

آنالیز اتلاف اکسرژی فرآیند احتراق گاز طبیعی با هوای دمابالای رقیق

محمدعلی سرودی^۱

مرکز تحقیقات فناوری پیشران، تهران، صندوق پستی ۷۸۱۱-۱۴۱۵۵
(masoroudi@gmail.com)

چکیده

تولید انتروپی و اتلاف اکسرژی در طی فرآیند احتراق گاز طبیعی با هوای دمابالای رقیق در پیکربندی شعله جریان متقابل لایه‌ای و در شرایط اتمسفریک به صورت عددی مطالعه شده است. بدین منظور دو رژیم احتراق HDDI و HCDI مورد توجه قرار گرفته است. در رژیم اول، مخلوط متان و نیتروژن با دمای محیط از یک نازل و هوای دمابالا از نازل دیگر وارد میدان حل شده و در رژیم دوم، مخلوط متان و هوا با دمای محیط از یک نازل و نیتروژن با دمای بالا از نازل دیگر وارد میدان جریان می‌گردد. تولید محلی انتروپی و اتلاف اکسرژی ناشی از چهار فرآیند بازگشت‌ناپذیر چسبندگی، رسانش گرمایی، پخشندگی جرم، و واکنش شیمیایی در رژیم‌های مزبور به تفکیک محاسبه شده و نقش میزان رقیق‌سازی بر این مقادیر مطالعه گردیده است. نتایج محاسبات حاکی از آن است که در هر دو رژیم مزبور، رقیق‌سازی به نحوی موثر موجب کاهش اتلاف اکسرژی کل گردیده است. در اثر رقیق‌سازی، سهم رسانش گرمایی در تولید انتروپی و در هر دو رژیم مورد مطالعه بیشینه شده و سهم واکنش شیمیایی و پخشندگی جرم کاهش یافته است. همچنین همواره سهم اتلاف اکسرژی ناشی از چسبندگی نیز قابل صرف‌نظر کردن بوده است.

واژه‌های کلیدی: تولید انتروپی - اتلاف اکسرژی - احتراق بدون شعله - گاز طبیعی.

۱- مقدمه

بازچرخش گرما و گازهای خروجی در محفظه‌های احتراق که در طی آن مواد واکنشی توسط محصولات احتراق رقیق شده و دمای مخلوط واکنشی به مقادیر فراتر از دمای خوداشتعالی می‌رسد، روشی نویدبخش برای دستیابی به راندمان حرارتی بالا و آلاینده‌های اندک در سامانه‌های نوین انرژی می‌باشد [۱]. کاربرد این رژیم احتراق تحت عناوینی از قبیل احتراق (اکسیداسیون) بدون شعله (flameless oxidation) [۲]، احتراق هوای داغ (high temperature air combustion) [۳]، احتراق ملایم (moderate or intense low-oxygen dilution (MILD) combustion) [۴] و یا احتراق رقیق (diluted combustion) [۵] در صنایع مختلف به اثبات رسیده است. مطالعات گسترده‌ای برای بررسی این مود نوین احتراق انجام شده [۶-۹] و اخیراً مروری بر موضوع نیز در مرجع [۴] ارائه گردیده است.

افزایش دمای مواد واکنشی اگرچه به دلیل نقش مثبت آن در افزایش نرخ واکنش‌های اکسایش در مراحل اولیه فرآیند احتراق می‌تواند موجب بهبود راندمان احتراق گردد، ولیکن عموماً موجب افزایش میزان اکسیدهای نیتروژن ناشی از احتراق نیز می‌شود [۸]. در احتراق بدون شعله، پیش گرم کردن مواد واکنشی به همراه بازچرخش شدید محصولات احتراق به درون ناحیه واکنش (و لذا کاهش چشمگیر غلظت اکسیژن در ناحیه واکنش) موجب می‌شود تا علاوه بر افزایش دمای مواد واکنشی و بهبود راندمان احتراق، میزان اکسیدهای نیتروژن تولیدی نیز محدود گردد. بنابراین به بیان علمی‌تر باید احتراق بدون شعله را معادل با احتراق ملایم مواد واکنشی داغ دانست [۹و۸].

۱- کارشناس ارشد مدل‌سازی احتراق و انفجار

مطابق تعریف، برای حصول احتراق بدون شعله باید اولاً دمای مواد واکنشی فراتر از دمای خوداشتعالی بوده و ثانیاً دمای نهایی، به دلیل بازچرخش محصولات احتراق و کاهش میزان اکسیژن، کمتر از دمای آدیاباتیک شعله باشد [۴]. در این مود احتراق جبهه شعله قابل مشاهده نبوده و تشعشع حرارتی و توزیع دما و غلظت اکسیژن در محفظه تقریباً یکنواخت می‌باشد. همچنین نويز توليد شده توسط احتراق نیز در این حالت ناچیز است. قابلیت این روش در کوره‌های صنعتی و با استفاده از انواع سوخت‌های گازی، مایع، و جامد به اثبات رسیده [۹] و به کارگیری این روش در محفظه‌های احتراق بی‌دررو از قبیل محفظه احتراق توربین‌های گاز همچنان در مرحله توسعه قرار دارد [۱۰-۱۲]. اخیراً به کارگیری این مود نوین احتراق در داخل کشور نیز مورد توجه قرار گرفته است [۱۳-۱۷]. برای مطالعه بنیادی فیزیک حاکم بر این مود احتراق می‌توان با استفاده از رآکتورهای پایه، رژیم‌های مختلف آن را مورد مطالعه قرار داد. از دیدگاه کاربردی، مطالعه چهار دسته مساله بنیادی بدین منظور مورد توجه قرار گرفته که همگی از زیرمجموعه‌های اصلی احتراق بدون شعله می‌باشند. این مسائل عبارتند از:

الف) احتراق اشتعال تراکمی همگن یا HCCI (homogeneous charge compression ignition) [۱۸].

ب) احتراق بدون شعله در رآکتور کاملاً آمیخته یا HBBI (homogeneous burnt backmixing ignition) [۱۹].

ج) فرآیند اشتعال دیفیوژن همگن یا HCDI (homogeneous charge diffusion ignition) [۲۰].

د) فرآیند اشتعال رقیق‌شده داغ یا HDDI (hot diluted diffusion ignition) [۲۱].

در مطالعات قبلی، سرودی و همکاران رژیم‌های همگن HBBI [۱۷] و HCCI [۲۲-۲۶] را مورد مطالعه قرار داده‌اند و در این مطالعه، فرآیند احتراق در دو رژیم HCDI و HDDI مورد توجه قرار گرفته است. در دو رژیم اخیر، احتراق در پیکربندی شعله‌های جریان متقابل (counterflow) انجام شده و به دلیل غیرهمگن بودن سیستم، فرآیندهای انتقال مولکولی نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. شعله جریان متقابل از دیرباز به عنوان یکی از پیکربندی‌های مهم در مطالعات بنیادی احتراق مورد توجه بوده و خوشبختانه مطالعات داخلی قابل توجهی نیز در این حوزه گزارش شده است [۲۷-۳۲]. علاوه بر این، استفاده از ایده شعله جریان متقابل تحت عنوان مدل فلیمت (flamelet) [۳۳]، یکی از رویکردهای اصلی و بسیار موفق در حوزه الگوسازی احتراق آشفته نیز به شمار می‌آید [۳۴] که در این حوزه نیز مطالعات گسترده و مناسبی در داخل کشور انجام و گزارش شده است [۳۵-۳۷]. جزئیات بیشتر در مورد مدل شعله جریان متقابل و فرمولاسیون حاکم بر آن در بخش آتی ارائه گردیده است.

تحلیل تولید انتروپی و اتلاف اکسرژی، روشی موثر برای ارزیابی عملکرد و کمینه‌سازی بازگشت‌ناپذیری قانون دوم در سامانه‌های تبدیل انرژی بوده و با استفاده از آن می‌توان سهم تولید محلی انتروپی توسط فرآیندهای انتقال و واکنش‌های شیمیایی را شناسایی کرده و طراحی‌های موجود یا در حال توسعه را بهینه‌سازی نمود. بر خلاف مطالعه بازگشت‌ناپذیری ترمودینامیکی در فرآیندهای انتقال حرارت و جرم، تحلیل انتروپی سامانه‌های احتراقی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بازگشت‌ناپذیری در سامانه‌های احتراقی، ناشی از تولید انتروپی در طی چهار فرآیند چسبندگی (viscous dissipation)، رسانش گرمایی، اختلاط یا پخشندگی جرم، و واکنش شیمیایی می‌باشد [۳۸].

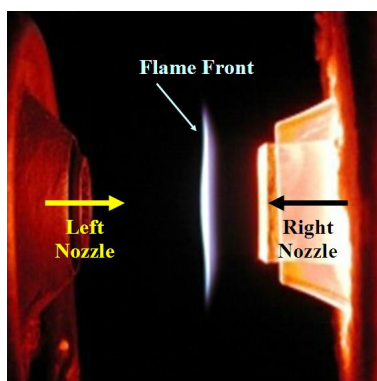
اخیراً در مرجع [۳۹] مرور جامعی بر تحلیل اکسرژی در سامانه‌های احتراقی ارائه گردیده است. آرپاچی (Arpaci) و سلامت (Selamet) [۴۰] با استفاده از آنالیز ابعادی، تولید انتروپی در شعله‌های پیش‌آمیخته لایه‌ای را مطالعه کرده و کمینه فاصله خاموشی (minimum quenching distance) شعله را به اکسترموم تولید انتروپی ارتباط دادند. تولید انتروپی در طی احتراق قطره در مراجع [۴۱-۴۳] مورد توجه قرار گرفته است. عمده‌ترین نتیجه مطالعات مزبور این است که در فرآیند احتراق یک قطره ثابت که تحت کنترل دیفیوژن صورت می‌گیرد، مهمترین عامل تولید انتروپی رسانش گرمایی است. دونبار (Dunbar) و لیور (Lior) [۴۴] بازگشت‌ناپذیری‌های شعله‌های پیش‌آمیخته و پیش‌نامیخته هیدروژن و متان را محاسبه نموده و مشاهده کردند که مهمترین عامل تولید انتروپی در احتراق متعارف سوخت‌های گازی، تبادل انرژی داخلی است. تنگ (Teng) و همکاران [۴۵] معادله تولید انتروپی برای سیالات واکنشی چندجزئی را توسعه داده و تولید انتروپی را ناشی از هفت فرآیند بازگشت‌ناپذیر واکنش شیمیایی، رسانش گرمایی، پخشندگی حرارتی، پخشندگی شیمیایی، پخشندگی ناشی از فشار، جریان چسبند، و فرآیندهای جریان چسبند- پخشند دانستند. دتا (Datta) و سوم (Som) [۴۶] تخریب اکسرژی در احتراق اسپری

را در شرایط کاری مختلف مطالعه نمودند. در مراجع [۴۷ و ۴۸] تولید انتروپی در شعله‌های دیفیوژن لایه‌ای مطالعه شده است. نتایج مطالعات مرجع [۴۷] حاکی از آن است که اصلی‌ترین عامل تولید انتروپی در شعله‌های دیفیوژن لایه‌ای محصور به دیواره، فرآیندهای انتقال می‌باشد. همچنین تحلیل‌های این مرجع نشان داده که پیش‌گرم کردن هوا موجب کاهش میزان تولید انتروپی می‌گردد. نیشیدا (Nishida) و همکاران [۴۹] تولید انتروپی و اتلاف اکسرژی در شعله‌های پیش‌آمیخته و پیش‌نامیخته لایه‌ای را مطالعه نمودند. بررسی اثر نوع سوخت، نسبت هم‌ارزی، و دمای سیال ورودی بر تولید انتروپی در شعله‌های پیش‌آمیخته نشان داده که واکنش شیمیایی عمده‌ترین منبع تولید انتروپی در تمام این شرایط است. بالعکس در مورد شعله‌های دیفیوژن، رسانش گرمایی به جای واکنش شیمیایی عامل اصلی اتلاف اکسرژی در شعله‌های دیفیوژن معرفی شده است. در مرجع [۵۰] نیز تولید انتروپی در ناحیه شعله میکرومحفظة‌ها مطالعه گردیده است. اثر جاذبه بر تولید انتروپی در شعله‌های دیفیوژن لایه‌ای در مرجع [۵۱] بررسی شده و این جمع‌بندی ارایه گردیده که در تمام سطوح میزان جاذبه، انتقال حرارت، منبع اصلی اتلاف اکسرژی در شعله‌های مزبور است. تمام مطالعات مزبور به مطالعه شرایط پایا پرداخته‌اند. اخیراً بریونس (Briones) و همکاران [۵۲] تولید انتروپی در انتشار شعله‌های لایه‌ای متان مملو از هیدروژن را مطالعه و گزارش نموده‌اند. بررسی‌ها نشان داده که افزایش هیدروژن تأثیر چندانی بر راندمان قانون دوم سیستم نداشته است. در داخل کشور نیز مطالعات متنوعی برای بررسی تولید انتروپی و اتلاف اکسرژی در سامانه‌های احتراقی مختلف گزارش شده است [۵۳-۵۵].

هدف از این مطالعه بررسی تولید انتروپی و اتلاف اکسرژی در طی فرآیند احتراق گاز طبیعی در مود احتراق بدون شعله می‌باشد. از میان چهار دسته مساله بنیادی پیش‌گفته، مطالعه بر دو رژیم احتراقی غیرهمگن HCDI و HDDI تمرکز یافته تا بتوان تحلیل سازمان‌یافته‌ای در مورد پدیده‌های بازگشت‌ناپذیر انتقال مولکولی و واکنش‌های شیمیایی به انجام رساند. در این مقاله برای اولین بار آنالیز اتلاف اکسرژی فرآیند احتراق بدون شعله گاز طبیعی در پیکربندی شعله‌های جریان‌متقابل گزارش شده است. بدین منظور در قسمت‌های آتی ابتدا مدل فیزیکی شعله جریان‌متقابل و معادلات بقای حاکم بر آن تشریح شده و رژیم‌های احتراقی مورد مطالعه به تفکیک توصیف گردیده است. سپس معادله انتقال انتروپی معرفی شده و روش‌های عددی مورد استفاده مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها نیز نتایج عددی اعتباردهی شده و تولید انتروپی ناشی از فرآیندهای بازگشت‌ناپذیر به تفکیک برای رژیم‌های احتراقی مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- شعله جریان‌متقابل

در این مطالعه پیکربندی شعله نفوذی جریان‌متقابل به عنوان مدل فیزیکی انتخاب شده است. همانگونه که در شکل (۱) نمایش داده شده، در این پیکربندی دو نازل مدور و متقارن به‌صورت هم‌محور در مقابل یکدیگر قرار داده شده و از این نازل‌ها بسته به رژیم احتراقی مورد مطالعه، ترکیب مناسبی از سوخت، اکسنده، و رقیق‌کننده وارد میدان جریان می‌شود.



شکل ۱ - نمایی از پیکربندی شعله جریان‌متقابل و جبهه شعله تشکیل شده بین دو نازل ورودی

کلیه شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مطالعه با استفاده از نسخه چهارم نرم‌افزار CHEMKIN صورت پذیرفته است. میدان جریان سه‌بعدی متقارن محوری بین دو نازل شکل (۱) را می‌توان با فرض اینکه سرعت شعاعی (در این مطالعه محور r عمود بر محور تقارن و به سمت خارج از محور تقارن راستای شعاعی نامیده می‌شود) به صورت خطی در راستای شعاعی تغییر می‌نماید، به یک مساله یک‌بعدی تبدیل نمود چرا که در این شرایط خواص سیال تنها تابعی از فاصله محوری خواهد بود (در این مطالعه محور x منطبق بر محور تقارن و به سمت نازل سمت راست راستای محوری نامیده می‌شود). با این مدل یک‌بعدی می‌توان تغییرات سرعت، دما و غلظت گونه‌های شیمیایی را در هسته میدان جریان بین دو نازل (با صرف‌نظر از آثار گوشه‌ها) تخمین زد. معادله بقای جرم پایا در دستگاه استوانه‌ای را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان نمود [۵۶]:

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

در رابطه فوق ρ ، u و v به ترتیب معرف دانسیته و مولفه‌های محوری و شعاعی سرعت می‌باشد. با توجه به فرضیات فوق و خطی بودن تغییرات v در راستای شعاعی، مقدار v/r و سایر خواص سیال تنها تابعی از فاصله محوری بوده و می‌توان دو تابع $G(x) = \rho v/r$ و $F(x) = \rho u/2$ را تعریف نمود. بدین ترتیب می‌توان معادله (۱) را به صورت $G(x) = dF(x)/dx$ بازنویسی نمود. همچنین با تعریف مقدار ثابت $H = \partial P / r \partial r$ که در آن P معرف فشار می‌باشد، معادله بقای مومنوم را می‌توان به صورت رابطه (۲) ارایه نمود:

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

که در رابطه فوق μ معرف ضریب لزجت مخلوط می‌باشد. به همین منوال می‌توان معادلات بقای انرژی و گونه‌های شیمیایی را نیز به صورت روابط (۳) و (۴) ارایه کرد:

$$\rho u \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho}{c_p} \sum_{k=1}^{N_s} c_{pk} Y_k V_k \frac{dT}{dx} + \frac{1}{c_p} \sum_{k=1}^{N_s} h_k \dot{w}_k = 0 \quad (3)$$

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho Y_k V_k) - \dot{w}_k W_k = 0 \quad (4)$$

در روابط اخیر T ، c_p ، λ ، c_{pk} ، Y_k ، V_k ، N_s ، h_k ، $\dot{w}_k$ و W_k به ترتیب معرف دما، گرمای ویژه جرمی مخلوط، ضریب هدایت حرارتی مخلوط، گرمای ویژه جرمی گونه شیمیایی k ام، کسر جرمی گونه شیمیایی k ام، سرعت نفوذ گونه شیمیایی k ام، تعداد گونه‌های شیمیایی، انتالپی ویژه جرمی گونه شیمیایی k ام، نرخ خالص تولید گونه شیمیایی k ام و وزن مولکولی گونه شیمیایی k ام می‌باشد. از آنجایی که در این مطالعه از روش میانگین مخلوط جهت محاسبه خواص انتقالی استفاده شده است، لذا می‌توان V_k را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$V_k = -\frac{1}{X_k} D_{km} \frac{dX_k}{dx} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k} \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

در رابطه فوق X_k ، D_{km} و D_k^T به ترتیب بیانگر کسر مولی، ضریب نفوذ مخلوط و ضریب نفوذ حرارتی گونه شیمیایی k ام می‌باشد. مقدار D_{km} را می‌توان با استفاده از ضرایب نفوذ دودویی یا D_{jk} و از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$D_{km} = (1 - Y_k) / \left(\sum_{j \neq k} \frac{X_j}{D_{jk}} \right) \quad (6)$$

در این مطالعه از نسخه سوم مکانیزم شیمیایی بهینه جی‌آرای (GRI3.0) [۵۷] برای توصیف احتراق گاز طبیعی (متان) استفاده شده است. این مکانیزم مشتمل بر ۳۲۵ واکنش بنیادی و ۵۳ گونه شیمیایی و مشتمل بر شیمی نیتروژن می‌باشد. جزئیات بیشتر در مورد این مکانیزم شیمیایی و نحوه محاسبات سینتیک شیمیایی در مرجع [۵۸] ارایه شده است.

۳- رژیم‌های احتراقی

مقادیر سرعت، دما و ترکیب شیمیایی مواد واکنشی تزریق شده از دو نازل شعله جریان‌متقابل در جدول (۱) ارائه شده است. همواره از نازل سمت راست، گاز دمابالا (۱۸۰۰ کلوین) و از نازل سمت چپ گاز با دمای محیط (۳۰۰ کلوین) وارد میدان می‌شود. در دو رژیم HTCR و HDDI (جدول (۱)) از نازل سمت راست همواره هوا و از نازل سمت چپ به ترتیب متان خالص یا مخلوط متان رقیق‌شده با نیتروژن وارد میدان حل می‌شود. به این طریق می‌توان اثر رقیق‌سازی را بر احتراق متان با هوای داغ و در شرایط شعله دیفیوژن مطالعه نمود. در دو رژیم AIDR و HCDDI (جدول (۱)) نیز از نازل سمت راست همواره نیتروژن خالص و از نازل سمت چپ مخلوط متان و هوا با نسبت‌های هم‌ارزی مختلف تزریق می‌گردد. بدین صورت می‌توان اثر رقیق‌سازی بر احتراق متان با هوای داغ و تحت شرایط پیش‌آمیخته را نیز مطالعه نمود. همچنین در تمام محاسبات فشار کاری معادل یک اتمسفر فرض گردیده و از شرط مرزی پلاگ که در آن از حضور گرادیان خواص در مرزهای ورودی هر دو نازل صرف‌نظر می‌شود، استفاده شده است. سایر جزئیات مربوط به رژیم‌های احتراقی مختلف در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- شرایط مرزی و رژیم‌های احتراقی مورد مطالعه

رژیم احتراق	پارامترهای نازل سمت چپ		پارامترهای نازل سمت راست	
HTCR (High Temperature Combustion Regime)	V	100 cm/s	V	175 cm/s
	T	300 K	T	1800 K
	X_{CH_4}	$1/1000$	X_{CH_4}	$0/1000$
	X_{O_2}	$0/1000$	X_{O_2}	$0/210$
	X_{N_2}	$0/1000$	X_{N_2}	$0/790$
HDDI (Hot Diluted Diffusion Ignition)	V	100 cm/s	V	250 cm/s
	T	300 K	T	1800 K
	X_{CH_4}	$0/050$	X_{CH_4}	$0/1000$
	X_{O_2}	$0/1000$	X_{O_2}	$0/210$
	X_{N_2}	$0/950$	X_{N_2}	$0/790$
AIDR (Auto Ignited Deflagration Regime)	V	500 cm/s	V	1300 cm/s
	T	300 K	T	1800 K
	X_{CH_4}	$0/095$	X_{CH_4}	$0/1000$
	X_{O_2}	$0/190$	X_{O_2}	$0/1000$
	X_{N_2}	$0/715$	X_{N_2}	$1/1000$
HCDDI (Homogeneous Charge Diffusion Ignition)	V	500 cm/s	V	1250 cm/s
	T	300 K	T	1800 K
	X_{CH_4}	$0/030$	X_{CH_4}	$0/1000$
	X_{O_2}	$0/200$	X_{O_2}	$0/1000$
	X_{N_2}	$0/770$	X_{N_2}	$1/1000$

۴- اتلاف اکسرژی

در این قسمت معادله انتقال انتروپی معرفی گردیده و نحوه محاسبه مقدار اتلاف اکسرژی نیز ارائه می‌شود. با استفاده از روابط مرجع [۳۸] و فرضیات مراجع [۵۲ و ۴۹] می‌توان معادله انتقال انتروپی را به فرم کلی زیر نوشت:

$$\rho \frac{Ds}{Dt} = \left[\nabla \cdot \left(\frac{\lambda \nabla T}{T} \right) + \sum_k \nabla \cdot (\rho s_k D_{km} \nabla Y_k) \right] + \left[\frac{\tau : \nabla \vec{V}}{T} + \frac{\lambda \nabla T \cdot \nabla T}{T^2} + R_u \sum_k \frac{\rho D_{km}}{X_k} \nabla Y_k \cdot \nabla X_k - \sum_k \frac{\mu_k \dot{\omega}_k}{T} \right] \quad (۷)$$

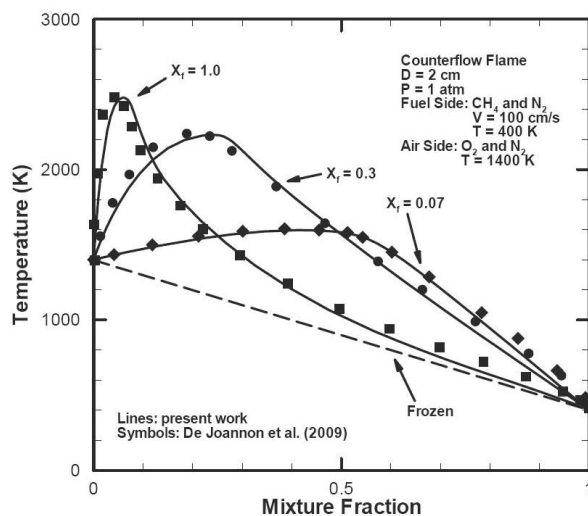
در رابطه اخیر R_u ، τ ، $\vec{V}$ و s_k به ترتیب معرف ثابت جهانی گازها، تانسور تنش لزج، بردار سرعت، انتروپی گونه k ام و پتانسیل شیمیایی گونه k ام می‌باشد. با فرض گاز ایده‌آل می‌توان پتانسیل شیمیایی را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\mu_k = \bar{e}_k(T) - T \bar{s}_k^0(T) + R_u T \ln(X_k P / P_{ref}) \quad (۸)$$

در رابطه اخیر $\bar{e}_k$ و $\bar{s}_k^0$ به ترتیب معرف انرژی داخلی مولی گونه k ام و انتروپی مولی گونه k ام در فشار P_{ref} بوده و فشار مرجع P_{ref} نیز معادل یک اتمسفر می‌باشد. عبارت داخل کروشه اول سمت راست رابطه (۷) مربوط به آهنگ انتقال انتروپی و کروشه دوم مربوط به تولید انتروپی در اثر فرآیندهای فیزیکی مختلف است. در کروشه دوم عبارات ارائه شده به ترتیب مربوط به تولید انتروپی ناشی از اتلاف ناشی از چسبندگی، رسانش گرمایی، اختلاط یا پخشندگی جرم، و در نهایت واکنش‌های شیمیایی می‌باشد. از آنجایی که انتروپی یک متغیر اسکالر غیرفعال می‌باشد، لذا پس از حل میدان جریان واکنشی بین دو نازل و تعیین توزیع گونه‌های شیمیایی، دما و سرعت در میدان حل می‌توان سهم هر یک از فرآیندهای چهارگانه فوق‌الذکر در تولید انتروپی را با حل معادله (۷) تعیین نمود. جزئیات حل معادلات بقا نیز در بخش آتی ارائه شده است.

۵- روش عددی

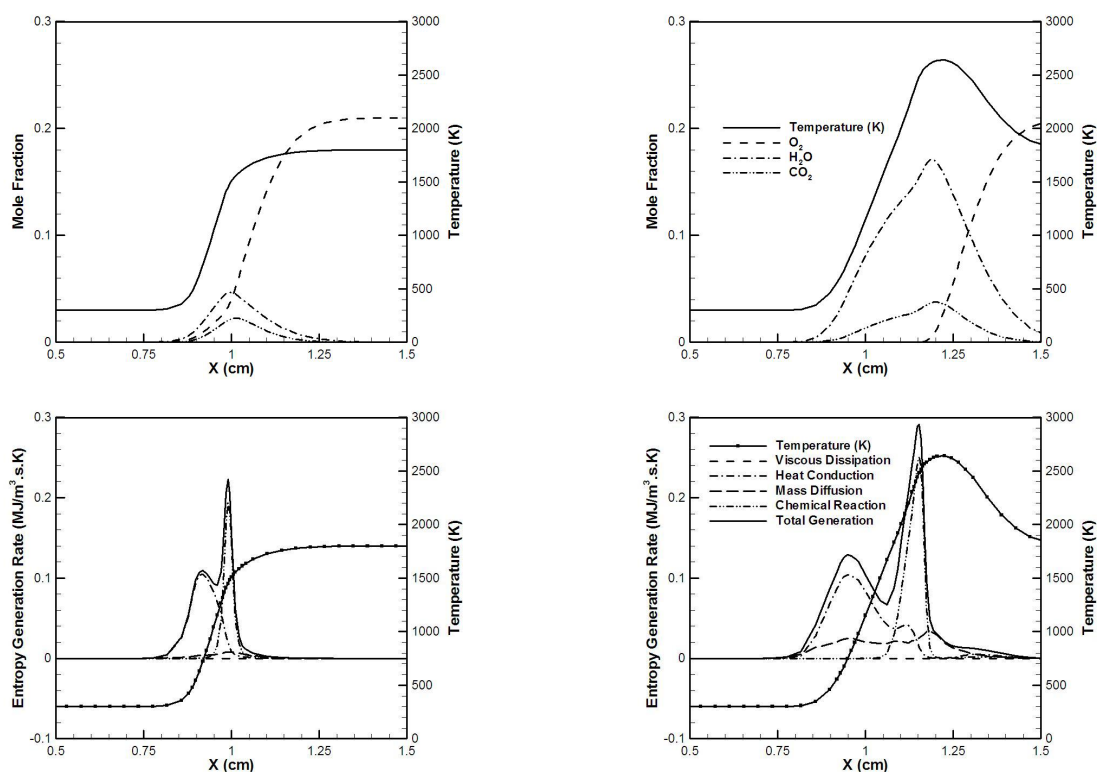
در نرم افزار مورد استفاده گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل مطرح شده در قسمت قبل با استفاده از روش‌های تفاضل محدود متعارف در فواصل شبکه ناهمگون صورت می‌پذیرد. ترم‌های نفوذی با استفاده از فرمولاسیون تفاضل مرکزی و ترم‌های جابجایی با استفاده از فرمولاسیون تفاضل بالادست گسسته می‌گردند. البته امکان انتخاب روش تفاضل مرکزی برای محاسبه ترم‌های جابجایی نیز در نرم‌افزار وجود دارد ولی به دلیل جلوگیری از نوسانات ناخواسته در طی فرآیند حل، فرمولاسیون تفاضل بالادست به صورت پیش فرض در نرم‌افزار در نظر گرفته شده است. همچنین می‌توان فرآیند تطبیق شبکه محاسباتی مورد استفاده در نرم‌افزار را با استفاده از پارامترهای CURV و GRAD هدایت کرده و علاوه بر استفاده از پارامتر NPTS استقلال نتایج محاسبات از سائز شبکه را نیز کنترل نمود. در کلیه محاسبات انجام شده در این مطالعه تعداد نقاط شبکه یا NPTS برابر با ۱۵۰ و مقادیر دو پارامتر کنترلی CURV و GRAD معادل ۰/۱ در نظر گرفته شده است. با انتخاب این مقادیر حل مطلوب و مستقل از سائز شبکه در تمام شرایط جریان ایجاد گردیده است. فاصله نازل‌های سوخت و اکسنده نیز همواره برابر با دو سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. مطابق تعریف مراجع [۲۰ و ۲۱] نرخ کرنش (strain rate) کلی شعله نیز از تقسیم سرعت ورودی گاز از نازل سمت چپ بر مقدار فاصله بین دو نازل محاسبه می‌شود. با تکمیل اطلاعات ورودی می‌توان نتایج اجرای برنامه در شرایط مختلف را مورد بررسی قرار داد. قبل از بررسی نتایج در شرایط مختلف که در قسمت بعد مطرح گردیده است، در این قسمت تایید نتایج اجرای برنامه مد نظر قرار داده می‌شود. از آنجایی که نرم‌افزار مورد استفاده کاملاً معتبر بوده و در شرایط بسیار متنوعی مورد استفاده و آزمون قرار گرفته است و همچنین از آنجایی که اطلاعات ورودی به طور کامل از مراجع معتبر استحصال شده و در شرایط مختلف مورد آزمون قرار گرفته‌اند، لذا تنها برای اطمینان از صحت فرآیند حل، نتایج محاسبات نرم‌افزار برای شعله پیش‌نامیخته متان با هوا، با نتایج ارائه شده در مرجع [۲۱] مقایسه گردیده و نتایج این مقایسه در شکل (۲) ارائه شده است. تطابق مطلوبی بین محاسبات انجام شده در این مطالعه با نتایج مرجع مزبور مشاهده می‌گردد.



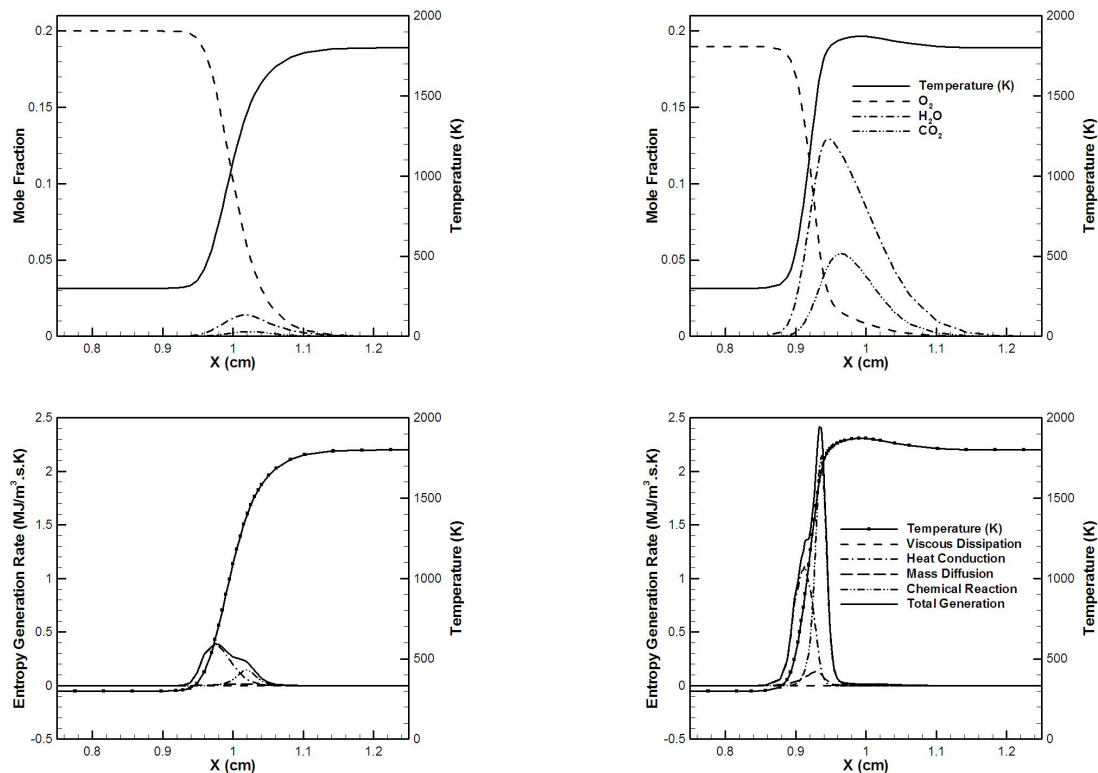
شکل ۲ - اعتبارسنجی نتایج حل با استفاده از شرایط مرزی مختلف

۶- بررسی نتایج

در شکل‌های (۳) و (۴)، ساختار شعله و سهم تولید انتروپی فرآیندهای چهارگانه مورد بحث به تفکیک مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل (۳) دو رژیم HTCR و HDDI و در شکل (۴) دو رژیم AIDR و HCDI مقایسه شده‌اند.

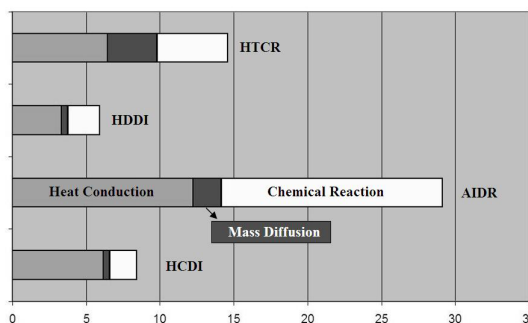


شکل ۳ - ساختار شعله (بالا) و نرخ تولید انتروپی (پایین) در رژیم‌های احتراقی HTCR (راست) و HDDI (چپ)



شکل ۴ - ساختار شعله (بالا) و نرخ تولید انتروپی (پایین) در رژیم‌های احتراقی AIDR (راست) و HCCI (چپ)

با توجه به شکل (۳) می‌توان دریافت که با افزایش رقیق‌سازی، ساختار شعله تغییر نموده و به جای جبهه شعله موجود در حالت HTCR در نمودار دما، در شرایط HDDI نوعی تغییر پیوسته در دمای بین دو نازل قابل مشاهده است. به علاوه به دلیل افزایش مقدار رقیق‌سازی، مقدار محصولات نهایی خصوصاً بخار آب به شدت کاهش یافته است. به دلیل این تغییرات ساختاری بین دو رژیم مزبور، تولید انتروپی نیز دستخوش تغییرات فراوانی شده است. با افزایش رقیق‌سازی به طور کلی تولید انتروپی کاهش چشمگیری از خود نشان داده است. در رژیم HTCR تولید انتروپی تقریباً به صورت مساوی با سه فرآیند اختلاط، رسانش گرمایی و واکنش شیمیایی صورت می‌پذیرد که البته تجمع فرآیندهای مختلف در نقاط متفاوتی است (به عنوان مثال سهم واکنش در حوالی جبهه شعله و سهم رسانش گرمایی در محل ماکزیمم گرادیان دما بیشتر است). بالعکس در شرایط HDDI تولید انتروپی عمدتاً به دلیل واکنش و رسانش گرمایی صورت می‌پذیرد. تغییرات ساختار شعله شکل (۴) برای دو رژیم AIDR و HCCI نیز بیانگر نتایجی مشابه با شکل (۳) می‌باشد. با این وجود تفاوت‌های جالب توجهی بین تولید انتروپی در دو رژیم پیش‌آمیخته مزبور با نمودارهای شکل (۳) قابل مشاهده است. نکته اول این که رقیق‌سازی در این شرایط تاثیر چشمگیری بر کاهش میزان تولید انتروپی داشته است. همچنین با وجود آن که در شرایط AIDR نقش واکنش‌های شیمیایی در تولید انتروپی غالب است، ولی با اعمال رقیق‌سازی و تبدیل مود احتراق به شرایط بدون شعله، سهم واکنش شیمیایی در تولید انتروپی در رژیم HCCI بسیار اندک شده و در این شرایط نیز رسانش گرمایی نقش اول را در تولید انتروپی ایفا می‌نماید. به عبارت دیگر می‌توان این جمع‌بندی را ارائه نمود که در احتراق گاز طبیعی با هوای دمابالای رقیق، چه در رژیم پیش‌آمیخته HDDI و چه در رژیم پیش‌آمیخته HCCI، سهم اول تولید انتروپی مربوط به رسانش گرمایی است. برای مقایسه بهتر، انتگرال آهنگ تولید انتروپی در طول میدان حل محاسبه شده و بدین طریق اتلاف اکسرژی محاسبه شده است. نتایج محاسبات به صورت درصد اتلاف اکسرژی توسط فرآیندهای چهارگانه نسبت به اکسرژی سوخت مورد نظر در شکل (۵) ارائه گردیده است. به دلیل سهم ناچیز چسبندگی در اتلاف اکسرژی از سهم آن در نمودار شکل (۵) صرف‌نظر شده است.



شکل ۵ - درصد اتلاف اکسرژی توسط فرآیندهای فیزیکی رسانش گرمایی، پخشندگی جرم و واکنش شیمیایی در رژیم‌های مختلف

۷- نتیجه‌گیری

تولید محلی انتروپی و اتلاف اکسرژی فرآیند احتراق گاز طبیعی با هوای دمابالا در شعله جریان متقابل لایه‌ای اتمسفریک به صورت عددی مطالعه شد. رژیم‌های مختلف پیش‌آمیخته و پیش‌نامیخته بررسی گردید و نتایج اصلی زیر حاصل شد:

الف) در احتراق پیش‌نامیخته متان با هوای دمابالا در شعله‌های جریان متقابل لایه‌ای (رژیم HTCR)، اتلاف انرژی به صورت تقریباً مشابه از طریق سه فرآیند واکنش شیمیایی، پخشندگی جرم و رسانش گرمایی صورت گرفته و چسبندگی سهمی اندک در تولید انتروپی دارد. به علاوه، بیشترین سهم اتلاف اکسرژی به ترتیب مربوط به رسانش، واکنش، و پخشندگی می‌باشد.

ب) در احتراق پیش‌نامیخته متان با هوای دمابالای رقیق در شعله‌های جریان متقابل لایه‌ای (رژیم HDDI)، اتلاف اکسرژی کل در اثر رقیق‌سازی در مقایسه با رژیم HTCR به نحوی چشمگیر کاهش یافته است. به علاوه در این رژیم اتلاف اکسرژی به صورت تقریباً مشابه از طریق دو فرآیند واکنش و رسانش صورت گرفته و نقش پخشندگی در این رژیم کم‌رنگ‌تر شده است. البته مشابه با رژیم HTCR در این شرایط نیز نقش رسانش بیش از واکنش بوده و نقش چسبندگی نیز قابل صرف‌نظر کردن است. به عبارت دیگر می‌توان دریافت که در احتراق پیش‌نامیخته متان با هوای دمابالا، همواره رسانش گرمایی عمده‌ترین منبع تولید انتروپی و اتلاف اکسرژی به شمار می‌آید.

ج) در احتراق پیش‌آمیخته متان با هوای دمابالا در شعله‌های جریان متقابل لایه‌ای (رژیم AIDR)، اتلاف اکسرژی عمدتاً ناشی از دو فرآیند واکنش و رسانش بوده و نقش پخشندگی اندک است. همچنین مشابه با رژیم‌های پیش‌نامیخته در این شرایط نیز نقش چسبندگی در تولید انتروپی قابل صرف‌نظر کردن است. به علاوه، برخلاف شرایط پیش‌نامیخته، در این رژیم بیشترین سهم اتلاف اکسرژی مربوط به واکنش شیمیایی و پس از آن ناشی از رسانش گرمایی است.

د) در احتراق پیش‌آمیخته متان با هوای دمابالای رقیق در شعله‌های جریان متقابل لایه‌ای (رژیم HCDI)، اتلاف اکسرژی کل در اثر رقیق‌سازی در مقایسه با رژیم AIDR به نحوی چشمگیر کاهش یافته و به علاوه توزیع سهم فرآیندهای بازگشت‌ناپذیر مختلف در اتلاف اکسرژی کل نیز متحول شده است. در اثر رقیق‌سازی در این رژیم پیش‌آمیخته، سهم واکنش شیمیایی به شدت کاهش یافته و فرآیند غالب در تولید محلی انتروپی در این شرایط نیز رسانش گرمایی بوده است. به عبارت دیگر در احتراق پیش‌آمیخته متان با هوای دمابالا، اگرچه در شرایط بدون رقیق‌سازی، واکنش شیمیایی عمده‌ترین منبع تولید انتروپی و اتلاف اکسرژی به شمار می‌آید، ولیکن با اعمال رقیق‌سازی باز هم نقش رسانش گرمایی غالب خواهد بود.

مراجع

- 1- Medwell, P. R., Kalt, P. A. M., Dally B. B., "Imaging of diluted turbulent ethylene flames stabilized on a Jet in Hot Coflow (JHC) burner," *Combustion and Flame*, Vol. 152, pp. 100-113, 2008.
- 2- Wunning, J. A., and Wunning, J. G., "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation" *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 23, pp. 81-94, 1997.

- 3- Tsuji, H., Gupta, A. K., Hasegawa, T., Katsuki, M., Kishimoto, K., Morita, M., *High temperature air combustion*, CRS Press, 2003.
- 4- Cavaliere, A., and De Joannon, M., "Mild combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, pp 329-366, 2004.
- 5- Milani, A., and Saponaro, A., "Diluted combustion technologies," *IFRF Combustion Journal*, Article Number 200101, 2001.
- 6- Galletti, C., Parente, A., and Tognotti, A., "Numerical and experimental investigation of a mild combustion burner," *Combustion and Flame*, Vol. 151, pp 649-664, 2007.
- 7- Mancini, M., Schwoppe, P., Weber, R., Orsino, S., "On mathematical modelling of flameless combustion," *Combustion and Flame*, Vol. 150, pp. 54-59, 2007.
- 8- De Joannon, M., Langella, G., Beretta, F., Cavaliere, A., and Noviello, C., "Mild combustion: process features and technological constraints," *Combustion Science and Technology*, Vol. 153, pp. 33-50, 2000
- 9- Weber, R., Smart, J. P., and Van De Kamp, W. L., "On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp 2623-2629 2005.
- 10- Guyot, D., Bothien, M. R., Moeck, J. P., Lacarelle, A., Schimek, S., Faustmann, T., Paschereit, C. O., Gutmark, E. J., "Pollutant and noise emissions in a Flameless Trapped-Vortex Reheat Burner (FTVRB)," AIAA Paper 2007-5630, 2007
- 11- Bobba, M. K., Gopalakrishnan, P., Periagaram, K., Seitzman, J. M., "Flame structure and stabilization mechanisms in a stagnation point reverse flow combustor," ASME Paper GT2007-28231, 2007.
- 12- Levy, Y., Sherbaum, V., and Arfi, P., "Basic thermodynamics of FLOXCOM, the low- NO_x gas turbine adiabatic combustor," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24 pp. 1593-1605, 2004.
- ۱۳- بیگ محمدی، محمدرضا؛ تابع جماعت، صادق؛ و مردانی، امیر؛ "مطالعه تاثیر مومنتوم هوای ورودی بر فرآیند احتراق گاز طبیعی و تشکیل آلاینده‌ها در یک سیستم احتراق در هوای با درجه حرارت بالا"، مجموعه مقالات پانزدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۶.
- ۱۴- کشیر، بابک؛ مردانی، امیر؛ و تابع جماعت، صادق؛ "مطالعه تجربی اثر پیش‌گرم و رقیق‌سازی اکسیژن بر شعله نفوذی پروپان و گاز طبیعی"، مجموعه مقالات دومین کنفرانس احتراق ایران، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، مشهد، ۱۳۸۶.
- ۱۵- عباسی خزائی، کیومرث؛ حمیدی، علی‌اصغر؛ و رحیمی، مسعود؛ "کوره‌های صنعتی عمل‌کننده با هوای احتراق بسیار داغ و رقیق"، مجموعه مقالات دومین کنفرانس احتراق ایران، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، مشهد، ۱۳۸۶.
- 16- Ghamari, M., Tabejamaat, S., and Mardani, A., "Numerical study on low and high temperature air combustion using different chemical mechanism," 12th Fluid Dynamics Conference, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, 2009.
- ۱۷- سرودی، محمدعلی؛ "مطالعه ترموسینتیکی احتراق بدون شعله گاز طبیعی در رآکتور کاملاً آمیخته"، مجموعه مقالات هفدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۸.
- 18- Dec, J.E., "Advanced compression-ignition engines – understanding the in-cylinder processes," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, pp. 2727-2742, 2009.
- 19- De Joannon, M., Cavaliere, A., Faravelli, T., Ranzi, E., Sabia, P., and Tregrossi, A., "Analysis of process parameters for steady operations in methane mild combustion technology," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2605-2612, 2005.
- 20- De Joannon, M., Matarazzo, A., Sabia, P., and Cavaliere, A., "Mild combustion in homogeneous charge diffusioni gnition (HC DI) regime" *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp.3409 -3416, 2007.
- 21- De Joannon, M., Sabia, P., Sorrentino, G., and Cavaliere, A., "Numerical study of mild combustion in hot diluted diffusion ignition (HDDI) regime," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, pp. 3147-3154, 2009.



انجمن احتراق ایران

FCCI2010-1183

سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی هوافضا

۲۲- هاشمی، حمید؛ مظاهری، کریم؛ سرودی، محمدعلی؛ و غفاریپور، محمد؛ "مدلسازی عددی خوداشتعالی و احتراق گاز طبیعی در موتور دیزل با احتراق همگن"، مجموعه مقالات پانزدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۶.

۲۳- ولیدی، عبدالاحد؛ سرودی، محمدعلی؛ و غفوریان، اکبر؛ "تخمین سریع تاخیر اشتعال موتورهای اشتعال تراکمی همگن توسط شبکه‌های عصبی"، مجموعه مقالات دومین کنفرانس احتراق ایران، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، مشهد، ۱۳۸۶.

۲۴- ولیدی، عبدالاحد؛ سرودی، محمدعلی؛ و غفوریان، اکبر؛ "تأثیر بازچرخش گازهای خروجی و توربوشارژر در موتورهای اشتعال تراکمی همگن"، مجموعه مقالات هشتمین همایش سالانه (بین‌المللی) انجمن هوافضای ایران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، ۱۳۸۷.

25- Validi A.A., Soroudi, M.A., and Ghafourian A., "Pre-ignition heat release effects on autoignition time in HCCI engines," 17th Annual (International) Conference on Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, 2009.

26- Soroudi, M.A., Hashemi H., and Ghaffarpour, M., "Fuel effects on HCCI engines: A comparison between biodiesel and bioethanol ignition times," 18th Annual (International) Conference on Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, 2010 (to be presented).

۲۷- سرودی، محمدعلی؛ و فخرطباطبایی، عباس؛ "بررسی عددی اثر پیش‌آمیختگی جزئی و افزودن هیدروژن در کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق گاز طبیعی"، مجموعه مقالات دهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه یزد، یزد، ۱۳۸۵.

۲۸- آفرین، یاشار؛ و تابع‌جماعت، صادق؛ "مطالعه عددی تأثیر اکسیژن و strain rate بر شعله دیفیوژن جریان counter-flow"، مجموعه مقالات پانزدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۶.

۲۹- تابع‌جماعت، صادق؛ "مطالعه اثر رقیق‌سازی نیتروژن و دی اکسید کربن روی موقعیت و خاموش شدن شعله counterflow"، مجموعه مقالات دومین کنفرانس احتراق ایران، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، مشهد، ۱۳۸۶.

30- Hashemi, H., Soroudi, M.A., and Mazaheri, K., "A numerical study of pressure effects on methane-air partially premixed flames," 17th Annual (International) Conference on Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, 2009.

31- Hashemi, H., Soroudi, M.A., and Mazaheri, K., "Radiation, diffusion and kinetics effects on NO_x formation in non-sooting oxygen-enhanced flamelets," 3rd Fuel and Combustion Conference of Iran, Amirkabir University of Technology, Tehran, 2010 (to be presented).

32- Hashemi, H., Soroudi, M.A., and Mazaheri, K., "Structure of hydrogen in partially premixed counterflow flames at supercritical conditions," 18th Annual (International) Conference on Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, 2010 (to be presented).

33- Williams, F.A., "Progress in knowledge of flamelet structure and extinction," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 26, pp. 657-682, 2000.

34- Peters, N., *Turbulent combustion*, Cambridge University Press, 2000.

۳۵- دوازده‌امامی، محسن؛ فرهنگ، نیایش؛ و شهبازیان، حمیدرضا؛ "مقایسه اثر نمونه‌های جرمی در تخمین کمیات ترموشیمیایی در مدل احتراقی فلیملت آرام"، مجموعه مقالات پانزدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۶.

۳۶- حدیدی، بابک؛ زاهدی، محمدعلی؛ دوازده‌امامی، محسن؛ و عشقی‌نژاد، امیر؛ "بررسی اثر تابع دانسیته احتمال در تخمین کمیت‌های ترموشیمیایی با استفاده از مدل فلیملت"، مجموعه مقالات هفدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۸.

۳۷- دوازده‌امامی، محسن؛ ایوبی، محسن؛ و بیات، علی؛ "مقایسه مدل‌های فلیملت پایا و ناپایا در شعله دیفیوژن متان- هوا"، مجموعه مقالات هفدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۸.

- 38- Hirschfelder, J.C., Curtiss, C.F., and Bird, R.B., *Molecular theory of gases and liquids*, Wiley, 1954.
- 39- Som, S.K., and Datta, A., "Thermodynamic irreversibilities and exergy balance in combustion processes," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, pp. 351-376, 2008.
- 40- Arpaci, V.S., and Selamet, A., "Entropy production in flames," *Combustion and Flame*, Vol. 73, pp. 251-259, 1988.
- 41- Dash, S.K., and Som, S.K., "Transport processes and associated irreversibilities in droplet combustion in a convective medium," *International Journal of Energy Research*, Vol. 15, pp. 603-619, 1991.
- 42- Puri, I.K., "Second law analysis of convective droplet burning," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 2571-2578, 1992.
- 43- Hiwase, S.D., Datta, A., and Som, S.K., "Entropy balance and exergy analysis of the process of droplet combustion," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 31, pp. 1601-1610, 1998.
- 44- Dunbar, W.R., and Lior, N., "Sources of combustion irreversibility," *Combustion Science and Technology*, Vol. 103, pp. 41-61, 1994.
- 45- Teng, H., Kinoshita, C.M., Masutani, S.M., and Zhou, J., "Entropy generation in multicomponent reacting flows" *ASME Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 120, pp. 226-232, 1998.
- 46- Datta, A., and Som, S.K., "Thermodynamic irreversibilities and second law analysis in a spray combustion process," *Combustion Science and Technology*, Vol. 142, pp. 29-54, 1999.
- 47- Datta, A., "Entropy generation in a confined laminar diffusion flame," *Combustion Science and Technology*, Vol. 159, pp. 39-56, 2000.
- 48- Stanciu, D., Isvoranu, D., and Marinescu, M., "Second law analysis of diffusion flames," *International Journal of Applied Thermodynamics*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-18, 2001.
- 49- Nishida, K., Takagi, T., and Kinoshita, S., "Analysis of entropy generation and exergy loss during combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, pp. 869-874, 2002.
- 50- Li, Z.W., Chou, S.K., Shu, C., and Yang, W.M., "Entropy generation during microcombustion," *Journal of Applied Physics*, Vol. 97, 084914, 2005.
- 51- Datta, A., "Effects of gravity on structure and entropy generation of confined laminar diffusion flames," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 44, pp. 429-440, 2005.
- 52- Briones, A.M., Mukhopadhyay, A., and Aggarwal, S.K., "Analysis of entropy generation in hydrogen-enriched methane-air propagating triple flames," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 1074-1083, 2009.
- ۵۳- ابوالفضل اصفهانی، جواد؛ و جوادی، سیدمحمد؛ "تجزیه و تحلیل تولید انتروپی پدیده احتراق در کوره‌های متان- هوا"، مجموعه مقالات دومین کنفرانس احتراق ایران، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، مشهد، ۱۳۸۶.
- ۵۴- میرمحمدی، علی؛ محمدی امین، میثم؛ و انصاری، محمدرضا؛ "تحلیل اکسرژی در فرآیند احتراق موتورهای درونسوز"، مجموعه مقالات شانزدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ۱۳۸۷.
- 55- Fakhimghanbarzadeh, B., Farhanieh, B., and Fani, M., "Exergetic evaluation of fluidized bed for different biomass waste incineration," 12th Fluid Dynamics Conference, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, 2009.
- 56- Lutz, A.E., Kee, R.J., Grcar, J.F., and Rupley, F.M., "OPPDIF: A Fortran program for computing opposed-flow diffusion flames," Sandia National Laboratories Report, SAND96-8243, 1996.
- 57- Bowman, C.T., Hanson, R.K., Davidson, D.F., Gardiner, W.C. Jr., Lissinsky, V., Smith, G.P., Golden, D.M., Frenklach, M., and Goldenberg, M., "GRI-Mech Home Page," http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/, 2000.
- ۵۸- غفوریان، اکبر؛ و سرودی، محمدعلی؛ "حل سینتیک شیمیایی کامل احتراق گاز طبیعی در رآکتور کاملاً آمیخته"، مقالات پروژه‌های تحقیقاتی دانشگاه صنعتی شریف، مجموعه مقالات پژوهشی سال ۱۳۸۲.