

مدل سازی ریاضی احتراق غیر پیش آمیخته ابر ذرات مکعبی با در نظر گرفتن ناحیه‌ی حدی تبخیر در پیکربندی جریان

متقابل

پیمان قشقای نژاد

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران

peyman_ghashghaie@mecheng.iust.ac.ir

مهدی بیدآبادی

استاد- دانشگاه علم و صنعت ایران

bidabadi@iust.ac.ir

محمد صدیقی

استادیار- دانشگاه هوایی شهید ستاری

m_sedighi@iust.ac.ir

چکیده

از علل بررسی هندسه ذرات به صورت مکعبی چند مورد مهم را می‌توان ذکر کرد: یک دلیل اینکه ذرات ارگانیک مانند لایکوپودیوم هندسه‌ای بسیار شبیه به کره دارند اما در معادن و صنایع غذایی که با پودر و ذره قابل اشتعال سروکار دارند معمولاً هندسه‌های دیگر نیز وجود دارد. دلیل دیگر اینکه حجم ذره مکعبی با اندازه ضلع برابر با قطر ذره کره‌ای بیشتر است:

$$\frac{V_{cube}}{V_{sphere}} = \frac{d^3}{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3} = \frac{6}{\pi} \cong 2 \quad (1)$$

از این حجم بیشتر می‌توان از دید سوخت جایگزین، برای مواردی که دبی جرمی بیشتری نیاز است استفاده کرد. بدین صورت که با دبی تعداد ذره برابر میزان جرم سوخت بیشتری به سیستم وارد می‌شود.

از تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی احتراق جران مقابل ذرات می‌توان به وارد زیر اشاره کرد:

مطالعه روییز که از راکتوری با شعله‌ی جریان متقابل نفوذی جهت تولید نانوذرات اکسید آهن، که در عکس برداری‌های پزشکی کاربرد دارند، استفاده نمود [۶]. در سال ۲۰۱۰ یان و همکاران [۷] در مطالعاتی که بر روی ذرات میکرو نانو آلومینیوم داشتند، تصاویری از ذرات آلومینیوم در ابعاد میکرون ارائه کردند که ذرات شکل مشخص و معینی ندارند و دارای تخلخل می‌باشند. بیدآبادی و رمضان پور مدلی تئوری از احتراق غیر پیش آمیخته ابر ذرات ارائه کردند [۵]، در مدلسازی‌شان ذرات کره‌ای فرض شده‌اند اما در مدل‌سازی پیش رو ذرات مکعبی هستند.

معادلات حاکم

ساختار شعله در این مدل‌سازی مطابق با مدل‌سازی ریاضی در نظر گرفته شده در پژوهش بیدآبادی و رمضان پور است. ذرات از سمت $-\infty$ به سمت صفحه سکون در مرکز حرکت می‌کنند و مسیر حرکتی جریان اکساینده که شامل جریان هوا هست، از $+\infty$ است. ذرات سوخت تبخیر می‌شوند تا یک سوخت گازی تولید کنند و از واکنش سطحی نیز صرف‌نظر می‌شود. سپس، سوخت گازی وارد فرآیند احتراق با اکساینده می‌شود. محل تشکیل شعله بسته به شرایط اولیه دارد و می‌تواند در سمت چپ و یا راست صفحه سکون باشد و با تغییر شرایط اولیه این موقعیت نیز جابجا خواهد شد. تبخیر ذرات با تابع هویساید مدل می‌شود. بدین صورت که ذرات جامد با رسیدن به دمای تبخیر به یک‌باره تبخیر خواهند شد [۵]:

$$\omega_v = \frac{Y_s}{\tau_{vap}} H(T - T_v) \quad (2)$$

که در معادله‌ی فوق، Y_s کسر جرمی ذرات، τ_{vap} زمان ثابت مشخصه تبخیر ذرات H تابع هویساید، T دمای سوخت و T_v دمای آغاز تبخیر ذرات می‌باشند.

تابع هویساید مطابق تعریف به صورت معادله‌ی (۳) می‌باشد.

در دانش احتراق ذرات معمولاً ذرات به صورت کره‌ای در نظر گرفته می‌شوند. در مطالعه حاضر سعی بر مدل‌سازی تئوری احتراق ابر ذرات مکعبی در پیکربندی جریان متقابل شده است. ابر ذرات کره‌ای قبلاً توسط دیگر محققین مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مدل‌سازی با تغییر عدد لوئیس سوخت اکساینده و عدد لوئیس سوخت اکسیدایزر دمای شعله و مکان شعله برای هر دو هندسه ذره محاسبه، رسم و مقایسه شده‌اند. در این مدل ذرات ابتدا تبخیر می‌شوند و سپس در فاز گازی می‌سوزند. برای واکنش مدل آرنیوس در نظر گرفته شده است. با بررسی روند تغییر دمای شعله مشخص شد، همان‌طور که انتظار می‌رود در ذرات مکعبی همانند ذرات کره‌ای با افزایش عدد لوئیس سوخت از ۰/۱ تا ۱/۴ و افزایش عدد لوئیس اکساینده از ۰/۳ تا ۱/۰، دمای شعله کاهش می‌یابد. نتیجه دیگری که حاصل شده است این است که با وجود اینکه در ذرات کره‌ای سوخت در دسترس بیشتر است، دمای شعله کمتر می‌باشد.

کلمات کلیدی: احتراق ذرات، ابر ذرات، جریان متقابل نفوذی، ذرات مکعبی

مقدمه

با توجه به اهمیت احتراق ذرات در سه بخش ایمنی و کنترل، جایگزین سوخت و همچنین درمان، تاکنون محققین زیادی در این زمینه فعالیت داشته‌اند. به‌عنوان مثال با وقوع سه انفجار حاصله از احتراق ذرات در سال ۲۰۰۳ که تلفات جانی نیز داشت کمیته بررسی ایمنی مواد شیمیایی و خطرناک این‌گونه از احتراق را بررسی و نتایجی را ارائه کردند [۱]. در زمینه‌ی درمان به کاربردهایی همانند تصویربرداری رزونانس مغناطیسی، گرمادرمانی و ترمیم بافت می‌توان اشاره کرد. این کاربردها به دلیل غیر سمی بودن و سازگاری زیستی این گونه مواد است که نانوذرات اکسید آهن در این موارد استفاده می‌شود [۲]. با توجه به مطالعات که تاکنون صورت گرفته ذراتی که قطر کمتر از ۷ میکرومتر دارند به‌عنوان ابر ذرات معرفی می‌شوند [۳]. در احتراق ذرات با توجه به فاز واکنش‌دهنده‌ها دو نوع واکنش همگن و ناهمگن صورت می‌گیرد. در احتراق ذرات سه اتفاق کلی رخ می‌دهد، ابتدا ذره خشک و گرمایش می‌شوند سپس ذرات تجزیه حرارتی شده و مواد فرار قابل احتراق تولید می‌کنند و در نهایت مواد حاصله از تجزیه حرارتی محترق می‌شوند [۴]. در این پژوهش پیکربندی جریان و فرضیات مطابق با مدل‌سازی بیدآبادی و همکاران [۵] می‌باشد با این تفاوت که ذرات به صورت کره‌ای نیستند و مکعبی می‌باشند. ذرات از یک نازل، و اکساینده از نازل دیگر که به صورت هم‌محور هستند با تکانه یکسان وارد می‌شوند. در وسط فاصله بین دو نازل، صفحه سکون تشکیل می‌شود. عدد بابوت به دلیل کوچک بودن ذرات صفر در نظر گرفته می‌شود.

تغییر متغیرهای زیر است:

$$x = \frac{X}{\sqrt{\frac{\lambda}{\rho Ca}}} \quad (11)$$

$$y_s = \frac{Y_s}{Y_{F-\infty}} \quad (12)$$

$$y_o = \frac{Y_o}{Y_{F-\infty}} \quad (13)$$

$$y_F = \frac{Y_F}{Y_{F-\infty}} \quad (14)$$

$$\theta = \frac{C(T - T_\infty)}{QY_{F-\infty}} \quad (15)$$

با اعمال تغییر متغیرهای ذکر شده معادلات بقا به شکل زیر درمی آید:
بقای سوخت فاز گازی:

$$\frac{1}{Le_F} \frac{d^2 y_F}{dx^2} + x \frac{dy_F}{dx} + \frac{y_s}{a\tau_{vap}} H(T - T_v) = D_c y_F y_o \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right) \quad (16)$$

بقای جرم اکساینده:

$$x \frac{dy_o}{dx} + \frac{1}{Le_o} \frac{d^2 y_o}{dx^2} = D_c y_F y_o \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right) \quad (17)$$

بقای انرژی مخلوط:

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} + x \frac{d\theta}{dx} - \frac{q}{a\tau_{vap}} y_s H(T - T_v) = -D_c y_F y_o \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right) \quad (18)$$

T_a در روابط فوق نشان گر انرژی فعال سازی بی بعد هست که به صورت $T_a = \frac{E}{R}$ بیان می شود. در رابطه ی فوق $q = \frac{Q_v}{Q}$ می باشد.

همچنین D_c به صورت زیر تعریف می شود [۱۰]:

$$D_c = \rho B g_o Y_{F-\infty} / W_F a \quad (19)$$

که در رابطه فوق g_o تعداد مولهایی از اکسیژن است که در شرایط استوکیومتری با یک مول از سوخت واکنش می دهند و W_F وزن مولکولی سوخت می باشد.

فرضیات حاکم بر مسئله به صورت زیر می باشند:

جریان اکساینده و سوخت دارای سرعت یکسان می باشند.

مقادیر مربوط به چگالی، گرمای ویژه و سایر ضرایب انتقالی ثابت فرض می شوند.

تبخیر در یک پیشانی نازک حدی اتفاق می افتد.

از مدل سازی اثرات تشعشع و اتلاف حرارتی در این مطالعه صرف نظر شده است.

از واکنش های سطحی و غیر همگن صرف نظر شده است.

شرایط مرزی

برای حل معادلات سه ناحیه به شرح زیر تعریف می شود:

$$R_1: -\infty < x \leq x_p \quad \text{ناحیه ی پیش گرم}$$

$$R_2: x_p \leq x \leq x_f \quad \text{ناحیه ی پس از تبخیر}$$

$$H(n) = \begin{cases} 0, & @ n < 0 \\ 1, & @ n > 0 \end{cases} \quad (3)$$

معادله بقای جرم سوخت فاز گازی:

$$-aX \frac{dY_F}{dX} = D_F \frac{d^2 Y_F}{dX^2} - f_e \frac{\omega_F}{\rho} + f_e \omega_v \quad (4)$$

در معادله ی فوق، D_F ضریب نفوذ جرمی سوخت، Y_F کسر جرمی سوخت در فاز گازی و ω_F نرخ واکنش شیمیایی هست که از قانون آرنیوس پیروی می کند و نسبت به سوخت و اکساینده در مرتبه اول هست، به صورت رابطه (۵) تعریف می شود [۹و۸]:

$$\omega_F = B \rho^2 v_F v_o \overline{Y_F Y_o} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

معادله ی بقای جرم ذرات سوخت جامد:

$$-aX \frac{dY_s}{dX} = -\omega_v \quad (6)$$

که در رابطه ی فوق Y_s کسر جرمی ذرات ریز جامد هست. همچنین ω_v نرخ تبخیر می باشد که در رابطه ی (۲) تعریف شده است.

معادله ی بقای انرژی مخلوط:

$$-aX \frac{dT}{dX} = D_T \frac{d^2 T}{dX^2} + f_e \omega_F \frac{Q}{\rho C} - f_e \omega_v \frac{Q_v}{C} \quad (7)$$

در رابطه ی فوق Q گرمای آزاد شده در واحد جرم سوخت مصرفی، Q_v

گرمای نهان تبخیر ذرات، $D_T = \frac{\lambda}{\rho C}$ ضریب نفوذ حرارتی و C

ظرفیت حرارتی مخلوط هست که از ترکیب ظرفیت حرارتی فاز گازی (C_a) و ظرفیت حرارتی ذره ی جامد (C_p) برای ذرات کروی به صورت

$$\text{رابطه } C = C_a + \frac{4\pi r_p^3 C_p \rho_p n_p}{3\rho} \text{ به دست می آید برای مدل سازی ذرات}$$

مکعبی ظرفیت حرارتی به صورت رابطه (۸) مدل می شود:

$$C = C_a + \frac{d^3 C_p \rho_p n_p}{\rho} \quad (8)$$

در دو رابطه ی اخیر ρ_p چگالی ذره جامد و n_p تعداد ذرات در واحد حجم

می باشند. همچنین چگالی برای ذرات کروی از $\rho = \rho_a + \frac{4}{3}\pi r_p^3 n_p \rho_p$

به دست می آید، که برای پژوهش حاضر با رابطه (۹) جایگزین می شود.

$$\rho = \rho_a + d_p^3 n_p \rho_p \quad (9)$$

معادله ی بقای جرم اکساینده:

$$-aX \frac{dY_o}{dX} = D_o \frac{d^2 Y_o}{dX^2} - g_f \frac{\omega_F}{\rho} \quad (10)$$

در معادله ی فوق، D_o ضریب نفوذ جرمی اکساینده، Y_o کسر جرمی اکساینده و g_f نسبت جرمی استوکیومتری اکسیژن به سوخت می باشد.

بی بعد سازی معادلات

برای ساده سازی و حل معادلات بقا به صورت تئوری نیاز به استفاده از

نتایج

برای رسم نتایج حاصل شده از این مدل از خصوصیات مطرح شده در جدول زیر استفاده می شود:

جدول ۱ ثوابت استفاده شده در حل

مقدار	ثابت	مقدار	ثابت
ρ_p	$1000 \frac{kg}{m^3}$	C_p	$5.677688 \frac{kJ}{kg.K}$
ρ_a	$1.164 \frac{kg}{m^3}$	C_a	$1.00416 \frac{kJ}{kg.K}$
Q	$64895.4 \frac{kJ}{kg}$	q	0.4
r	$12 \mu m$	n	12G
T_{in}	300K	T_{vap}	650K
g	2	$y_{o,+\infty}$	0.13

برای تساوی شرایط در دو حالت ذره به صورت کروی و مکعبی اندازه ضلع مکعب را برابر قطر ذره کروی در نظر گرفته شده است، یعنی برابر $24 \mu m$. برای دمای تبخیر از نتایج کار پروست استفاده شده [۱۱]. برای مخلوط قابل احتراق سوخت (گاز متان) و هوا، نسبت تعادل از رابطه زیر به دست می آید [۱۲]:

$$\phi_u = \frac{17.18 Y_{F-\infty}}{1 - Y_{F-\infty}} \quad (28)$$

که $Y_{F-\infty}$ برحسب تعداد ذرات موجود n_p ، و شعاع ذره کروی، r_p به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Y_{F-\infty} = \frac{4}{3} \frac{\pi r_p^3 n_p \rho_p}{\rho} \quad (29)$$

رابطه فوق را برای ذره مکعبی می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$Y_{F-\infty} = \frac{d_p^3 n_p \rho_p}{\rho} \quad (30)$$

همان طور که نمودار شکل (۱) مشهود است دمای شعله‌ی ذرات کروی بیشتر از دمای شعله‌ی ذرات مکعبی است. با تغییر عدد لوئیس سوخت از ۰/۱ تا ۱/۴، دمای شعله برای ذرات کروی از ۱۷۱۲ درجه سانتی گراد تا ۱۳۵۶ درجه سانتی گراد، و برای ذرات مکعبی از ۱۷۲۷ درجه سانتی گراد تا ۱۳۲۹ درجه سانتی گراد تغییر کرده است.

ناحیه‌ی اکساینده

$$R_3: x_f \leq x < \infty$$

x_v موقعیت تشکیل ناحیه نازک حدی تبخیر و x_f موقعیت تشکیل شعله را نشان می دهد. در نواحی فوق از ترم های واکنش و تبخیر در مقابل نفوذ و جابجایی صرف نظر می شود. تبخیر محدود به ناحیه‌ی نازک در موقعیت x_v می باشد و ترم واکنش نیز محدود به ناحیه‌ی نازک در موقعیت x_f است. تبخیر ذرات سوخت جامد به گونه‌ای فرض می شود که در یک ناحیه نازک حدی رخ می دهد، بنابراین در رابطه با کیفیت حضور ذرات جامد، می توان فرض زیر را در نظر گرفت:

$$-\infty < x \leq x_v : y_s = 1$$

$$x_v < x \leq \infty : y_s = 0$$

به این معنی که پیش از شروع ناحیه تبخیر، ذرات جامد در محیط موجود می باشند، ولی پس از آن هیچ گونه ذره‌ی جامدی در محیط وجود ندارد. با توجه به فیزیک مسئله و توضیحات بیان شده می توان شرایط مرزی را به صورت زیر عنوان نمود:

$$y_F = 0, y_O = 0, y_s = 1, \theta = 0 @ x \rightarrow -\infty \quad (20)$$

$$y_F = 0, y_O = \alpha, y_s = 0, \theta = 0 @ x \rightarrow +\infty \quad (21)$$

$$-\frac{q}{Le_F} \left[\frac{dy_F}{dx} \right] = \left[\frac{d\theta}{dx} \right] = qx_v, \left[\frac{dy_o}{dx} \right] = 0, [\theta] = 0 @ x = x_v \quad (22)$$

$$\left[\frac{1}{Le_F} \frac{dy_F}{dx} \right] = \left[\frac{1}{Le_o} \frac{dy_o}{dx} \right] = - \left[\frac{d\theta}{dx} \right], [\theta] = 0 @ x = x_f \quad (23)$$

α در رابطه‌ی (۲۱) که به عنوان کسر جرمی اولیه‌ی سوخت در نظر گرفته می شود، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\alpha = \frac{Y_{o,\infty}}{Y_{F-\infty}} \quad (24)$$

همچنین [] در رابطه (۲۲) و (۲۳) نشان گر پیوستگی عبارت درون آن، در نقطه‌ی مورد نظر هست.

حل معادلات

با حل معادلات بقا و جایگذاری شرایط مرزی معادله دما در سه ناحیه به شکل زیر حاصل می گردد:

$$-\infty \leq x \leq x_v$$

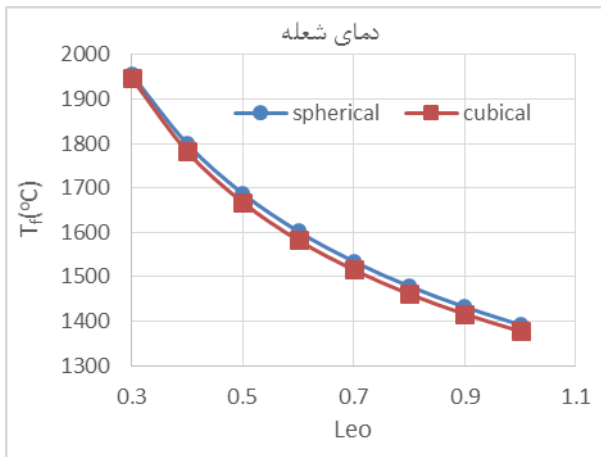
$$\theta = \theta_v \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) + 1}{\operatorname{erf}\left(\frac{x_v}{\sqrt{2}}\right) + 1} \quad (25)$$

در ناحیه‌ی $x_v \leq x \leq x_f$

$$\theta = \theta_v + \left(\operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x_v}{\sqrt{2}}\right) \right) \frac{\theta_f - \theta_v}{\operatorname{erf}\left(\frac{x_f}{\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x_v}{\sqrt{2}}\right)} \quad (26)$$

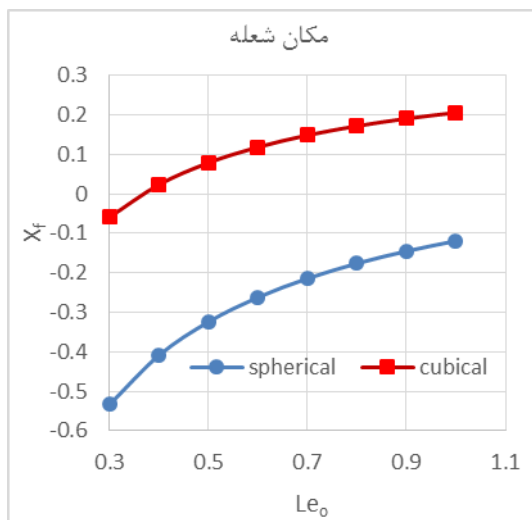
در ناحیه‌ی $x_f \leq x < +\infty$

$$\theta = \theta_f \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) - 1}{\operatorname{erf}\left(\frac{x_f}{\sqrt{2}}\right) - 1} \quad (27)$$



شکل (۳) نمودار تغییرات دمای شعله برحسب تغییر عدد لوئیس اکساینده

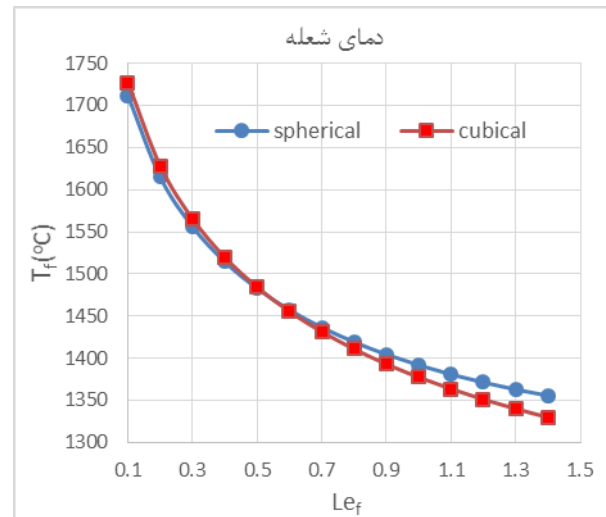
در نمودار شکل (۴) تغییر مکان شعله با تغییر عدد لوئیس سوخت رسم شده است. با تغییر عدد لوئیس اکساینده از ۰/۳ تا ۱/۰ مشهود است که مکان شعله برای ذرات کروی از ۰/۵۳- تا ۰/۱۲- و برای ذرات مکعبی از ۰/۰۶- تا ۰/۲۰- تغییر کرده است.



شکل (۴) نمودار تغییرات مکان شعله برحسب تغییر عدد لوئیس اکساینده

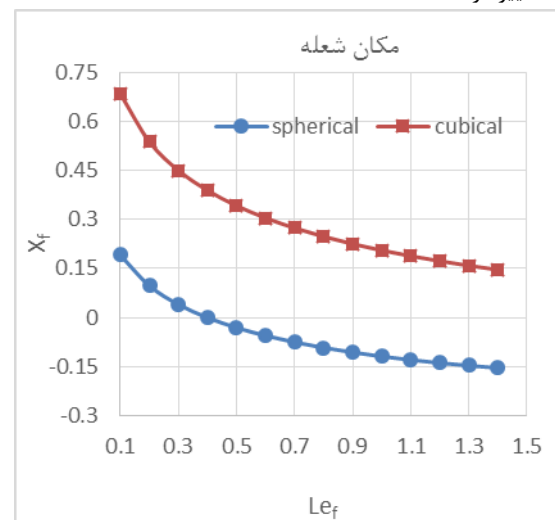
تحلیل نتایج

نتایج به دست آمده برای ذرات کروی در مقایسه با مرجع [۵] کاملاً رفتار یکسانی دارند. روش در مطالعه حاضر با روش مرجع [۵] یکسان است با این تفاوت که در این پژوهش برای حل معادلات از روش دیگری به دست آمده است. علت تفاوت در مقادیر به دست آمده، انتخاب ذره با شعاعی متفاوت از منبع مذکور است. با توجه به اینکه در سوخت با ذرات مکعبی، سوخت در دسترس بیشتری موجود است، انتظار می رود دمای شعله بیشتر از حالتی باشد که ذرات کروی هستند. اما نتایج به دست آمده از شکل یک این گونه نیست و دمای شعله در ذرات مکعبی و کروی بسیار نزدیک به هم هستند. علت این اتفاق را می توان در شکل (۲) جستجو کرد. از فیزیک مسئله مشخص است که با حرکت از سمت هر کدام از نازل ها به سمت صفحه سکون در مرکز از سرعت جریان و به طبع آن انتقال جابجایی کاسته می شود تا در صفحه سکون به صفر برسد.



شکل (۱) نمودار تغییرات دمای شعله برحسب تغییر عدد لوئیس سوخت

در نمودار شکل (۲) تغییر مکان شعله با تغییر عدد لوئیس سوخت رسم شده است. با تغییر عدد لوئیس سوخت از ۰/۱ تا ۱/۴ مشهود است که مکان شعله برای ذرات کروی از ۰/۱۹ تا ۰/۱۵- و برای ذرات مکعبی از ۰/۶۸ تا ۰/۱۵- تغییر کرده است.



شکل (۲) نمودار تغییرات مکان شعله با تغییر عدد لوئیس سوخت

در نمودار شکل (۳) نیز دمای شعله ی ذرات کروی بیشتر از دمای شعله ی ذرات مکعبی است. با تغییر عدد لوئیس اکساینده از ۰/۳ تا ۱/۰، دمای شعله برای ذرات کروی از ۱۹۵۶ درجه سانتی گراد تا ۱۳۹۱ درجه سانتی گراد، و برای ذرات مکعبی از ۱۹۴۷ درجه سانتی گراد تا ۱۳۷۷ درجه سانتی گراد تغییر کرده است.

مراجع

- 1- Eckhoff, R.K., 2003. *Dust explosions in the process industries: identification, assessment and control of dust hazards*. Gulf professional publishing.
- 2- Gupta, A.K., Naregalkar, R.R., Vaidya, V.D. and Gupta, M., 2007. Recent advances on surface engineering of magnetic iron oxide nanoparticles and their biomedical applications.
- 3- Less, F.P., 1992. *Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*. Butterworth-Heinemann.
- 4- Tillman, D., 2012. *The combustion of solid fuels and wastes*. Academic Press.
- 5- Bidabadi, M., Ramezanpour, M., Khomeini Poorfar, A., Monteiro, E. and Rouboa, A., 2016. Mathematical modeling of a Non-Premixed organic Dust flame in a Counterflow configuration. *Energy & Fuels*, 30(11), pp.9772-9782.
- 6- Ruiz, H.E., 2008. Synthesis of iron oxide nanoparticles in a counterflow diffusion flame reactor.
- 7- Yan, Z.X., Deng, J. and Luo, Z.M., 2010. A comparison study of the agglomeration mechanism of nano- and micrometer aluminum particles. *Materials Characterization*, 61(2), pp.198-205.
- 8- Liñán, A., 1974. The asymptotic structure of counterflow diffusion flames for large activation energies. *Acta Astronautica*, 1(7), pp.1007-1039.
- 9- Fendell, F.E., 1965. Ignition and extinction in combustion of initially unmixed reactants. *Journal of Fluid Mechanics*, 21(2), pp.281-303.
- 10- Seshadri, K. and Trevino, C., 1989. The influence of the Lewis numbers of the reactants on the asymptotic structure of counterflow and stagnant diffusion flames. *Combustion science and technology*, 64(4-6), pp.243-261.
- 11- Proust, C., 1993, April. Experimental determination of the maximum flame temperatures and of the laminar burning velocities for some combustible dust-air mixtures. In 5. *International Colloquium on Dust Explosions* (pp. 161-184).
- 12- Rockwell, S.R. and Rangwala, A.S., 2013. Modeling of dust air flames. *Fire Safety Journal*, 59, pp.22-29.

در نتیجه از صفحه سکون انتقال جابجایی نخواهیم داشت. اما نفوذ در سراسر دامنه برقرار است. در شکل (۲) مشهود است که برای ذرات مکعبی در سمت راست و درجایی که مقدار X مثبت است، شعله تشکیل می‌شود. این اتفاق باعث می‌شود مقدار زیادی از سوخت جامد که به حالت گازی شکل درآمده است، طبق الگوی جریانی که در پیکربندی جریان متقابل صادق است، خارج شده و در واکنش شرکت نکند. بدین معنی که انرژی برای تبخیر سوخت مصرف می‌شود اما مقدار کمی از سوخت گازی شده در واکنش شرکت می‌کند و بخشی از این سوخت گازی شده با جریانی که در جهت Y وجود دارد، خارج شود.

این اتفاق برای زمانی که عدد لوئیس اکساینده در شکل‌های (۳) و (۴) تغییر می‌کند، رخ داده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به محاسبات و مدل ارائه شده مشهود است که در هندسه جریان متقابل افزایش میزان سوخت بالقوه تا جایی مفید است که شعله نسبت به صفحه سکون، در سمت نازل سوخت قرار گیرد. افزایش میزان سوخت ورودی را می‌توان با تغییر هندسه ذرات اعمال کرد. با تغییر هندسه ذرات از کروی به مکعبی، میزان سوخت بالقوه تقریباً دو برابر می‌شود، اما این دو برابر شدن جرم سوخت تأثیر چندانی در انرژی به دست آمده از احتراق ندارد. و می‌توان فایده این تغییر هندسه را این جستجو کرد که، یا حصول سوخت مکعبی راحت‌تر و ارزان‌تر باشد یا نیاز به تشکیل شعله در سمت نازل اکساینده باشد.

فهرست علائم

$Y_{F-\infty}$	کسر جرمی بالقوه سوخت،
x_f	مکان بی‌بعد تشکیل شعله،
x_v	مکان بی‌بعد تبخیر،
T_a	انرژی فعال‌سازی بی‌بعد،
θ	دمای بی‌بعد،
ϕ_u	نسبت هم‌ارزی،
C	گرمای ویژه در فشار ثابت، J/kgK

فهرست علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
f	شعله
v	تبخیر
p	ذره
a	هوا