



ارائه مدل تحلیلی احتراق غیرپیش‌آمیخته ابر ذرات تیتانیوم در هندسه جریان متقابل

معین فرمهبینی فراهانی، نیما حسنوند*، مهدی بیدآبادی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۰
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۲۲
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۲/۰۳

کلمات کلیدی:

احتراق ذرات
غیر پیش‌آمیخته
جریان متقابل
عدد لوئیس
مدل تحلیلی.

خلاصه: امروزه مطالعه‌ی احتراق ذرات فلزی به واسطه کاربردهای روزافزون آن بسیار مورد توجه است. از جمله این کاربردها می‌توان به تولید اکسید ذرات با کاربردهای گوناگون، چگالی انرژی بالا و در نتیجه افزایش دمای حاصل از احتراق، کاربردهای پزشکی و... اشاره نمود. در این پژوهش، به بررسی مدل تحلیلی احتراق غیرپیش‌آمیخته ابر ذرات تیتانیوم در هندسه جریان متقابل، با رویکرد چندناحیه‌ای پرداخته شده است. معادلات حاکم بر مسئله شامل بقای جرم اجزا و بقای انرژی بیان شد و با استفاده از شرایط مرزی و انطباقی مناسب، حل معادلات در هر ناحیه به کمک نرم افزارهای متلب و متمیکا ارائه شد. سپس توزیع دما و کسر جرمی سوخت، اکسیدکننده و محصولات سوختی در فاز مایع برحسب مکان رسم شد و تأثیر برخی متغیرها مانند عدد لوئیس، اندازه قطر ذرات و غلظت جرمی ذرات بر شعله مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده گردید که در غلظت ۳۰۰ گرم بر مترمکعب با افزایش عدد لوئیس سوخت از ۰/۶ تا ۱/۴ میزان دمای شعله از ۳۶۰۰ کلوین تا ۳۰۵۰ کلوین کاهش یافت و همچنین مکان شعله به سمت نازل اکسیدکننده منتقل شد و علت این موضوع کاهش نفوذ جرم توجه شد. همچنین با افزایش قطر ذرات سوخت از ۲ تا ۲۰۰ میکرون، دما و مکان شعله به ترتیب از ۳۶۰۰ کلوین و ۱/۸- میلی متر به ۳۴۰۰ کلوین و ۱- میلی متر تغییر یافت.

۱- مقدمه

منیزیم را در اکسیژن خالص و در فشار محیط با در نظرگیری اثرات جاذبه بررسی کرده است. وی با استفاده از طیف‌سنجی و مشاهدات کیفی، نرخ انتشار و طیف نشر واکنش‌های فاز گاز را بدست آورده است. همچنین مشاهده شد که تلفات هدایت حرارتی تأثیر بسیاری بر دمای بحرانی و اشتعال داشته است. موکاسیان و همکاران [۵] رژیم‌های احتراقی ماکروسکوپی و دینامیک تشکیل فاز را به صورت تجربی در سیستم تیتانیوم نیتروژن در فشار کم نیتروژن مورد بررسی قرار داد و مشاهده نمود که پیش از تشکیل محصولات اولیه، تیتانیوم نیتريد تشکیل شد و همچنین توالی پیچیده‌ای را در تشکیل فاز احتراق موضعی مشاهده کرد. کاراسف و همکاران [۶] به بررسی تشکیل اکسید فلزی نانوذرات در احتراق قطرات تیتانیوم و آلومینیوم پرداخت. در احتراق تیتانیوم ناحیه‌ی تشکیل نانوذرات تقریباً نزدیک سطح ذره واقع شد و در طول احتراق این ذرات در رژیم ناهمگن انجام شد و نانوذرات اکسید توسط هسته‌ی بخار اکسید در فاصله‌ای حدود ۱۵ میکرون از سطح سوزش قطره تیتانیوم با قطر ۳۰۰ میکرون تشکیل شد. همچنین شفیرووویچ و همکاران [۷] احتراق تک ذرات

امروزه احتراق ذرات تیتانیوم در حوزه‌های مختلفی کاربرد دارد. یکی از مهم‌ترین این موارد، تولید اکسید تیتانیوم به منظور کاربردهای پزشکی آن است [۱]. در حوزه‌ی احتراق ذرات تیتانیوم کارهای مختلفی صورت گرفته که از جنبه‌های مختلفی قابل دسته‌بندی می‌باشند. مولدتسکی و ویکنزی [۲] فازهای احتراقی، زمان سوزش ذرات و دمای حاصل از احتراق ذرات تیتانیوم در هوا را بررسی کردند. همچنین زمان سوزش ذراتی با قطر ۲۴۰ تا ۲۸۰ میکرون در بازه‌ی ۲۴۰ تا ۳۰۰ میلی‌ثانیه مشاهده شد. دمای ذرات نیز به سرعت به ۲۱۰۰ کلوین رسید و سپس کاهش یافت و در ۲۱۰۰ کلوین ثابت گردید. میاتا و کوباتا [۳] احتراق ذرات تیتانیوم و زیرکونیوم با پتاسیم نیترات (به عنوان اکسیدکننده) را به صورت تجربی مورد بررسی قرار داد. مشاهده شد که ذرات تیتانیوم با گازهای حاصل از تجزیه‌ی پتاسیم نیترات واکنش می‌دهند و نرخ سوزش به شدت به فشار محیط وابسته است. به دلیل وقوع واکنش در فاز گازی، زمان وقوع واکنش بسیار کم بود. برانچ و همکاران [۴] اشتعال و احتراق توده تیتانیوم و

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Nima_hasanvand@mecheng.iust.ac.ir



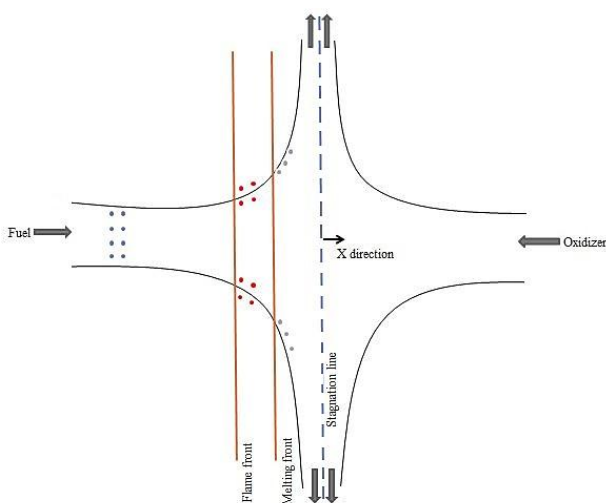
بررسی شده است.

۲- رویکرد تحلیلی

در این قسمت فیزیک مسئله بیان و به شکل ریاضی مدل سازی گردیده است. جریان سوخت از $X = -\infty$ و جریان اکسیدکننده از $X = +\infty$ به سمت ناحیه واکنش جریان می یابند. مطابق شکل (۱)، ۳ ناحیه در نظر گرفته شده است. ناحیه اول که از $X = -\infty$ آغاز و تا $X = X_f$ ادامه دارد. ناحیه دوم از $X = X_f$ تا X_{melt} ادامه دارد و سرانجام ناحیه سوم که از X_{melt} آغاز و تا $X = +\infty$ امتداد می یابد. میدان سرعت در نظر گرفته شده به این صورت است که سرعت در راستای x برابر $u = -ax$ است و a بیان گر نرخ کرنش می باشد. سینتیک شیمیایی به شکل یک واکنش کلی تک مرحله ای در نظر گرفته شده است [۱۱]:



که در رابطه ی فوق نمادهای $[F]$ ، $[O]$ و $[P]$ به ترتیب بیان گر سوخت، اکساینده و محصولات هستند. همچنین کمیت های v_O ، v_F و v_P اشاره به ضرایب استوکیومتری سوخت، اکساینده و محصولات دارند. از آن جا که پس از وقوع واکنش، اکسید تیتانیوم به سرعت ذوب می گردد، به منظور مدل سازی این فرآیند از تابع هوی ساید استفاده



شکل ۱. شماتیک کلی احتراق غیر پیش آمیخته ابر ذرات تیتانیوم در هندسه جریان متقابل

Fig 1. General schematic of non-premixed combustion of titanium dust particles in the counter-flow configuration

اشباع تیتانیوم با قطر ۲۰ تا ۱۲۵ میکرون را بررسی کرد و مشاهده نمود که به محض آغاز اشتعال، ذره ذوب شد و یک قطره ی کروی شکل گرفت. همچنین به کمک نشر نور ذرات، زمان سوزش محاسبه گشت. کرنز و همکاران [۸] اثر غلظت اکسیژن را در احتراق ذرات تیتانیوم مورد بررسی قرار داد. در پایان نتیجه ی حاصل شده به این شکل بود که با افزایش قطر ذره، زمان سوزش نیز افزایش می یافت و همچنین برای یک ذره مشخص، زمان سوزش استوکیومتری بیش تر از زمان سوزش با هوای اضافی بود و برای ذرات کوچک تر این دو زمان تقریباً برابر بودند.

بادیولا و درزین [۹] به شکل تجربی احتراق ذرات میکرونی تیتانیوم و زیرکونیوم را در هوا مورد بررسی قرار داد. این ذرات با قطر ۲ تا ۲۵ میکرون با عبور از پرتو لیزر CO_2 مشتعل شدند و زمان های سوزش و دماهای احتراق اندازه گیری شد و با مطالعات پیشین مربوط به ذرات بزرگ تر این دو فلز مقایسه شد. دمای متوسط احتراق برای هر دو فلز نسبتاً به دمای آدیاباتیک شعله نزدیک بود. در محدوده ابعاد ذرات مورد آزمایش، دماهای احتراق ذرات به قطر ذره وابسته نبود و تنها زمان سوزش تابع ضعیفی از قطر ذرات گزارش شد.

بویلارد و همکاران [۱۰] احتمال و قابلیت انفجار میکرو و نانو پودر تیتانیوم را آزمایش کرد. پارامترهای انفجار برای هر دو طیف از ذرات تیتانیوم شامل شدت و احتمال انفجار، حداقل انرژی و دمای اشتعال بود. نتایج نهایی نشان داد که نانوتیتانیوم بسیار حساس تر از میکروتیتانیوم است. این ماده بسیار واکنش پذیر توصیف شده و اگرچه انفجار آن شدید و به آسانی رخ می داد اما قابل کنترل و پیش گیری توصیف شد. افزودن دی اکسید نانوتیتانیوم به مخلوط گرد و ذرات می تواند خطرات انفجار را کاهش و یا به کلی از بین ببرد.

با توجه به مرور منابع صورت گرفته در این حوزه، مشاهده گردید که احتراق ذرات تیتانیوم اغلب به روش تجربی و عددی مطالعه شده است. در این مقاله، به بررسی تحلیلی احتراق غیر پیش آمیخته ابر ذرات تیتانیوم در هندسه جریان متقابل با رویکرد چندناحیه ای پرداخته شده است. پس از ارائه معادلات حاکم، شامل معادلات بقای انرژی و بقای جرم اجزا و انجام بی بعدسازی، توزیع کسر جرمی اجزا و دما در میدان حل ارائه شده است و سپس تأثیر برخی پارامترهای مهم مانند عدد لوئیس، اندازه قطر ذرات و میزان غلظت جرمی ذرات

شده است [۱۲]:

$$\omega_{melt} = \frac{Y_s}{\tau_{melt}} H(T - T_{melt}) \quad (2)$$

در رابطه‌ی فوق Q ، D_T و Q_{melt} به ترتیب ضریب نفوذ حرارتی و برابر $D_T = \frac{\lambda}{\rho C}$ ، گرمای آزادشده در واحد جرم سوخت مصرفی و گرمای نهان ذوب ذرات سوخت است. همچنین λ هدایت حرارتی ذرات است. معادله بقای جرم ذرات سوخت جامد نیز به شکل رابطه (۸) بیان می‌گردد [۱۱]:

$$-aX \frac{dY_s}{dX} = -\frac{\omega_s}{\rho} \quad (8)$$

همچنین معادله بقای جرم محصولات در فاز مایع مطابق رابطه (۹) است [۱۱]:

$$-aX \left(\frac{dY_m}{dX} \right) = D_m \left(\frac{d^2 Y_m}{dX^2} \right) + \omega_{melt} \quad (9)$$

در رابطه‌ی فوق Y_m و D_m به ترتیب بیان گر کسر جرمی محصولات مایع و ضریب نفوذ جرمی محصولات مایع می‌باشد. معادله بقای جرم اکسیدکننده نیز به صورت معادله (۱۰) است [۱۱]:

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

در رابطه‌ی فوق D_o و ϑ به ترتیب ضریب نفوذ جرمی اکسیدکننده و نسبت جرمی استوکیومتریک اکساینده به سوخت هستند.

۴- متغیرهای بی‌بعد

به منظور بی‌بعدسازی معادلات حاکم، از متغیرهای بی‌بعد استفاده گردیده است [۱۳]:

$$\theta = \frac{C(T - T_\infty)}{QY_{S-\infty}}, y_m = \frac{Y_m}{Y_{S-\infty}}, y_o = \frac{Y_o}{\vartheta Y_{S-\infty}}, y_s = \frac{Y_s}{Y_{S-\infty}}, x = \frac{X}{\sqrt{\frac{\lambda}{\rho Ca}}}, q_{melt} = \frac{Q_{melt}}{Q}, \tilde{\omega}_{melt} = \frac{Y_s}{a\tau_{melt}} H(T - T_{melt}) \quad (11)$$

$$\tilde{\omega}_s = \frac{BY_s \vartheta J_o}{\rho a} y_s y_o \exp\left(-\frac{T_a}{T_f}\right)$$

که در روابط فوق، T_∞ ، θ ، Y_m ، Y_o ، Y_s ، q_{melt} ، $\tilde{\omega}_{melt}$

در رابطه‌ی فوق، Y_s ، τ_{melt} ، H و T_{melt} به ترتیب کسر جرمی ذرات جامد، زمان ثابت مشخصه ذوب ذرات، تابع هوی‌ساید و دمای ذوب ذرات هستند. تابع هوی‌ساید H نیز عبارت است از:

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

نرخ واکنش شیمیایی از مدل آرنیوسی گرفته شده و به صورت رابطه (۴) تعریف می‌گردد:

$$\omega_s = BY_s Y_o \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) \quad (4)$$

که B ، E ، R و T_f به ترتیب فرکانسی، انرژی فعال‌سازی سوخت، ثابت جهانی گازها و دما شعله هستند و Y_o نیز کسر جرمی اکسیدکننده است. همچنین مقدار ظرفیت حرارتی مخصوص و چگالی مخلوط ذرات سوخت و اکسیدکننده از روابط (۵) و (۶) حاصل می‌گردد [۱۲]:

$$C = C_a + \frac{4\rho_p}{3\rho} \pi r^3 C_p n_p \quad (5)$$

$$\rho = \rho_a + \frac{4}{3} \pi r^3 n_p \rho_p \quad (6)$$

که در روابط فوق، C_a ، C_p ، n_p و r به ترتیب بیان گر ظرفیت حرارتی مخصوص گاز اکسیدکننده، ظرفیت حرارتی مخصوص ذره، تعداد ذرات کروی سوخت معلق در فاز گازی در واحد حجم (عدد چگالی) و شعاع ذره هستند. همچنین ρ_a و ρ_p نیز به ترتیب نشان‌دهنده‌ی چگالی گاز اکسیدکننده و چگالی ذره است.

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادله بقای انرژی و بقای جرم اجزا می‌باشد. معادله بقای انرژی عبارت است از [۱۱]:

$$-aX \frac{dT}{dX} = D_T \frac{d^2 T}{dX^2} + \omega_s \frac{Q}{\rho C} - \omega_{melt} \frac{Q_{melt}}{C} \quad (7)$$

جدول ۱. شرایط مرزی مورد نیاز

Table 1. Required boundary conditions

متغیر	مرز	$x = x_{melt}$	$x = x_{melt}$	$x = x_f$	$x = -\infty$
دمای بی‌بعد	θ_{melt}	θ_{melt}	θ_{melt}	θ_f	θ_{∞}
کسر جرمی ذره بی‌بعد	y_{melt}	y_{melt}	y_{melt}	y_{melt}	y_{∞}
کسر جرمی محصولات سوختی بی‌بعد	$y_{O_{melt}}$	$y_{O_{melt}}$	$y_{O_{melt}}$	$y_{O_{melt}}$	$y_{O_{\infty}}$
کسر جرمی اکسیدکننده بی‌بعد	$y_{O_{melt}}$	$y_{O_{melt}}$	$y_{O_{melt}}$	$y_{O_{melt}}$	$y_{O_{\infty}}$

و $\tilde{\omega}_S$ به ترتیب مبین دمای محیط، دمای بی‌بعد، کسر جرمی محصولات مایع بی‌بعد، کسر جرمی اکسیدکننده بی‌بعد، کسر جرمی ذرات جامد بی‌بعد، موقعیت مکانی بی‌بعد، گرمای نهان ذوب بی‌بعد، نرخ ذوب بی‌بعد و نرخ واکنش بی‌بعد هستند. همچنین T_a مبین دمای فعال‌سازی است و برابر است با:

$$T_a = \frac{E}{R} \quad (12)$$

در رابطه‌ی فوق Le عدد لوئیس است و به این صورت تعریف شده است:

$$Le = \frac{\lambda}{\rho C D} \quad (17)$$

در عبارت فوق، D و λ و به ترتیب ضریب هدایت حرارتی و ضریب نفوذ جرمی هستند. همچنین معادله‌ی بقای جرم اکسیدکننده برای ناحیه‌ی اکسیدکننده عبارت است از:

$$\frac{1}{Le} \frac{d^2 y_o}{dx^2} + x \frac{dy_o}{dx} = D_c y_s y_o \vartheta \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right) \quad (18)$$

۵- معادلات بی‌بعد

پس از اعمال پارامترهای بی‌بعد بر معادلات حاکم، معادلات در فرم بی‌بعد حاصل می‌گردند. معادله‌ی بقای انرژی بی‌بعد عبارت است از:

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} + x \frac{d\theta}{dx} = -D_c y_s y_o \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right) + \frac{q_{melt} y_s}{a \tau_{melt}} H(T - T_{melt}) \quad (13)$$

در رابطه‌ی فوق D_c عدد دام‌کوهلر است و به شکل رابطه (۱۴) تعریف می‌شوند:

$$D_c = \frac{\rho B \vartheta_o Y_{F-\infty}}{m_f a} \quad (14)$$

معادله‌ی بقای جرم ذرات جامد در فرم بی‌بعد عبارت است از:

$$x \frac{dy_s}{dx} = D_c y_s y_o \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right) \quad (15)$$

معادله‌ی بقای جرم محصولات واکنش در فاز مایع در حالت بی‌بعد برابر است با:

$$\frac{1}{Le} \frac{d^2 y_m}{dx^2} + x \frac{dy_m}{dx} = \frac{y_s}{a \tau_{melt}} H(T - T_{melt}) \quad (16)$$

۶- شرایط مرزی و انطباقی

به منظور حل معادلات دیفرانسیل حاکم در هر ناحیه، به شرایط مرزی نیاز است. در جدول (۱) شرایط مرزی مناسب برای هر مرز بیان شده است.

هم‌چنین به منظور تعیین مکان دقیق شعله و مکان تبخیر از شرایط انطباقی (۱۹) و (۲۰) استفاده گردیده است [۱۴]:

$$x = x_f \begin{cases} \left(\frac{1}{Le} \right) \frac{dy_o}{dx} \Big|_{x_f^-} = -\frac{d\theta}{dx} \Big|_{x_f^-} \\ \left(\frac{1}{Le} \right) \frac{dy_m}{dx} \Big|_{x_f^-} = -\frac{d\theta}{dx} \Big|_{x_f^-} \end{cases} \quad (19)$$

$$y_o = \frac{y_{melt} \left(-\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Le_o} x}{\sqrt{2}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Le_o} x_f}{\sqrt{2}} \right) \right)}{\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Le_o} x_f}{\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Le_o} x_{melt}}{\sqrt{2}} \right)} \quad (24)$$

۱-۱-۳ ناحیه سوم $x_{melt} < x < +\infty$

$$\theta = \frac{\theta_{melt} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{L}{\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) \right)}{\operatorname{erf} \left(\frac{L}{\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x_{melt}}{\sqrt{2}} \right)} \quad (25)$$

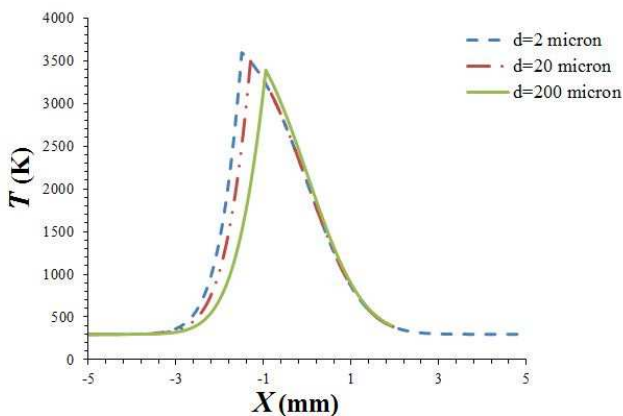
توزیع درجه حرارت عبارت است از:

$$y_o = \frac{y_{melt} \operatorname{erf} \left(\frac{L \sqrt{Le_o}}{\sqrt{2}} \right) + (-y_{melt} + y_{O_{oxid}}) \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Le_o} x}{\sqrt{2}} \right) - y_{O_{oxid}} \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Le_o} x_{melt}}{\sqrt{2}} \right)}{\operatorname{erf} \left(\frac{L \sqrt{Le_o}}{\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Le_o} x_{melt}}{\sqrt{2}} \right)} \quad (26)$$

همچنین توزیع کسر جرمی اکسیدکننده نیز عبارت است از:

۱-۲- تفسیر نتایج

به منظور اعتبارسنجی مدل فعلی، در شکل ۲ نتایج مقدار دمای شعله برحسب کسر مولی اولیه هوا ارائه شده است و با نتایج شفیروویچ [۷] در شرایط آدیاباتیک و مدل مدنی [۱۱] مقایسه شده است. قابل



شکل ۲. دمای شعله برحسب کسر مولی اولیه هوا و مقایسه با کارهای پیشین

Fig 2. Flame temperature in terms of air initial mole fraction and comparison with previous works

$$@ x = x_{melt} \begin{cases} \frac{dy_o}{dx} \Big|_{x_{melt}} = 0 \\ \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x_{melt}} = -\frac{q_{melt}}{a\tau_{melt}} y_s H(T - T_{melt}) x_{melt} \\ \left(\frac{1}{Le} \right) \frac{dy_m}{dx} \Big|_{x_{melt}} = -\frac{y_s}{a\tau_{melt}} H(T - T_{melt}) x_{melt} \end{cases} \quad (20)$$

۷- نتایج و بحث

۱-۱- حل تحلیلی معادلات حاکم

۱-۱-۱ ناحیه اول $-\infty < x < x_f$

در این ناحیه توزیع درجه حرارت به صورت رابطه (۲۱) حاصل شده است:

$$\theta = \frac{\theta_f \left(\operatorname{erf} \left(\frac{L}{\sqrt{2}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) \right)}{\operatorname{erf} \left(\frac{L}{\sqrt{2}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{x_f}{\sqrt{2}} \right)} \quad (21)$$

۱-۱-۲ ناحیه دوم $x_f < x < x_{melt}$

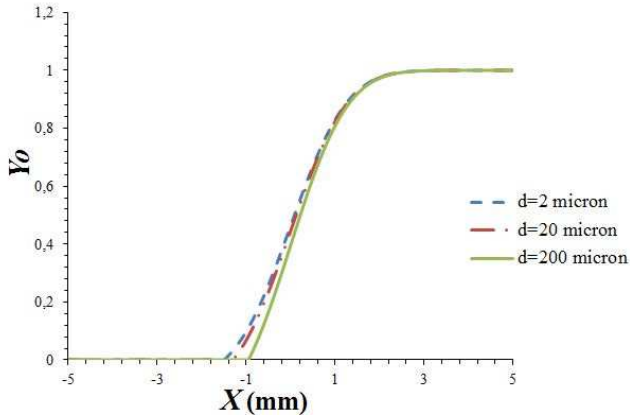
در این ناحیه، توزیع درجه حرارت به صورت رابطه (۲۲) حاصل گردیده است:

$$\theta = \frac{(\theta_f - \theta_{melt}) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) + \theta_{melt} \operatorname{erf} \left(\frac{x_f}{\sqrt{2}} \right) - \theta_f \operatorname{erf} \left(\frac{x_{melt}}{\sqrt{2}} \right)}{\operatorname{erf} \left(\frac{x_f}{\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x_{melt}}{\sqrt{2}} \right)} \quad (22)$$

همچنین توزیع کسر جرمی محصولات در فاز مایع عبارت است از:

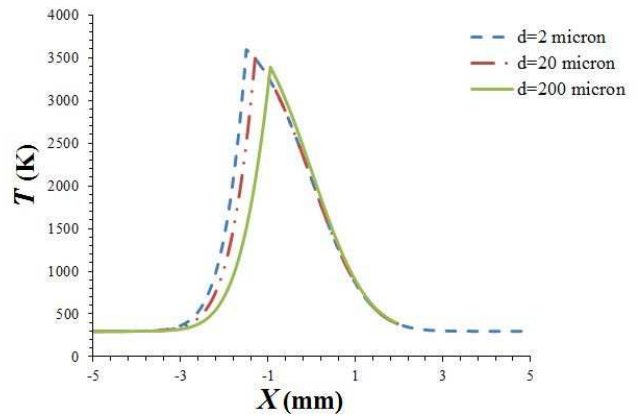
$$y_m = \frac{y_{melt} \left(-\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Le} x}{\sqrt{2}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Le} x_f}{\sqrt{2}} \right) \right)}{\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Le} x_f}{\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Le} x_{melt}}{\sqrt{2}} \right)} \quad (23)$$

توزیع کسر جرمی اکسیدکننده نیز به صورت مقابل است:



شکل ۵. توزیع کسر جرمی اکسیدکننده برحسب موقعیت مکانی با در نظرگیری اثر قطر ذرات سوخت مختلف

Fig. 5. Distribution of oxidizer mass fraction according to position with considering the effect of different fuel particle diameters



شکل ۳. دما برحسب موقعیت مکانی

Fig. 3. Temperature versus position

ملاحظه است که با افزایش کسر مولی اولیه هوا و تبدیل شرایط سوخت غنی به شرایط استوکیومتری، مقدار دمای شعله افزایش یافته است و در حالت استوکیومتری به ۳۴۵۰ کلوین رسیده است. هم‌چنین در شرایط سوخت رقیق، با افزایش کسر مولی اولیه هوا، دمای شعله کاهش یافته است و نتایج انطباق مطلوبی با کار تجربی دارد.

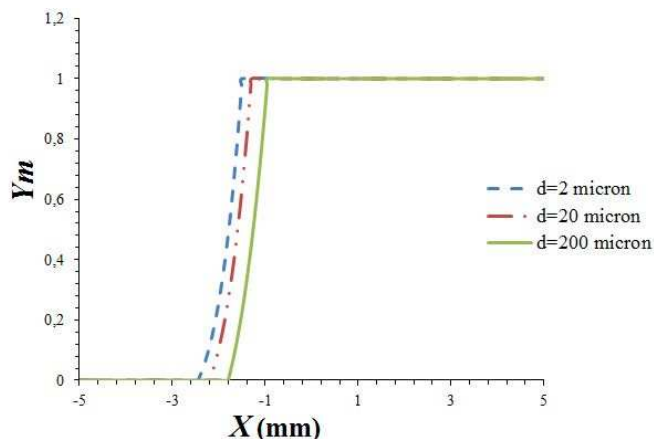
در شکل ۳ نمودار توزیع درجه حرارت برحسب مکان و برای ذرات سوخت با قطرهای مختلف ترسیم شده است. ملاحظه می‌گردد که بیش‌ترین مقدار دمای حاصل، در ناحیه شعله که تقریباً در مکان ۱/۸- میلی‌متر است، حاصل گردیده است. این میزان دما مربوط به ذرات سوخت با قطر ۲ μm است و معادل ۳۶۰۰ K است.

در شکل ۴ توزیع کسر جرمی ذرات سوخت برحسب مکان ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که در ناحیه شعله و با آغاز اشتعال تمام

ذرات سوخت مصرف شده‌اند. در انتهای ناحیه واکنش، به دلیل وجود شرایط استوکیومتری، مقدار کسر جرمی ذرات سوخت به صفر رسیده است. هم‌چنین ذرات با قطر کوچک‌تر سریع‌تر به دمای اشتعال رسیده و واکنش دادند.

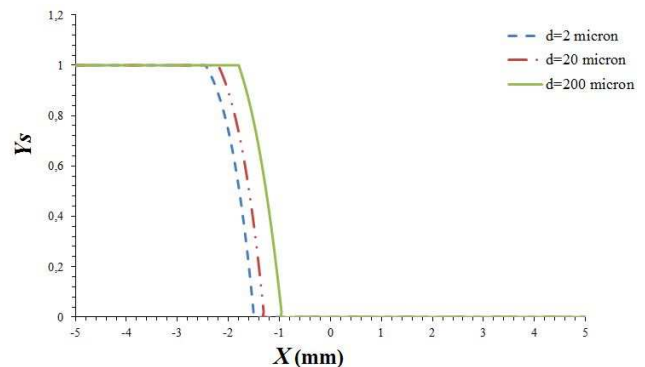
در شکل ۵ توزیع کسر جرمی اکسیدکننده برحسب موقعیت مکانی و با در نظرگیری اثر قطر ذرات سوخت مختلف رسم شده است. همان‌طور که قابل ملاحظه است، با افزایش قطر ذرات سوخت، توزیع کسر جرمی اکسیدکننده به سمت نازل اکسیدکننده منتقل شده است.

در شکل ۶ توزیع کسر جرمی محصولات سوختی در فاز مایع



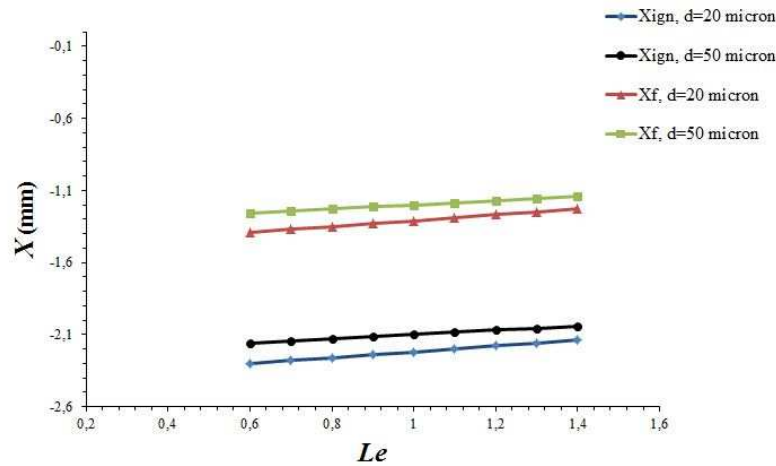
شکل ۶. توزیع کسر جرمی محصولات سوختی در فاز مایع برحسب موقعیت مکانی با در نظرگیری اثر قطر ذرات

Fig. 6. Mass fraction distribution of products in the liquid phase in terms of position with considering the effect of particle diameters



شکل ۴. توزیع کسر جرمی ذرات سوخت جامد برحسب مکان با قطر ذرات مختلف

Fig. 4. Mass fraction distribution of solid fuel particles in terms of position for different particle diameters



شکل ۷. موقعیت مکانی آغاز اشتعال و شعله بر حسب عدد لوئیس با در نظرگیری اثر قطر ذرات

Fig. 7. Position of ignition and flame in terms of Lewis number with considering the effect of particle diameters

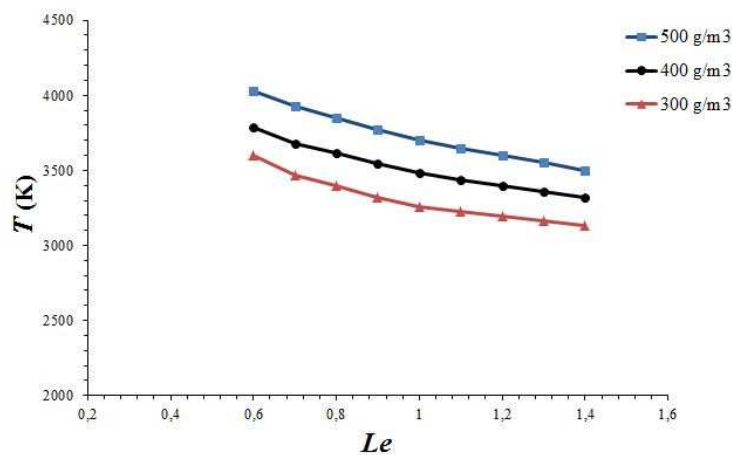
تأثیر عدد لوئیس بر دمای شعله با در نظرگیری اثر غلظت جرمی ذرات بررسی شده است. با افزایش عدد لوئیس که به منزله کاهش نفوذ جرم است، دمای شعله کاهش یافته است. هم‌چنین با افزایش غلظت ذرات سوخت، میزان دمای شعله افزایش یافته است

۸- جمع‌بندی

با توجه به کاربردهای فراوان احتراق ذرات فلزی، در این مقاله به بررسی احتراق غیرپیش‌آمیخته ابر ذرات تیتانیوم در هندسه جریان متقابل پرداخته شد. در این مدل‌سازی چندناحیه‌ای به کمک شرایط مرزی و انطباقی ارائه‌شده، معادلات حاکم بر فرآیند احتراق در فرم بی‌بعد، شامل بقای انرژی، بقای جرم سوخت، بقای جرم اکسیدکننده

بر حسب موقعیت مکانی و با در نظرگیری اثر قطر ذرات سوخت، رسم شده است. قابل ملاحظه است که در ابتدای وقوع واکنش، میزان محصولات ناچیز بوده و با وقوع اشتعال، تمام ذرات سوخت، اکسید شده و به محصولات در فاز مایع تبدیل شده‌اند. با افزایش قطر ذرات سوخت تشکیل محصولات به تأخیر افتاده است.

در شکل ۷ تأثیر عدد لوئیس بر مکان آغاز اشتعال و شعله با در نظرگیری اثر قطر ذرات بررسی شده است و همان‌طور که قابل ملاحظه است، با افزایش عدد لوئیس، شعله به سمت نازل اکسیدکننده منتقل گردیده است. این تغییرات، در طیف اعداد لوئیس مورد بررسی تقریباً خطی است. هم‌چنین با افزایش قطر ذرات، مکان آغاز اشتعال و شعله به سمت نازل اکسیدکننده منتقل شده است. در شکل ۸



شکل ۸. دمای شعله بر حسب عدد لوئیس با در نظرگیری اثر غلظت جرمی ذرات

Fig. 8. Flame temperature in terms of Lewis number with considering the effect of mass particle concentration

T_f	دمای شعله، K	و بقای جرم محصولات سوختی حل شد و توزیع دما و کسر جرمی
T_{melt}	دمای ذوب، K	اجزا ارائه گردید. همچنین تأثیر برخی پارامترها مانند عدد لوئیس،
X	مکان، m	اندازه قطر ذرات و غلظت جرمی مورد بررسی قرار گرفت. مقدار دمای
x	مکان بی بعد	شعله در ناحیه شعله به بیشترین مقدار خود رسید که در عدد
X_f	مکان شعله، m	لوئیس ۱ و قطر ذره ۲ میکرون برابر ۳۶۰۰ کلوین بود. این میزان
x_f	مکان شعله بی بعد	دما، با افزایش عدد لوئیس و در نتیجه کاهش نفوذ جرمی، کاهش
X_m	مکان ذوب ذرات سوخت، m	یافت. موقعیت مکانی شعله نیز با افزایش عدد لوئیس، به سمت نازل
x_m	مکان ذوب ذرات سوخت بی بعد	اکسیدکننده متمایل شد و در عدد لوئیس ۱ موقعیت شعله برابر
Y_m	کسر جرمی محصولات مایع	۱/۸- میلی متر حاصل گردید.
y_m	کسر جرمی محصولات مایع بی بعدشده	
Y_o	کسر جرمی اکسیدکننده بی بعدشده	
$Y_{o_{initial}}$	کسر جرمی اکسیدکننده بی بعدشده اولیه	
Y_s	کسر جرمی سوخت جامد	
y_s	کسر جرمی ذرات جامد بی بعدشده	
$Y_{s_{initial}}$	کسر جرمی ذرات جامد بی بعدشده اولیه	
ρ_p	چگالی ذره، kg/m^3	
τ_{melt}	زمان مشخصه ذوب ذرات، 1/s	
ω_s	نرخ واکنش، $kg/(s m^3)$	
$\tilde{\omega}_s$	نرخ واکنش بی بعد	
ω_{melt}	نرخ ذوب، 1/s	
$\tilde{\omega}_{melt}$	نرخ ذوب بی بعد	
a	نرخ کرنش، 1/s	
B	ضریب فرکانسی نرخ واکنش، $kg/(s m^3)$	
C	ظرفیت حرارتی مخصوص، kJ/kgK	
C_a	ظرفیت حرارتی مخصوص گاز، kJ/kgK	
C_p	ظرفیت حرارتی مخصوص ذره، kJ/kgK	
D_c	عدد دام کوهلر	
D_m	ضریب نفوذ جرمی محصولات مایع، m^2/s	
E	انرژی فعال سازی سوخت، kJ	
Le	عدد لوئیس	
n_p	تعداد ذرات کروی سوخت معلق در فاز گازی در واحد حجم، $1/m^3$	
Q_{melt}	گرمای نهان ذوب ذرات سوخت، kJ/kg	
q_{melt}	گرمای نهان ذوب بی بعد	
r	شعاع ذره، m	
R	ثابت جهانی گاز، $Pa m^3/(mol K)$	
T	دما، K	

۹- فهرست علائم

۱۰- مراجع

- [1] A. Akbarzadeh, M. Samiei, S. Davaran, Magnetic nanoparticles: preparation, physical properties, and applications in biomedicine, *Nanoscale research letters*, 7(1) (2012) 1-13.
- [2] I. Molodetsky, E. Vicenzi, E. Dreizin, C. Law, Phases of titanium combustion in air, *Combustion and Flame*, 112(4) (1998) 522-532.
- [3] K. Miyata, N. Kubota, Combustion of Ti and Zr particles with KNO_3 , *Propellants, explosives, pyrotechnics*, 21(1) (1996) 29-35.
- [4] A. Abbud-Madrid, M.C. Branch, J.W. Daily, Ignition and combustion of bulk titanium and magnesium at normal

علائم یونانی

θ	دمای بی بعد
θ_f	دمای بی بعد شعله
θ_{mel}	دمای بی بعد ذوب
ρ	مقدار مول اکسیدکننده واکنش دهنده با یک مول سوخت
λ	ضریب هدایت حرارتی، $kJ/(m s K)$
ρ	چگالی، kg/m^3
ρ_a	چگالی گاز، kg/m^3

- R.K. Eckhoff, Explosibility of micron-and nano-size titanium powders, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6) (2013) 1646-1654.
- [11] S.A.H. Madani, M. Bidabadi, N.M. Aftah, A. Afzalabadi, Semi-analytical modeling of non-premixed counterflow combustion of metal dust, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137(2) (2019) 501-511.
- [12] S. Sadeghi, M. Bidabadi, Preparation of particle oxide for biomedical applications employing a safe thermochemical technique: An analytical study, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 145 (2019) 107680.
- [13] M. Bidabadi, P. Panahifar, S. Sadeghi, Analytical development of a model for counter-flow non-premixed flames with volatile biofuel particles considering drying and vaporization zones with finite thicknesses, *Fuel*, 231 (2018) 172-186.
- [14] H. Rasam, M. Nematollahi, S. Sadeghi, M. Bidabadi, An asymptotic assessment of non-premixed flames fed with porous biomass particles in counter-flow configuration considering the effects of thermal radiation and thermophoresis, *Fuel*, 239 (2019) 747-763.
- and reduced gravity, in: *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, 1996, pp. 1929-1936.
- [5] A.S. Mukasyan, S.G. Vadchenko, I.O. Khomenko, Combustion modes in the titanium-nitrogen system at low nitrogen pressures, *Combustion and flame*, 111(1-2) (1997) 65-72.
- [6] V. Karasev, A. Onishchuk, S. Khromova, O. Glotov, V. Zarko, E. Pilyugina, C. Tsai, Formation of metal oxide nanoparticles in combustion of titanium and aluminum droplets, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 42(6) (2006) 649-662.
- [7] E. Shafirovich, S.K. Teoh, A. Varma, Combustion of levitated titanium particles in air, *Combustion and Flame*, 152(1-2) (2008) 262-271.
- [8] M. Cairns, D.L. Frost, S. Goroshin, Effect of Oxygen Concentration on the Combustion of Titanium Particles, in: *International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, 2009, pp. 25-28.
- [9] C. Badiola, E.L. Dreizin, Combustion of micron-sized particles of titanium and zirconium, *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(2) (2013) 2237-2243.
- [10] S.P. Boilard, P.R. Amyotte, F.I. Khan, A.G. Dastidar,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Farmahini Farahani, N. Hasanvand, M. Bidabadi . Analytical model for the non-premixed combustion of the titanium dust cloud in counter-flow geometry ,*Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(Special Issue 5)(2021) 3307-3316.

DOI: [10.22060/mej.2021.18209.6773](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18209.6773)



