دمای ماکزیمم بر حسب درصد رقیق‌سازی

با دقت در شکل (۵) درمی‌یابیم که با افزایش درصد رقیق‌کننده موقعیت ماکزیمم دما به سمت اکسیدکننده حرکت می‌کند و این یعنی سوخت بیشتر به سمت اکسیدکننده نفوذ می‌کند. شکل (۷) که کسر مولی سوخت (H_2) بر حسب فاصله را نشان می‌دهد، موید این مطلب است.

با افزایش درصد رقیق‌کننده و نیز کاهش دما، واکنش‌های شکست بین زنجیره‌های اتم‌های سوخت که منجر به تولید رادیکال H می‌شود کاهش یافته و در نتیجه از مقدار این رادیکال کاسته می‌شود. نتیجه آن است که سوخت کمتر تحت تاثیر رادیکال H قرار گرفته و می‌تواند در سمت اکسیدکننده نفوذ بیشتری داشته باشد. شکل (۸) منحنی کسر مولی رادیکال H را در حضور رقیق‌کننده نشان می‌دهد.

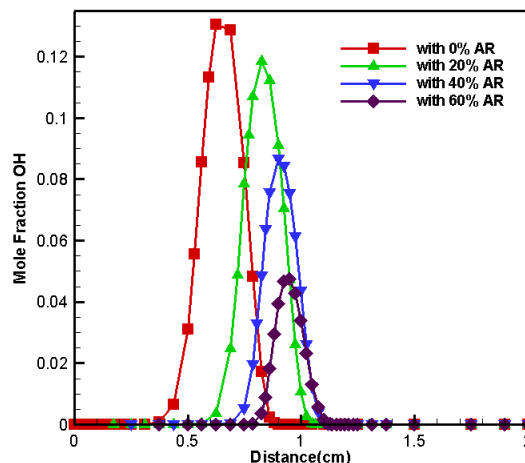


شکل ۷- منحنی‌های کسر مولی H₂ بر حسب فاصله در درصد‌های مختلف رقیق‌سازی



شکل ۸- منحنی‌های کسر مولی H بر حسب فاصله در درصد‌های مختلف رقیق‌سازی

منحنی کسر مولی رادیکال OH در شکل (۹) نشان داده شده است. تولید این گونه نیز همانند رادیکال H با افزایش درصد رقیق‌کننده کاهش می‌یابد. کاهش غلظت بر اثر رقیق‌سازی که منجر به کاهش شدت واکنش‌ها می‌شود علت اصلی کاهش تولید دو رادیکال H و OH است. کاهش تولید این دو رادیکال فعال که به نوعی پیشبرنده‌ی واکنش کلی هستند، سهم بسزایی در کاهش دما دارد.



شکل ۹- منحنی‌های کسر مولی OH بر حسب فاصله در درصد‌های مختلف رقیق‌سازی

حدود خاموشی H_2/O_2 و اثر رقیق‌کننده بر آن:

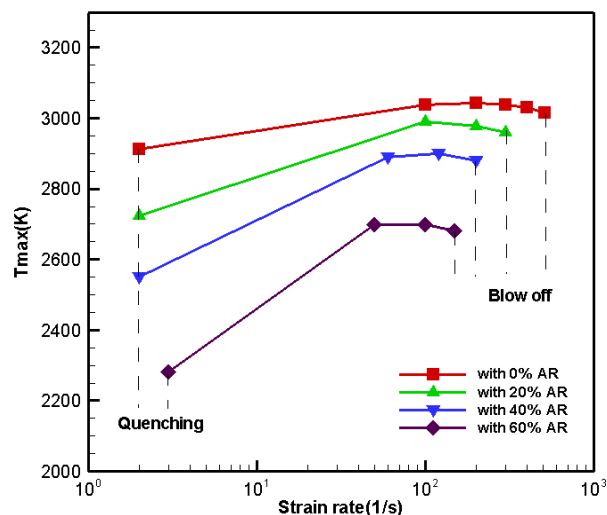
افزودن گونه‌های ساکن و غیر فعال و نیز رقیق‌کننده‌ها باعث تغییر خواص گرمایی و نفوذی سوخت یا اکسیدکننده می‌شود و در نتیجه حدود خاموشی شعله‌ی نفوذی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در اینجا اثر سه پارامتر درصد رقیق‌کننده، فشار محیط و دمای جریان‌های ورودی بر حدود خاموشی جریان مخالف نفوذی H_2/O_2 بررسی می‌شود.

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ماکزیمم دمای شعله‌ی جریان مخالف نفوذی H_2/O_2 در سطوح مختلف رقیق‌سازی با Ar و He را در مقابل نرخ کرنش نشان می‌دهند. با افزایش سطح رقیق‌کننده، غلظت گونه‌ها کم شده و شدت واکنش کلی کاهش یافته و در نتیجه دمای شعله کم می‌شود و احتراق پذیری شدت‌های کرنش باریکتر می‌شود. به عبارتی هر دو حد بلوآف و کونچینگ کاهش یافته و محدوده‌ی احتراق پذیری کاهش می‌یابد. حد بلوآف نسبت به کونچینگ بیشتر تحت تاثیر رقیق‌کننده قرار می‌گیرد.

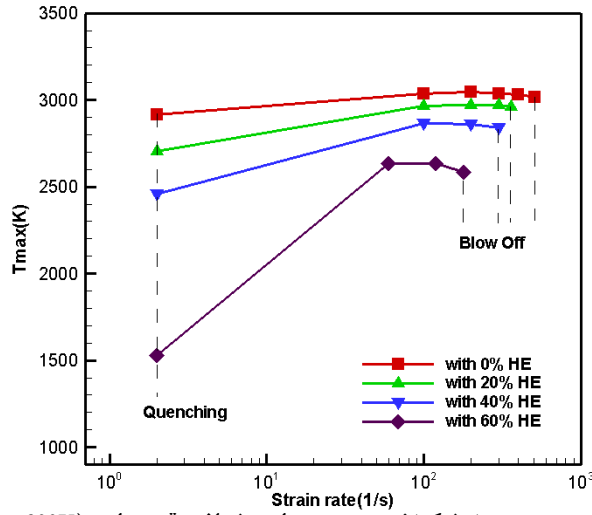
شکل‌های (۱۲) و (۱۳) ماکزیمم دمای احتراق را در مقابل نرخ کرنش و در دماهای مختلف جریان‌های ورودی نشان می‌دهند. در این حالت درصد در نظر گرفته شده برای رقیق‌سازی ۴۰ است. افزایش دمای ورودی با افزایش نرخ شکست زنجیره‌های بین اتم‌ها و تولید بیشتر رادیکال‌های فعال O، H و OH و نیز افزایش شدت واکنش کلی باعث افزایش احتراق پذیری می‌شود. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود حد بلوآف توسعه یافته، اما حد کونچینگ تا این سطح از افزایش دمای جریان‌های ورودی تغییری نکرده است و حدود احتراق پذیری گسترده‌تر شده است.

شکل‌های (۱۴) و (۱۵) ماکزیمم دمای احتراق را در مقابل نرخ کرنش و در فشارهای مختلف محیط نشان می‌دهند. در این حالت نیز ۴۰ درصد رقیق‌سازی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش فشار هر دو حد خاموشی توسعه می‌یابند و این به این دلیل است که غلظت گونه‌های واکنش‌دهنده در فشارهای بالاتر بیشتر است که منجر به افزایش دما نیز می‌شود و این هر دو باعث افزایش شدت واکنش کلی می‌شوند. بنابراین حدود احتراق پذیری گسترده‌تر می‌شود.

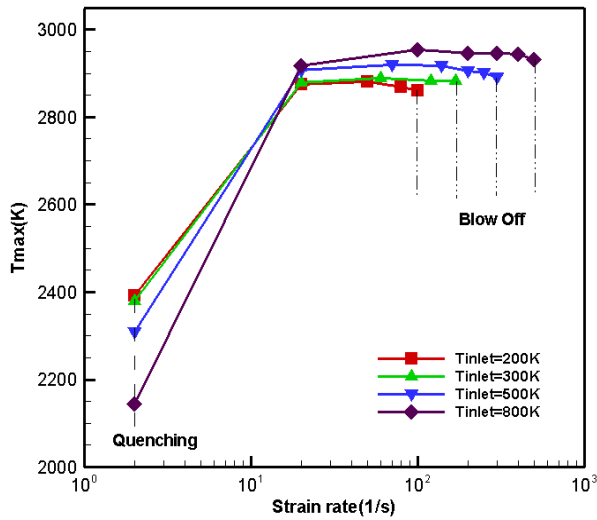
برای مقایسه‌ی اثر دو رقیق‌کننده بر حدود خاموشی، منحنی‌های خاموشی مربوط به حضور هر دو رقیق‌کننده را در یک شکل نمایش می‌دهیم. شکل (۱۶) که اثر رقیق‌کننده بر حدود خاموشی را بررسی می‌کند، نشان می‌دهد که رقیق‌کننده‌ی Ar نسبت به He حدود خاموشی را باریکتر می‌کند و در حضور این رقیق‌کننده، احتراق در محدوده‌ی کمتری از نرخ کرنش‌ها میسر می‌شود. شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به طور جداگانه اثر افزایش دمای ورودی و فشار بر حدود خاموشی را نشان می‌دهند. همانطور که پیشتر گفته شد، افزایش دمای جریان‌های ورودی و فشار حدود خاموشی را افزایش می‌دهند. با دقت در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) مشاهده می‌شود که رقیق‌کننده‌ی He توانایی بیشتری در توسعه‌ی حدود خاموشی دارد.



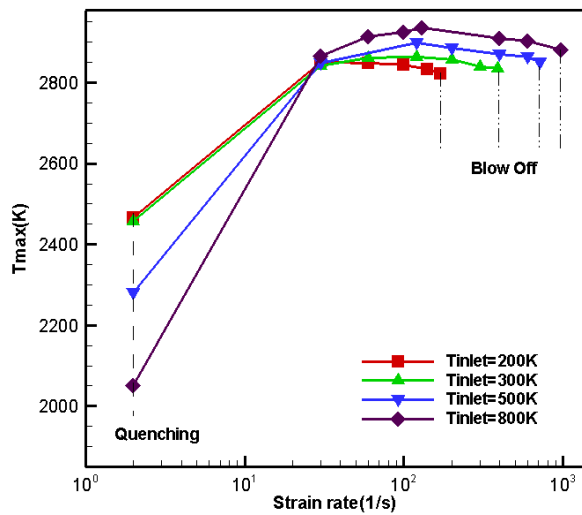
شکل ۱۰- دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در درصدهای مختلف رقیق سازی ($P=1\text{atm}$, $T_{inlet}=300\text{K}$)



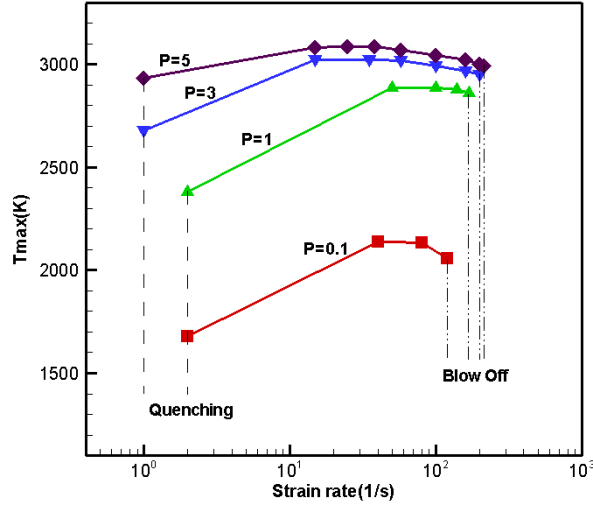
شکل ۱۱- دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در درصدهای مختلف رقیق سازی ($P=1\text{atm}$, $T_{inlet}=300\text{K}$)



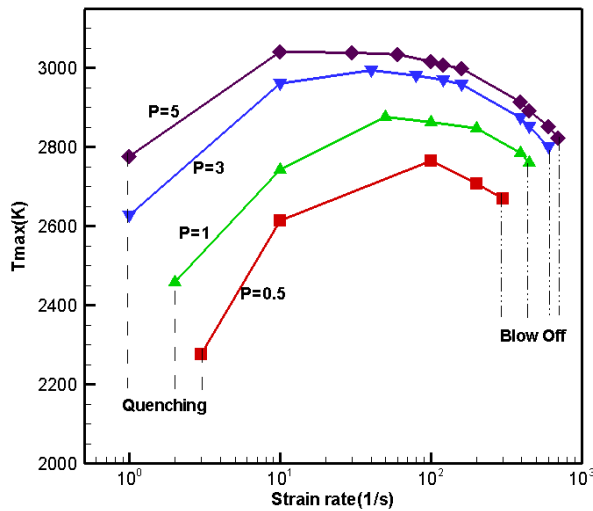
شکل ۱۲- دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در دماهای مختلف جریان‌های ورودی ($P=1\text{atm}$, Dilution=40% Ar)



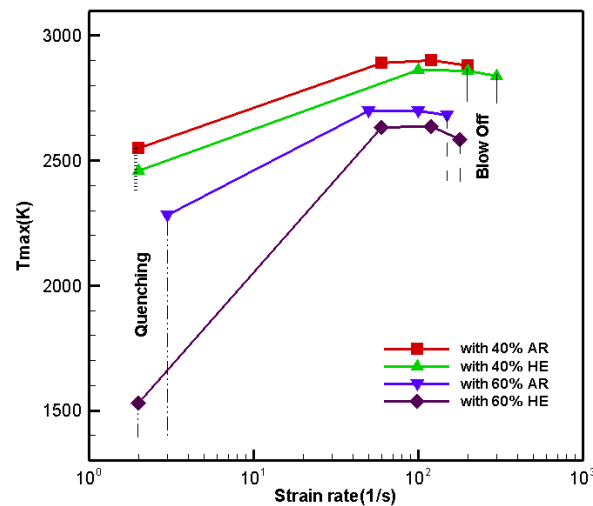
شکل ۱۳- دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در دماهای مختلف جریان‌های ورودی ($P=1\text{atm}$, Dilution=40% He)



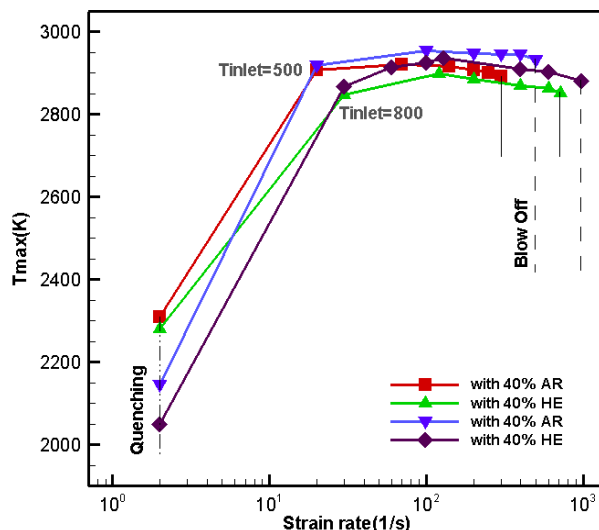
شکل ۱۴- دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در فشارهای مختلف محیط ($T_{inlet}=300\text{K}$, Dilution=40% Ar)



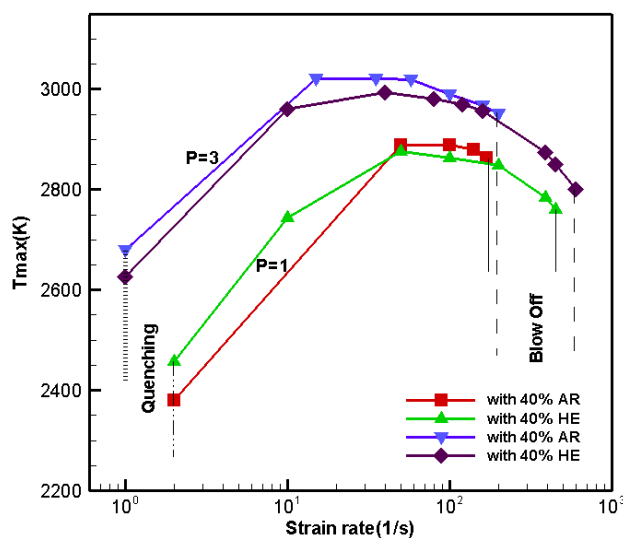
شکل ۱۵- دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در فشارهای مختلف محیط ($T_{inlet}=300\text{K}$, Dilution=40% He)



شکل ۱۶- دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در درصدهای مختلف رقیق‌سازی با Ar و He ($P=1\text{atm}$, $T_{inlet}=300\text{K}$)



شکل ۱۷- دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در دماهای مختلف جریان‌های ورودی ($P=1\text{atm}$, Dilution=40% Ar, 40% He)



شکل ۱۸- دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در فشارهای مختلف محیط ($T_{inlet}=300\text{K}$, Dilution=40% Ar, 40% He)

۵. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق مدل‌سازی شعله‌های جریان مخالف نفوذی هیدروژن در حضور رقیق‌سازهای Ar و He انجام شد. شبیه‌سازی‌ها برای چهار شعله با درصدهای رقیق‌سازی ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ اجرا گردید. برای بررسی اعتبار نتایج، منحنی‌های دمای مربوط به احتراق هیدروژن رقیق‌شده توسط نیتروژن، با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی سایر دانشمندان مقایسه شد. دقت خوب نتایج نشان دهنده‌ی توانایی بالای کد عددی OPPDIF در مدل‌سازی احتراق جریان مخالف نفوذی H_2/O_2 است. رقیق‌کننده‌ها با کاهش غلظت گونه‌ها منجر به کاهش شدت واکنش‌ها و در نتیجه کاهش شدت واکنش کلی می‌شوند که این به کاهش ماکزیمم دما می‌انجامد. اثر رقیق‌سازی و در کنار آن کاهش دما باعث کاهش واکنش‌های شکست بین زنجیره‌های

اتم‌های سوخت می‌شود و در نتیجه رادیکال‌های فعال H و OH کاهش می‌یابند. با کاهش رادیکال‌های H و OH، سوخت کمتر تحت تاثیر این گونه‌ها قرار گرفته و بیشتر در سمت اکسیدکننده نفوذ می‌کند. افزایش رقیق‌کننده به سوخت با کاهش شدت واکنش کلی باعث کوچکتر شدن حدود احتراق پذیری می‌شود که رقیق‌کننده‌ی Ar نسبت به He حدود احتراق پذیری را باریکتر می‌کند. برعکس، افزایش دمای جریان‌های ورودی و فشار محیط، بطور جداگانه، از طریق افزایش شدت واکنش‌ها، حدود احتراق پذیری را گسترده‌تر می‌کنند که در این مورد رقیق‌کننده‌ی He نسبت به Ar توانایی بیشتری دارد.

مراجع

- 1- Ribert, G., Zong, N., Yang, V., Laetitia, P., Darabiha, N., Candel, S., "Counterflow diffusion flames of general fluids: oxygen/hydrogen mixtures". Combustion and Flame; 154:319–30, 2008.
- 2- Park, J., Lee, K., Lee, E., "Effects of CO₂ addition on flame structure in counterflow diffusion flame of H₂/CO₂/N₂ fuel". International Journal of Energy Research; 25:469–85, 2001.
- 3- Shih, H. Y., "Computed extinction limits and flame structures of H₂/O₂ counterflow diffusion flames with CO₂ dilution". international journal of hydrogen energy; 34:4005–4013, 2009.
- 4- Jeong, P., Kang, T. K., June, S. P., Jeong, S. K., Sungcho, K., "A Study on H₂-Air Counterflow Flames in Highly Preheated Air Diluted with CO₂". Energy & Fuels; 19: 2254-2260, 2005.
- 5- Maruta, K., Muso, K., Takeda, K., Niioka, T., Proc. Combust. Inst.; 28:2117-2123, 2000.
- 6- Park, J., Choi, J. W., Kim, S. G., Kim, K. T., Keel, S. I., Noh, D. S., Int. J. Energy Res.; 28:1197-1212, 2004.
- 7- <http://www.engr.colostate.edu/~marchese/combustion10/chemkin.html>
- 8- Karman T. V., Angew. Math. Mech.; 1:233, 1921.
- 9- Lutz, A. E., Kee, R. I., Grcar, J. F., Rupley, F. M., "OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames", Sandia National Laboratories Report SAND; 96-8243, 1997.
- 10-Seshadri, K., Williams, F. A., "Laminar flow between parallel plates with injection of a reactant at high Reynolds number". Int. J. Heat Mass Transfer; 21:251–253, 1978.
- 11-Pellett, G. L., Northam, G. B., Guerra, R., Wilson, L.G., "Opposed Jet Burner Studies of Silane-Methane, Silane-Hydrogen, and Hydrogen Diffusion Flames with Air". CPIA Publication; 457:Vol.1, 391-404, 1986.
- 12-Ho, Y. H., Isaac, K. M., "Analysis of Opposed Jet Hydrogen-Air Counter Flow Diffusion Flame". Technical Memorandum Mae-TM-25, Prepared Under NASA Langley Research Center Grant NAG; 1-861, 1989.