

مطالعه تاثیر عدد لوئیس بر شعله های نفوذی آرام

چکیده: یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر رفتار شعله، عدد لوئیس است. هدف اصلی در این پژوهش، مطالعه تاثیر عدد لوئیس بر حد خاموشی شعله نفوذی جریان مخالف است. همچنین تاثیر رقیق سازی سوخت بر عدد لوئیس و حد خاموشی شعله به کمک دو رقیق کننده آرگون و هلیوم مورد مطالعه قرار گرفت. روش پژوهش در این تحقیق، شبیه سازی عددی به کمک نرم افزار شبیه ساز احتراق کمکین است. برای تحلیل بهتر و دقیق تر نتایج از عدد لوئیس موثر به جای عدد لوئیس سوخت یا اکسید کننده استفاده گردید. نتایج نشان می دهند که افزایش کسر مولی رقیق کننده، عدد لوئیس موثر را افزایش می دهد و این به معنی نفوذ حرارتی بیشتر نسبت به نفوذ جرمی است. بیشترین مقدار افزایش عدد لوئیس موثر مربوط به سوخت بوتان است. این مقدار در حضور رقیق کننده آرگون از ۰/۴۲ به ۱/۱۶ و در حضور رقیق کننده هلیوم از ۰/۴۴ به ۱/۷۷ می رسد. افزایش نرخ کرنش منجر به کاهش ماکزیمم دما می شود و همواره ماکزیمم دما در حالت رقیق سازی با هلیوم کمتر از ماکزیمم دما در حالت رقیق سازی با آرگون است. افزایش درصد رقیق کننده نیز ماکزیمم دما را کاهش می دهد.

واژه های راهنما: عدد لوئیس موثر، حد خاموشی، شعله نفوذی جریان مخالف، نفوذ حرارتی، نفوذ جرمی، رقیق سازی

علی اسدی*

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشکده مهندسی،
دانشگاه بزرگمهر قائنات،
قائن

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷

Ali Asadi*

Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Faculty of
Engineering,
Bozorgmehr University of
Qaenat,
Qaen

The study of the effect of Lewis number on the laminar diffusion flames

Abstract: One of the most important and influential parameters on flame behavior is the Lewis number. The main goal of this research is to study the effect of Lewis number on the Extinction limit of counterflow diffusion flame. Also, the effect of fuel dilution on Lewis number and flame extinction limit was studied with the help of two diluents, argon and helium. The research method in this study is numerical simulation with the help of the CHEMKIN combustion simulator software. For a better and more accurate analysis of the results, an effective Lewis number was used instead of the Lewis number of fuel or oxidizer. The results show that the increase in the mole fraction of the diluent increases the effective Lewis number, and this means more thermal diffusion than mass diffusion. The largest increase in the effective Lewis number is related to butane fuel. This value increases from 0.42 to 1.16 in the presence of argon diluent and from 0.44 to 1.77 in the presence of helium diluent. An increase in the strain rate leads to a decrease in the maximum temperature, and the maximum temperature in the dilution state with helium is always lower than the maximum temperature in the state of dilution with argon. Increasing the diluent percentage also decreases the maximum temperature.

Keywords: Effective Lewis number, Extinction limit, Counterflow diffusion flame, Thermal diffusion, Mass diffusion, Dilution

۱- مقدمه

سی و همکاران به شبیه‌سازی دو بعدی شعله‌های جریان مخالف آرام با شیمی یک مرحله‌ای پرداختند. آن‌ها اثرات نرخ کرنش و عدد لوئیس بر توسعه‌ی هسته‌ی احتراق و شرایط بحرانی احتراق را ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که موقعیت احتراق بهینه در نزدیکی شرایط استوکیومتری رخ می‌دهد و به عدد لوئیس و نسبت هم ارزی کلی بستگی دارد [۷].

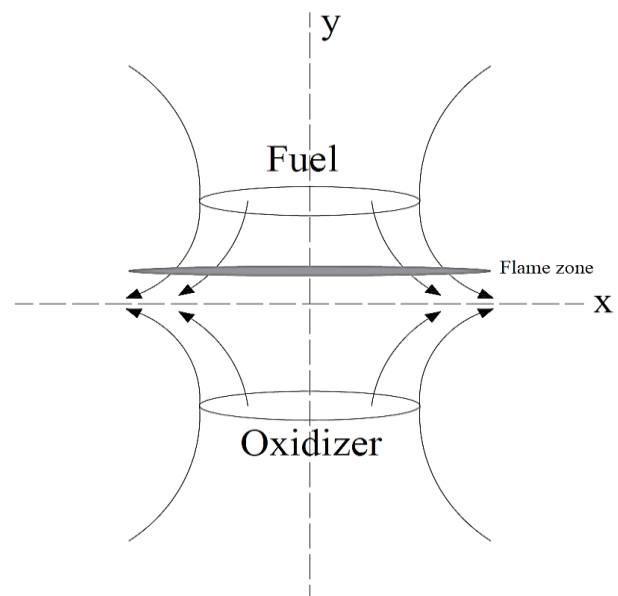
اکبری و همکاران به مدل‌سازی شعله‌های نفوذی با سوخت زیست توده در آرایش جریان مخالف غیر پیش آمیخته پرداختند و اثرات اعداد لوئیس و زلدویچ را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که عدد لوئیس، پارامتر اصلی کنترل‌کننده‌ی رفتارهای نوسانی و ضربانی شعله است. علاوه بر این به نظر می‌رسد که عدد زلدویچ اثرات عدد لوئیس را تشدید می‌کند [۸].

فن و همکاران به مطالعه‌ی جامع احتراق هیدروترمال هیدروژن/اکسیژن با استفاده از مدل شعله‌ی جریان مخالف آرام یک بعدی پرداختند. آن‌ها اثرات نرخ کرنش، فشار، دمای ورودی، عدد لوئیس و غلظت سوخت بر ساختار شعله و حد خاموشی آن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها بیانگر آن است که افزایش نرخ کرنش و فشار، حداکثر دما و ضخامت شعله را کاهش می‌دهد، در حالی که دمای ورودی و غلظت سوخت اثر معکوس دارند. همچنین فرض واحد برای عدد لوئیس، در هر نرخ کرنش، حداکثر دمای شعله را کمتر پیش بینی می‌کند [۹].

کومار و کومار در پژوهشی به بررسی عددی تاثیر عدد لوئیس سوخت بر روی شعله پخشی در یک محیط ریز گرانش ساکن پرداختند. آن‌ها از یک مدل عددی سه‌بعدی استفاده کردند که در آن عدد لوئیس سوخت به اجزای جهتی در امتداد و عمود بر سطح سوخت تقسیم شد تا اثر جهتی انتشار بخار سوخت بر روی شعله، سرعت، پخش و خاموش شدن آن مشخص گردد. بر اساس نتایج آن‌ها برای عدد لوئیس سوخت کمتر از یک شعله خاموش شد و برای عدد لوئیس سوخت بزرگتر از یک شعله رفتار نوسانی داشت [۱۰].

تأثیر نابرابری در نفوذ حرارتی و جرمی که با عدد لوئیس نشان داده می‌شود و به صورت نسبت نفوذ حرارتی مخلوط به نفوذ جرمی تعریف می‌شود، توسط پانتیس و همکاران در شعله‌ی جریان مخالف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تجربی آن‌ها بیانگر آن است که برای نرخ کرنش‌های پایین، دامنه‌ی نوسان نرخ کرنش مورد نیاز برای خاموش شدن شعله آن قدر زیاد است که جریان به طور موقت، جهت خود را تغییر می‌دهد و منجر به اعوجاج میدان جریان مخالف، بی‌ثبات شدن شعله و صرف نظر از مقدار عدد لوئیس، منجر به خاموش شدن نهایی شعله می‌شود [۱۱].

شعله‌ی جریان مخالف نفوذی یکی از انواع شعله‌های غیر پیش آمیخته است. در این نوع شعله، شکل ناحیه‌ی شعله به دلیل سرعت متغیر در دهانه‌ی خروجی نازل‌ها و برخی تأثیرات فرعی دیگر، اغلب صاف نیست. ناحیه‌ی تخت شعله در این مدل، عمود بر محور نازل است. شماتیک مدل شعله‌ی جریان مخالف نفوذی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ شماتیک متقارن محوری مدل شعله‌ی جریان مخالف نفوذی

مطالعات مختلفی به صورت عددی و آزمایشگاهی توسط محققان بر روی مدل شعله‌های جریان مخالف نفوذی انجام شده است. از جمله موضوعات مهمی که در این زمینه مورد توجه قرار گرفته است، پایداری و حد خاموشی شعله می‌باشد [۳-۱]. افزودن گونه‌های بی اثر به سوخت علاوه بر اینکه حد خاموشی شعله را تغییر می‌دهد، ممکن است خواص حرارتی و نفوذی جریان‌های سوخت و اکسید کننده مانند عدد لوئیس که تأثیر زیادی بر دما و حد خاموشی شعله دارد را نیز تغییر دهد [۴].

با توجه به اینکه در نزدیکی حد خاموشی شعله ممکن است واکنش دهنده‌ها از طریق ناحیه‌ی واکنش نشت کنند و منجر به ایجاد شعله‌ی پیش آمیخته شوند، ساختار و دمای شعله‌های نفوذی را نمی‌توان با در نظر گرفتن اعداد لوئیس سوخت و اکسید کننده به طور جداگانه مطالعه نمود [۵]. بنابراین نیاز به عدد لوئیس موثر^۱ است تا بتوان تحلیل صحیحی از شعله‌های نفوذی در نزدیکی حد خاموشی شعله داشت [۶].

^۱ Effective Lewis number

سوختن، دمای شعله، موقعیت جلوی شعله، دمای واکنش دهنده، و توزیع جرم با در نظر گرفتن تأثیرات مؤثر عدد لوئیس، تابش حرارتی و نرخ کرنش ارائه گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که بی‌ثباتی ضربان‌دار شعله با سوخت زیست‌توده در مدل جریان مخالف به طور قابل توجهی نه تنها به عدد لوئیس مؤثر بلکه به تابش حرارتی منتقل شده از منطقه واکنش مربوط است. علاوه بر این، مشخص شد که نرخ کرنش، علاوه بر عدد لوئیس و تابش حرارتی، می‌تواند حالت‌های نوسان شعله را کنترل کند [۱۵].

مطالعه‌ی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که بررسی عدد لوئیس در فرایندهای احتراقی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی ممکن است بررسی اعداد لوئیس سوخت و اکسید کننده به صورت جداگانه منجر به درک صحیحی از شعله و حدود خاموشی آن نشود. بنابراین نیاز است تا فرایند احتراق به کمک یک عدد لوئیس مؤثر در نزدیکی و دور از حد خاموشی شعله مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین نیاز است تا تأثیر این عدد لوئیس مؤثر در سوخت‌های مختلف بررسی و تحلیل گردد تا علاوه بر مطالعه‌ی رفتار شعله سوخت‌های مختلف، درک صحیحی از این تأثیر به دست آید.

در همین راستا در پژوهش حاضر، تأثیر عدد لوئیس مؤثر در نزدیکی و دور از حد خاموشی شعله‌های جریان مخالف نفوذی چهار سوخت هیدروکربنی متان^۲، اتان^۳، پروپان^۴ و بوتان^۵ که همگی از خانواده‌ی آلکان‌ها^۶ با فرمول عمومی یکسان^۷ هستند، مطالعه گردید. همچنین برای مطالعه‌ی تأثیر رقیق‌سازی بر حد خاموشی شعله و عدد لوئیس مؤثر از دو رقیق‌کننده‌ی گاز بی‌اثر آرگون^۸ و هلیوم^۹ که دارای ظرفیت حرارتی یکسانی هستند، استفاده گردید. علاوه بر آن برای مقایسه‌ی دقیق‌تر، نتایج شعله‌ی سوخت‌های مورد مطالعه در این تحقیق با عدد لوئیس سوخت نیز ارائه شد.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر شعله‌ی جریان مخالف نفوذی که در شکل (۱) نشان داده شد، به صورت زیر است [۱۶]:
معادله‌ی بقای جرم:

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

سوارز جونیور و لیروز شعله‌های نفوذی را با در نظر گرفتن نفوذ شیمیایی بی‌نهایت سریع^۱ و همچنین اثرات نفوذ جرم و حرارت مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها اثرات نفوذ را در یک جریان راکتیو محدود متقارن محوری با استفاده از فرمول شواب-زلدوویچ بر حسب اعداد لوئیس گونه‌های واکنش‌دهنده ارزیابی کردند. نتایج برای اعداد لوئیس مختلف سوخت و اکسید کننده به دست آمد که امکان تجزیه و تحلیل دمای شعله غیر آدیاباتیک و تغییرات ارتفاع و عرض شعله را فراهم می‌کند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که برای شعله‌های بیش از حد تهویه شده، عدد لوئیس اکسید کننده نسبت به عدد لوئیس سوخت، تأثیر بیشتری بر فرآیند احتراق دارد [۱۲].

نوسانات ناشی از مکانیزم نفوذ حرارتی برای شعله‌های آرام که عدد لوئیس بزرگتر از یک دارند توسط بهات و چاکراواری به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها تأثیر اعداد لوئیس سوخت و اکسید کننده را به صورت جداگانه برای مخلوط استوکیومتری بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که تعریف عدد لوئیس مؤثر می‌تواند شروع نوسانات و همچنین بزرگی آن‌ها را در ساختار شعله تعیین کند [۱۳].

آکیبا و همکاران به منظور درک رفتارهای شعله‌ی شبه پایدار در میدان جریان مخالف شامل مخلوط‌هایی با عدد لوئیس پایین نزدیک به حد رقیق، آنالیزهای تجربی و عددی برای شعله‌های پراکنده انجام دادند. این آزمایش‌ها با مخلوطی با عدد لوئیس ۰/۳ و ۰/۵ تحت شرایط محیطی میکروگرانش برای حذف اثر شناوری برای شرایط کم کشش انجام شد. مشاهدات تجربی تغییر در شرایط شعله‌های پراکنده با تغییرات عدد لوئیس را نشان داد. شعله‌های پراکنده با عدد لوئیس ۰/۳ را می‌توان در شرایط مخلوط رقیق‌تر مشاهده کرد و در مقایسه با موارد مشاهده شده با عدد لوئیس ۰/۵، کشش بیشتری را تحمل کرد [۱۴].

فراهانی و همکاران برای درک بهتر رفتار شعله، یک مدل انتشار حرارتی با استفاده از یک تابع سینوسی ارائه کردند. این مدل برای ارزیابی رفتار ضربانی در یک شعله جریان مخالف با ابر ذرات زیست توده با در نظر گرفتن عدد لوئیس و اثرات تابش حرارتی استفاده گردید. به منظور بررسی دقیق ویژگی‌های ضربان‌دار یک شعله، معادلات حاکم مرتبط با زمان برای سیستم چند ناحیه‌ای فرضی، نوشته شده و با استفاده از نرم‌افزار متلب به صورت تحلیلی حل شد. ویژگی‌های وابسته به زمان سرعت

^۶ Alkanes

^۷ C_nH_{2n+2}

^۸ Argon (Ar)

^۹ Helium (He)

^۱ Infinitely fast chemistry diffusivity

^۲ Methane (CH₄)

^۳ Ethane (C₂H₆)

^۴ Propane (C₃H₈)

^۵ Butane (C₄H₁₀)

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

با توجه به اینکه F, G, T, ρ, Y_k و u توابعی فقط از x می‌باشند. شرایط مرزی برای جریان‌های سوخت (F) و اکسیدکننده (O) در نازل‌ها به صورت زیر هستند:

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

نرخ کرنش توسط شادری و ویلیامز [۱۸] به صورت زیر تعریف شده است.

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

که در آن L فاصله‌ی بین دهانه‌ی دو نازل و V_F و V_O سرعت‌های سوخت و اکسیدکننده هستند. ρ_F و ρ_O نیز چگالی سوخت و اکسیدکننده هستند.

عدد بی بعد لوئیس به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Le = \frac{\alpha}{D} \quad (13)$$

که در آن α و D به ترتیب نفوذ حرارتی و نفوذ جرمی هستند. عدد لوئیس موثر نیز به صورت زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$Le_e = \frac{Le_F + A Le_O}{1 + A} \quad (14)$$

که در آن Le_O, Le_F و A به ترتیب عدد لوئیس سوخت، عدد لوئیس اکسید کننده و نسبت هم ارزی هستند. نسبت هم ارزی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A = u \frac{Y_F}{Y_O} \quad (15)$$

که در آن u, Y_F و Y_O به ترتیب نسبت جرمی اکسید کننده به سوخت، کسر جرمی سوخت و کسر جرمی اکسید کننده هستند.

انفصال معادلات دیفرانسیلی به روش‌های شناخته شده صورت می‌گیرد. جمله‌ی نفوذ به کمک روش تفاضل مرکزی با خطای مرتبه‌ی دو در فاصله‌ی مش‌بندی منفصل می‌گردد. برای ایجاد همگرایی بیشتر در انفصال جمله جابجایی از روش بالا

که در آن u و v مولفه‌های سرعت شعاعی و محوری و چگالی ρ است. با در نظر داشتن فرضیه‌ی ون کارمان [۱۷] که $\frac{v}{r}$ و سایر متغیرها باید فقط تابعی از x باشند، داریم:

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

با جایگذاری F و G در معادله‌ی پیوستگی و ساده‌سازی داریم:

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

معادله‌ی مومنتم شعاعی با مقدار ویژه‌ی زیر ارضا می‌شود:

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

که در آن P فشار می‌باشد. معادله‌ی مومنتم شعاعی به صورت زیر است:

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

که در آن μ لزجت دینامیکی است. معادلات انرژی و بقای گونه‌ها نیز به شکل 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 در آن $T, C_p, \lambda, C_{pk}, Y_k, V_k, h_k, \dot{\omega}_k$ و W_k به ترتیب دما، ظرفیت گرمایی ویژه‌ی فشار ثابت، هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه‌ی فشار ثابت گونه‌ی k ام، کسر جرمی گونه‌ی k ام، سرعت نفوذی گونه‌ی k ام، آنتالپی گونه‌ی k ام، نرخ تولید یا مصرف گونه‌ی k ام و وزن مولکولی گونه‌ی k ام می‌باشد. سرعت‌های نفوذی به شکل زیر هستند:

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

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

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

دست^۱ که قادر به تشخیص جهت جریان است، استفاده می‌شود. دقت این طرح از مرتبه‌ی یک است اما از ایجاد نوسانات در طول حل روی شبکه درشت جلوگیری می‌کند. حل معادلات با استفاده از OPPDIF^۲ [۱۹] که یک کد عددی به زبان فرترن است، انجام شد. حل کننده‌ی مقدار مرزی دو نقطه‌ای^۳ معادلات گسسته را حل می‌کند. حلگر دو نقطه‌ای از روش نیوتن برای حل معادلات حالت پایدار استفاده می‌کند و زمانی که تکرار نیوتن همگرا نیست به ادغام زمانی می‌پردازد. پس از اینکه ادغام زمانی، راه حل را به سمت حالت پایدار تغییر می‌دهد، حلگر به روش نیوتن باز می‌گردد تا به سرعت در حل ثابت، همگرا شود. در محاسبه اولین حل یک شعله جدید، حلگر ممکن است چندین بار قبل از همگرا شدن بین ادغام زمانی و روش نیوتن به عقب و جلو بپرد. با این حال، هنگامی که یک شعله حل شد، شعله‌های دیگر را می‌توان با تغییر یک شرط مرزی و راه اندازی مجدد از راه حل قبلی بسیار موثرتر حل کرد.

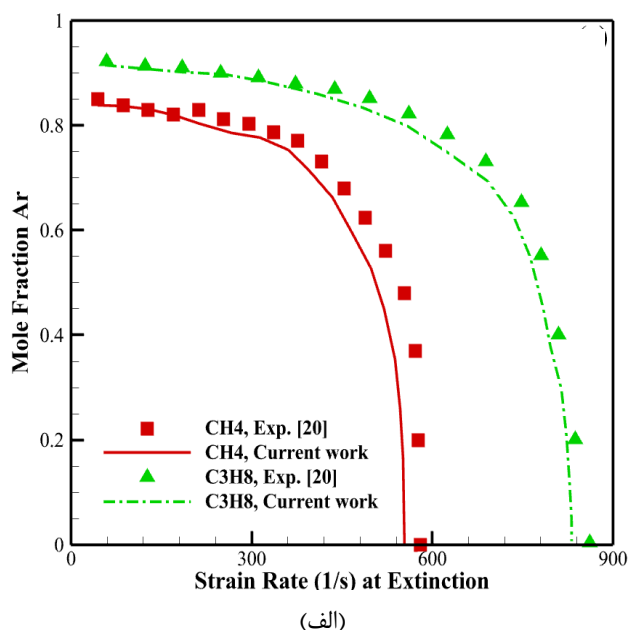
به منظور سرعت بخشیدن به همگرایی، ابتدا یک محاسبات جدید بر روی یک مش درشت شروع می‌شود. هنگامی که حل روی اولین مش همگرا شد، حلگر با افزودن نقاط جدید به مناطق گرادیان، راه حل را اصلاح می‌کند. معیار همگرایی به صورت رسیدن مقادیر باقی مانده‌ها به کمتر از 10^{-5} می‌باشد.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی اعتبار نتایج

برای بررسی اعتبار نتایج به مقایسه‌ی منحنی کسر مولی رقیق کننده بر حسب نرخ کرنش در نزدیکی نقطه‌ی خاموشی با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۰] پرداخته شد. برای رسیدن به نقطه‌ی خاموشی، سرعت‌های خروجی را به تدریج افزایش داده تا شعله خاموش شود. با استفاده از این سرعت می‌توان نرخ کرنش خاموشی در یک کسر مولی خاص رقیق کننده را محاسبه نمود. ماکزیمم دما نیز در این نقطه، ماکزیمم دما در نزدیکی نقطه‌ی خاموشی است.

شکل (۲) منحنی کسر مولی رقیق کننده‌های آرگون و هلیوم را بر حسب نرخ کرنش (که معیاری برای سنجش حد خاموشی است) برای دو سوخت متان و پروپان نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود، افزایش کسر مولی رقیق کننده به کاهش نرخ کرنش می‌انجامد. به طوری که مقدار نرخ کرنش از حدود



³ Twopnt (two-point boundary value solver)

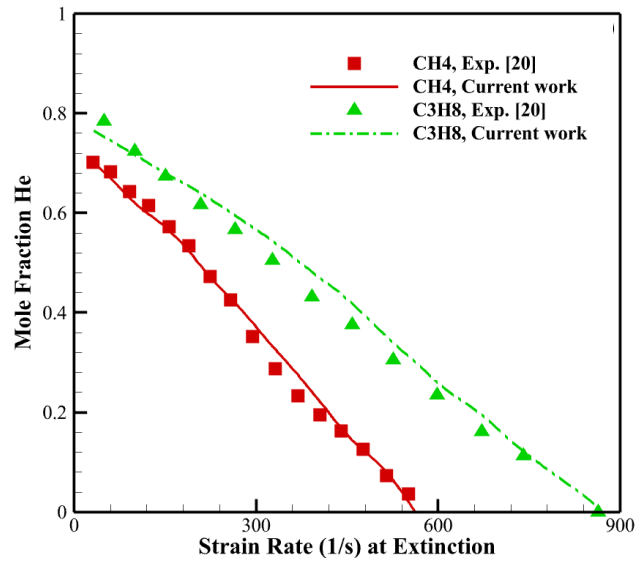
¹ Upwind

² Opposed-flow diffusion flames

حرارتی بالاتری دارد، در شرایط یکسان رقیق‌سازی، دمای ماکزیمم بیشتری را نشان می‌دهد.

جدول (۱) ارزش حرارتی بالایی و پایینی سوخت‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

نکته‌ی دیگری که در شکل (۳) باید به آن توجه داشت آن است که در یک کسر مولی خاص رقیق‌کننده، ماکزیمم دما در حضور رقیق‌کننده‌ی آرگون بیشتر از دمای ماکزیمم در حضور رقیق‌کننده‌ی هلیوم است (شکل‌های ۳-الف و ۳-ب را مقایسه کنید). ویژگی‌های شیمیایی، نقطه‌ی ذوب پایین و سبکی هلیوم نسبت به آرگون باعث می‌شود که رقیق‌سازی با هلیوم منجر به کاهش بیشتر دمای ماکزیمم شود.



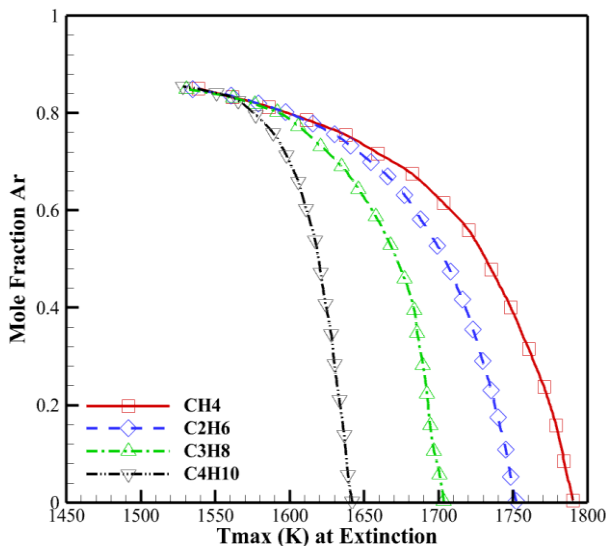
(ب)

شکل ۲ منحنی کسر مولی رقیق‌کننده بر حسب نرخ کرنش در نقطه‌ی خاموشی؛ الف- با رقیق‌کننده‌ی آرگون ب- با رقیق‌کننده‌ی هلیوم

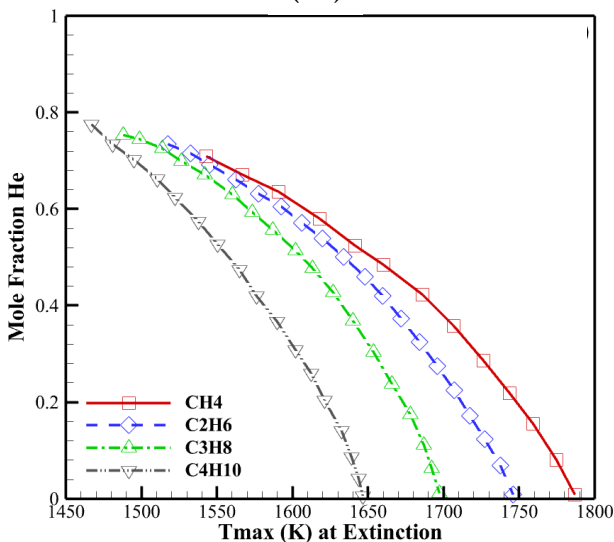
۲-۲- اثر عدد لوئیس و حد خاموشی شعله

شکل (۳) منحنی کسر مولی رقیق‌کننده‌های آرگون و هلیوم بر حسب دمای ماکزیمم در نزدیکی حد خاموشی چهار سوخت متان، اتان، پروپان و بوتان را نشان می‌دهد. در هر یک از سوخت‌های مورد مطالعه، افزایش کسر مولی هر کدام از رقیق‌کننده‌ها باعث کاهش دمای ماکزیمم می‌شود. بیشترین میزان کاهش دمای ماکزیمم برای سوخت متان برابر ۱۶/۴٪ و کمترین میزان کاهش دما برای سوخت بوتان برابر ۷/۴٪ در حضور رقیق‌کننده‌ی آرگون است. این مقادیر در حضور رقیق‌کننده‌ی هلیوم به ترتیب مقدار ۱۵/۸٪ برای سوخت متان و ۱۲/۳٪ برای سوخت بوتان است. علت این پدیده کاهش غلظت گونه‌های حاضر در احتراق و کاهش شدت واکنش‌ها می‌باشد که منجر به کاهش دمای ماکزیمم می‌گردد. از طرفی رقیق‌سازی باعث کاهش ارزش حرارتی سوخت رقیق‌شده می‌شود که منجر به کاهش دمای ماکزیمم می‌گردد.

در یک کسر مولی خاص رقیق‌کننده (به عنوان مثال آرگون در شکل (۳-الف)) سوخت متان، دمای ماکزیمم بیشتری نسبت به اتان و سوخت اتان دمای ماکزیمم بیشتری نسبت به پروپان و همچنین سوخت پروپان دمای ماکزیمم بیشتری نسبت به بوتان را نشان می‌دهد. ارزش حرارتی بالاتر متان نسبت به اتان باعث می‌شود که شعله‌ی این سوخت، ماکزیمم دمای بیشتری را در یک کسر مولی یکسان ایجاد کند. این مطلب در مورد سایر سوخت‌های مورد مطالعه نیز صادق است و سوختی که ارزش



(الف)



(ب)

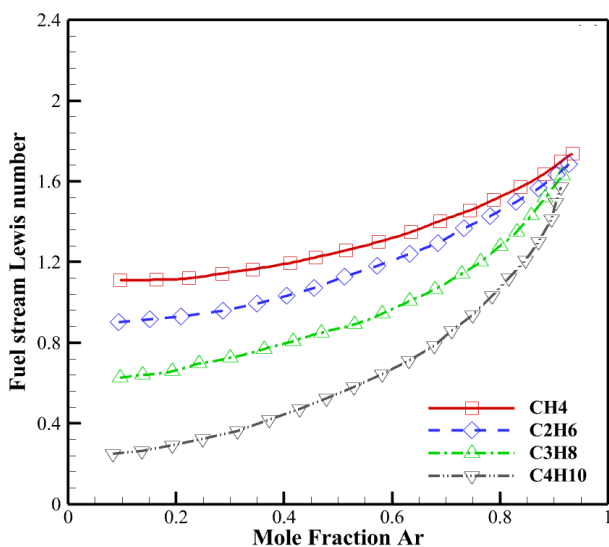
شکل ۳ منحنی کسر مولی رقیق‌کننده بر حسب دمای ماکزیمم در نزدیکی نقطه‌ی خاموشی؛ الف- با رقیق‌کننده‌ی آرگون ب- با رقیق‌کننده‌ی هلیوم

جدول ۱ ارزش حرارتی بالایی و پایینی سوخت‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر

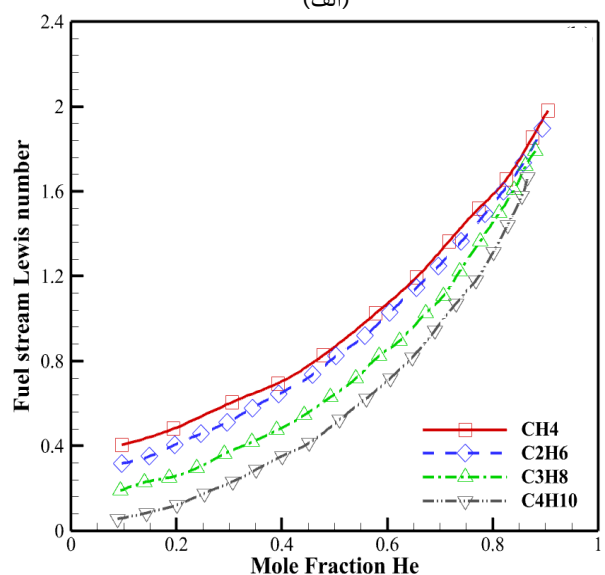
ردیف	نام سوخت	فرمول شیمیایی	ارزش حرارتی	
			بالایی MJ/kg	پایینی MJ/kg
۱	متان	CH ₄	۵۵/۵۰	۵۰/۰۰
۲	اتان	C ₂ H ₆	۵۱/۹۰	۴۷/۶۲
۳	پروپان	C ₃ H ₈	۵۰/۳۵	۴۶/۳۵
۴	بوتان	C ₄ H ₁₀	۴۹/۵۰	۴۵/۷۵

نفوذی نزدیک به خاموشی دارند. از طرفی عدد لوئیس سوخت در دو حالت رقیق‌سازی با آرگون و هلیوم در شرایط یکسان رقیق‌سازی اختلاف زیادی دارد. برای درک بهتر عدد لوئیس سوخت را در حالت حداقل مقدار رقیق‌سازی برای شکل‌های ۴- الف و ۴- ب مقایسه کنید. عدد لوئیس سوخت با حداقل رقیق‌سازی با آرگون بین ۰/۳ تا ۱/۲ و با حداقل رقیق‌سازی با هلیوم در حدود کمتر از ۰/۴ است. بنابراین نیاز به بررسی فرایند احتراق به کمک یک عدد لوئیس موثر (رابطه‌ی (۱۴)) است تا بتوان درک صحیحی از رفتار شعله و حد خاموشی آن داشت.

شکل (۵) تغییرات عدد لوئیس موثر را بر حسب کسر مولی رقیق‌کننده در دو حالت رقیق‌سازی با آرگون و هلیوم برای سوخت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

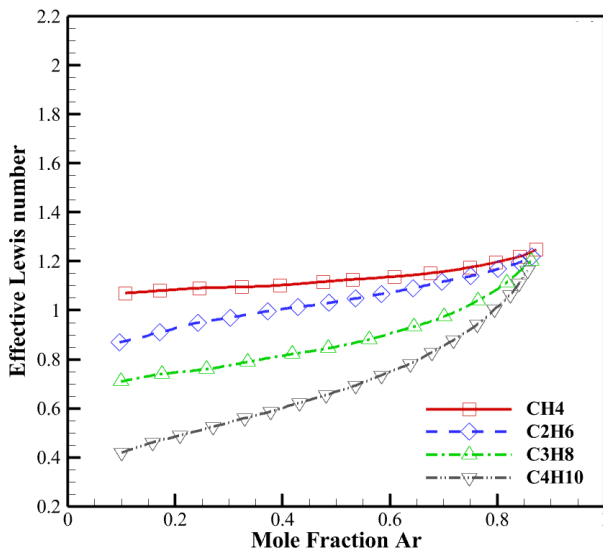
شکل ۴ منحنی‌های عدد لوئیس سوخت بر حسب کسر مولی رقیق‌کننده؛ الف- با رقیق‌کننده‌ی آرگون ب- با رقیق‌کننده‌ی هلیوم

همه منحنی‌های موجود در شکل (۳) با افزایش درصد رقیق‌سازی به سمت هم متمایل می‌شوند که به دلیل آن است که افزایش درصد رقیق‌سازی تا مقادیر بالا باعث می‌شود که سوخت‌ها به مقدار زیادی رقیق شده و دمای ماکزیمم سوخت‌های مختلف مورد مطالعه تا حدی از نوع سوخت مستقل شده و رفتار مشابهی را نشان دهند. این موضوع در حالت رقیق‌سازی با آرگون بیشتر به چشم می‌خورد (شکل ۳- الف).

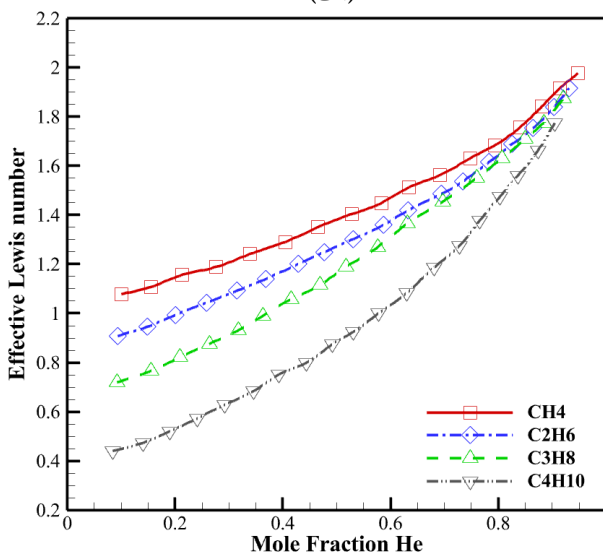
عدد لوئیس سوخت به دلیل تفاوت در خواص نفوذی حرارتی و جرمی رقیق‌کننده‌ها، در دو حالت رقیق‌سازی با آرگون و هلیوم متفاوت است. اما با توجه به اینکه در طول کل آزمایش‌ها اکسید کننده هوا است و رقیق‌سازی برای آن اتفاق نمی‌افتد، عدد لوئیس اکسید کننده ثابت و برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

منحنی تغییرات عدد لوئیس سوخت بر حسب کسر مولی رقیق‌کننده برای دو حالت رقیق‌سازی با آرگون و هلیوم در شکل (۴) نشان داده شده است. در هر دو حالت رقیق‌سازی با آرگون و هلیوم، عدد لوئیس سوخت با افزایش کسر مولی رقیق‌کننده افزایش می‌یابد و این به معنی آن است که با افزایش درصد رقیق‌کننده نفوذ حرارتی نسبت به نفوذ جرمی در حال افزایش است. عدد لوئیس کمتر، از طریق افزایش دما به خاطر افزایش نفوذ جرمی، شعله را در برابر خاموشی تقویت می‌کند و برعکس عدد لوئیس بیشتر، شعله را در برابر خاموشی ضعیف می‌کند. بیشترین میزان افزایش عدد لوئیس سوخت مربوط به سوخت بوتان است که در حضور رقیق‌کننده‌ی آرگون از ۰/۲۵ به ۱/۵۷ و در حضور رقیق‌کننده‌ی هلیوم از ۰/۰۶ به ۱/۶۷ می‌رسد.

هنگامی که شعله‌های نفوذی به شرایط خاموشی نزدیک می‌شوند، ممکن است احتراق ناقص صورت گیرد و برخی واکنش دهنده‌ها تا حدی از منطقه واکنش نشت کنند. بنابراین قبل از سوختن، اختلاط سوخت و اکسید کننده رخ می‌دهد. این امر منجر به احتراق پیش آمیخته می‌شود. در این حالت، عدد لوئیس واکنش دهنده‌های نشت یافته، اثرات قابل توجهی بر شعله‌های

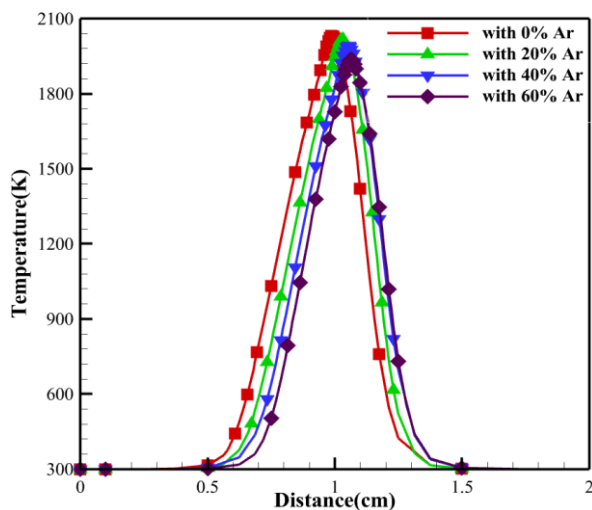


(الف)



(ب)

شکل ۵ منحنی‌های عدد لوئیس موثر برحسب کسر مولی رقیق‌کننده؛ الف- با رقیق‌کننده‌ی آرگون ب- با رقیق‌کننده‌ی هلیوم



شکل ۶ منحنی‌های دما بر حسب فاصله‌ی دهانه‌ی دو نازل برای سوخت متان با رقیق‌سازی آرگون

همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، برای هر دو حالت رقیق‌سازی و برای سوخت‌های مورد مطالعه، عدد لوئیس موثر با افزایش کسر مولی رقیق‌کننده، افزایش می‌یابد. بیشترین میزان افزایش عدد لوئیس موثر مربوط به سوخت بوتان است که در حضور رقیق‌کننده‌ی آرگون از ۰٫۴۲ به ۱٫۱۶ و در حضور رقیق‌کننده‌ی هلیوم از ۰٫۴۴ به ۱٫۷۷ می‌رسد. با افزایش درصد رقیق‌سازی، منحنی‌های سوخت‌های مورد مطالعه به سمت هم‌دیگر متمایل می‌شوند که این موضوع و علت آن در شکل (۳) نیز اشاره شده است.

روند تغییرات منحنی‌ها در شکل (۵) مشابه با شکل (۴) است. اما باید دقت داشت که بر خلاف شکل (۴)، مقدار عدد لوئیس موثر در حداقل رقیق‌سازی با آرگون و هلیوم برای هر سوخت مورد مطالعه با دقت خوبی برابر است و این نشان دهنده‌ی عملکرد مناسب عدد لوئیس موثر در تحلیل شعله است. برای هر سوخت به طور جداگانه، در کل بازه‌ی کسر مولی رقیق‌کننده، عدد لوئیس موثر در حالت رقیق‌سازی با هلیوم، بزرگتر از عدد لوئیس موثر در حالت رقیق‌سازی با آرگون است. این به معنی دمای پایین‌تر شعله‌های رقیق‌شده با هلیوم است و نرخ کرنش خاموشی کمتر این شعله‌ها را نیز توجیه می‌کند.

افزایش کسر مولی رقیق‌کننده برای یک سوخت خاص باعث می‌شود که اختلاف میان عدد لوئیس موثر سوخت رقیق‌شده با آرگون و عدد لوئیس موثر سوخت رقیق‌شده با هلیوم، رفته رفته افزایش یابد. این روند به خوبی، روند تغییرات منحنی‌های شکل (۲) را تایید می‌کند که در آن اختلاف نرخ کرنش خاموشی بین شعله‌های رقیق‌شده با آرگون و هلیوم با افزایش کسر مولی رقیق‌کننده برای هر دو شعله‌ی متان و پروپان افزایش می‌یابد. این روند با عدد لوئیس موثر شکل (۵) نیز قابل توضیح است، زیرا شعله‌های با مقادیر کم عدد لوئیس موثر، منجر به دمای شعله بالاتر می‌شوند و بنابراین برای خاموش شدن به نرخ کرنش بیشتری نیاز دارند.

شکل (۶) منحنی‌های دما بر حسب فاصله‌ی دهانه‌ی دو نازل در هندسه‌ی جریان مخالف برای سوخت متان در مقادیر مختلف درصد رقیق‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار ماکزیمم دما با افزایش درصد رقیق‌سازی به میزان ۹۴K (معادل ۰٫۵٪) کاهش می‌یابد. همچنین موقعیت ماکزیمم دما به سمت اکسیدکننده حرکت می‌کند که به دلیل کاهش واکنش‌های شکست زنجیره‌های اتم سوخت و متعاقب آن کاهش تولید رادیکال‌های فعال H و OH است. با کاهش این رادیکال‌های فعال، سوخت کمتر تحت تاثیر آن‌ها قرار گرفته و نفوذ بیشتری در سمت اکسیدکننده دارد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر عدد لوئیس و رقیق سازی سوخت بر حد خاموشی شعله‌ی جریان مخالف نفوذی، مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا از چهار سوخت متان، اتان، پروپان و بوتان و دو رقیق کننده‌ی آرگون و هلیوم استفاده گردید. نرخ کرنش در حالت افزودن هلیوم به جریان سوخت همواره کمتر از حالت افزودن آرگون به جریان سوخت با درصد رقیق سازی یکسان است.

در مقایسه با تحقیقات قبلی، برای تحلیل بهتر و دقیق تر نتایج، از عدد لوئیس موثر برای ارائه‌ی نتایج استفاده گردید. عدد لوئیس موثر با افزایش کسر مولی رقیق کننده، افزایش می‌یابد که منجر به کاهش دمای ماکزیمم خواهد شد و حد خاموشی شعله را تضعیف می‌کند. بیشترین مقدار افزایش عدد لوئیس مربوط به سوخت بوتان است. این مقدار در حضور رقیق کننده‌ی آرگون از ۰/۴۲ به ۱/۱۶ و در حضور رقیق کننده‌ی هلیوم از ۰/۴۴ به ۱/۷۷ می‌رسد. عدد لوئیس موثر برای سوخت‌های مختلف مورد مطالعه همواره در کل سطح رقیق سازی با آرگون کمتر از حالت رقیق سازی با هلیوم است و این موضوع دمای ماکزیمم بالاتر شعله در حالت رقیق سازی با آرگون را توجیه می‌کند. افزایش نرخ کرنش، ماکزیمم دما را کاهش می‌دهد. حد خاموشی شعله در حضور رقیق کننده‌ی هلیوم، کمتر از حد خاموشی شعله در حضور رقیق کننده‌ی آرگون است و به طور کلی ماکزیمم دما در شرایط یکسان در حضور رقیق کننده‌ی آرگون بیشتر از ماکزیمم دما در حضور رقیق کننده‌ی هلیوم است.

۵- فهرست علائم و اختصارات

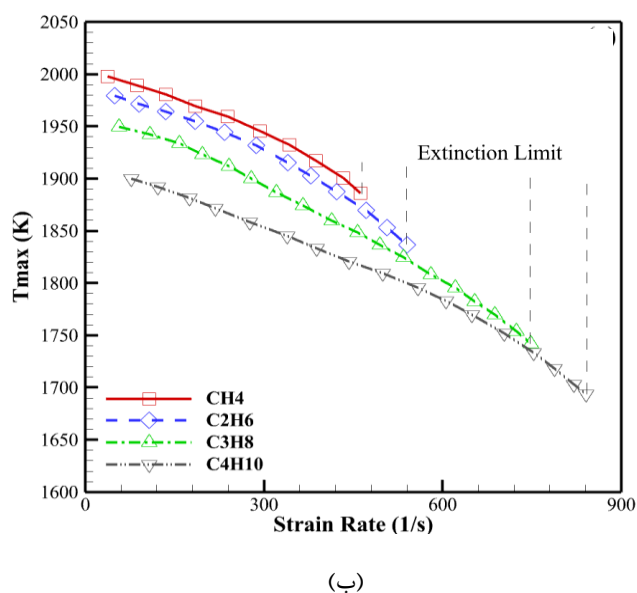
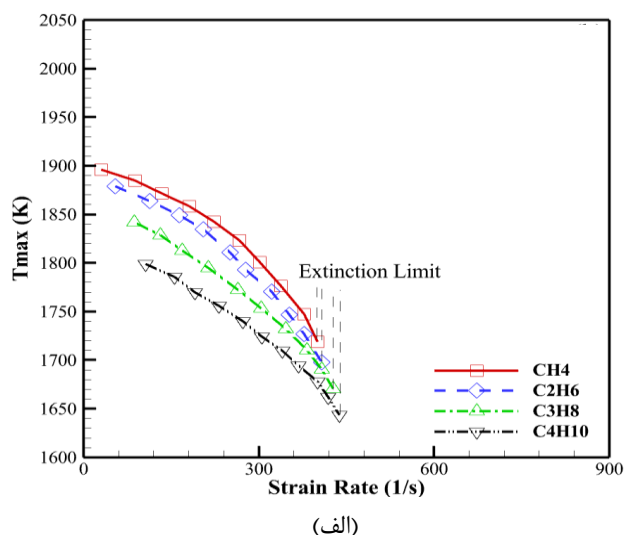
فهرست علائم و اختصارات مورد استفاده در روابط و معادلات پژوهش حاضر به شرح زیر است.

علائم انگلیسی

A	نسبت هم ارزی (Kg/Kg)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه‌ی فشار ثابت (J/kg.K)
D	نفوذ جرمی (m^2/s)
D_{kj}	ضریب نفوذ چند جزئی (m^2/s)
D_k^T	ضریب نفوذ حرارتی (Kg/m.s)
D_{km}	ضریب نفوذ میانگین ترکیب (m^2/s)
D_{jk}	ضریب نفوذ دوتایی (m^2/s)
h	آنتالپی (J/Kg)
Le	عدد لوئیس (بدون بعد)
P	فشار (Pa)
T	دما (K)
u	مولفه‌ی سرعت شعاعی (m/s)

در ادامه به بررسی دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در حد خاموشی شعله برای سوخت‌های مورد مطالعه در حالت‌های رقیق سازی با آرگون و هلیوم پرداخته می‌شود (شکل ۷). مقدار رقیق سازی در منحنی‌های این شکل ۴۰٪ در نظر گرفته شده است.

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، مقدار ماکزیمم دما با افزایش نرخ کرنش، کاهش می‌یابد. برای هر سوخت به طور جداگانه، منحنی ماکزیمم دما با رقیق سازی هلیوم، مقادیر کمتری را نسبت به منحنی ماکزیمم دما با رقیق سازی آرگون نشان می‌دهد. این موضوع حتی در نرخ کرنش‌های کم نیز به چشم می‌خورد. نرخ کرنش خاموشی برای سوخت‌های مختلف مورد مطالعه، در حالت رقیق سازی با هلیوم کمتر از نرخ کرنش خاموشی در حالت رقیق سازی با آرگون است که به این موضوع در تحلیل نتایج شکل (۵) نیز اشاره شده بود.



شکل ۷ منحنی‌های دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش؛ الف- با رقیق کننده‌ی آرگون ب- با رقیق کننده‌ی هلیوم

- numbers," *Combustion Theory and Modelling*, vol. 3, no. 1, p. 123, 1999, doi: [10.1088/1364-7830/3/1/007](https://doi.org/10.1088/1364-7830/3/1/007).
- [7] S. Xie, Z. Lu, and Z. Chen, "Effects of strain rate and Lewis number on forced ignition of laminar counterflow diffusion flames," *Combustion and Flame*, vol. 226, pp. 302-314, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.12.027>.
- [8] S. Akbari, M. F. Farahani, S. Sadeghi, M. Hajivand, F. Xu, E. Mohtarami, and M. Bidabadi, "Pulsating diffusion flames fed with biomass particles in counter-flow arrangement: Zeldovich and Lewis numbers effects," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 46, p. 101263, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101263>.
- [9] M. Fan, S. Shao, H. Wang, and Y. Lu, "Numerical analysis of hydrogen-oxygen hydrothermal combustion: Laminar counterflow diffusion flames," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 278-292, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.214>.
- [10] P. Kumar and A. Kumar, "Effects of fuel Lewis number on self-propagating flame spread over thin solid fuels in microgravity," *Combustion and Flame*, vol. 219, pp. 293-311, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.05.021>.
- [11] A. Potnis, V. R. Unni, H. G. Im, and A. Saha, "Extinction of non-equidiffusive premixed flames with oscillating strain rates," *Combustion and Flame*, vol. 234, p. 111617, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111617>.
- [12] R. L. Soares-Júnior and A. J. Leiroz, "A numerical study on preferential diffusion effects in coflowing laminar reacting jets," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 1, p. 12, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03309-6>.
- [13] D. Bhatt and S. Chakravarthy, "Nonlinear Flame Dynamics for Laminar Flame in a Co-flow Mixing Layer with Widely Varying Premixedness: Preferential Diffusion and Stoichiometry Effects," *Combustion Science and Technology*, vol. 194, no. 7, pp. 1321-1339, 2022, doi: <https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1811699>.
- [14] T. Akiba, A. Tsunoda, T. Tezuka, Y. Morii, H. Nakamura, and K. Maruta, "DMD analysis on sporadic flame behaviors in low-Lewis-number counterflow under microgravity," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 40, no. 1-4, p. 105233, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.105233>.
- مولفه‌ی سرعت محوری (m/s) v
 سرعت نفوذی (m/s) V
 وزن مولکولی ($Kg/Kmol$) W
 وزن مولکولی متوسط ($Kg/Kmol$) \bar{W}
 کسر مولی ($Kmol/Kmol$) X
 کسر جرمی (kg/kg) Y
- علایم یونانی
- چگالی (kg/m^3) ρ
 لزجت دینامیکی ($N.s/m^2$) μ
 ضریب انتقال حرارت هدایتی ($W/m.K$) λ
 نرخ تولید یا مصرف گونه ($Kmol/s.m^3$) $\dot{\omega}$
 نفوذ حرارتی (m^2/s) α
 نسبت جرمی اکسید کننده به سوخت (KgO/KgF) u
- زیرنویس‌ها
- مؤثر e
 سوخت F
 گونه‌ی k
 اکسیدکننده O
- ۶- مراجع
- [1] R.-H. Chen, J. F. Driscoll, J. Kelly, M. Namazian, and R. Schefer, "A comparison of bluff-body and swirl-stabilized flames," *Combustion science and Technology*, vol. 71, no. 4-6, pp. 197-217, 1990, doi: <https://doi.org/10.1080/00102209008951632>.
- [2] J. Khadem and A. Asadi, "Numerical Study on Counterflow Diffusion Flames of Natural Gas with CO2 Dilution," *Fuel and Combustion*, vol. 4, no. 2, pp. 17-28, 2011, [In Persian], doi: https://www.jfnc.ir/article_46151_da9790e10f9d9af62e7c685c28ef336e.pdf.
- [3] A. Asadi and J. Khadem, "The Numerical Study of Extinction Limits and Structure of H2/O2 Counterflow Diffusion Flame with Ar and He Dilution," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 24, no. 2, pp. 57-66, 2013, [In Persian], doi: [10.22067/fum-mech.v24i2.27189](https://doi.org/10.22067/fum-mech.v24i2.27189).
- [4] C. Chen and S. Sohrab, "Simultaneous effects of fuel/oxidizer concentrations on the extinction of counterflow diffusion flames," *Combustion and flame*, vol. 86, no. 4, pp. 383-393, 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(91\)90131-T](https://doi.org/10.1016/0010-2180(91)90131-T).
- [5] M. Chaos and R.-H. Chen, "An experimental study of pulsating instability in near-limit laminar nonpremixed flames," *Combustion science and technology*, vol. 176, no. 8, pp. 1191-1215, 2004, doi: <https://doi.org/10.1080/00102200490457394>.
- [6] J. Kim and S. Lee, "Diffusional-thermal instability in strained diffusion flames with unequal Lewis

- high Reynolds number," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 21, no. 2, pp. 251-253, 1978, [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(78\)90230-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(78)90230-2).
- [19] A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar, and F. M. Rupley, "OPPDIF: A Fortran program for computing opposed-flow diffusion flames," Sandia National Lab. (SNL-CA), Livermore, CA (United States), 1997, <https://doi.org/10.2172/568983>.
- [20] R.-H. Chen, M. Chaos, and A. Kothawala, "Lewis number effects in laminar diffusion flames near and away from extinction," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 31, no. 1, pp. 1231-1237, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.101>.
- [21] <https://creckmodeling.chem.polimi.it/menu-kinetics/menu-kinetics-detailed-mechanisms/>.
- [15] M. F. Farahani, S. Akbari, and K. Hosseinzadeh, "Evaluation of thermal radiation and Lewis number effects on oscillatory thermal-diffusive instabilities of counterflow premixed flame fed with moisty biomass particles," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 58, p. 104369, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104369>.
- [16] R. Stephen, "Turns. An introduction to combustion: concepts and applications," *Mechanical Engineering Series. McGraw Hill*, p. 51, 2000, doi: [OCLC: 660161844](https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104369).
- [17] T. V. Kármán, "Über laminare und turbulente Reibung," *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, vol. 1, no. 4, pp. 233-252, 1921, <https://doi.org/10.1002/zamm.19210010401>.
- [18] K. Seshadri and F. Williams, "Laminar flow between parallel plates with injection of a reactant at