

پیش بینی اثر بازخورد حرارت و سایز ذره در تحلیل ساختار شعله پیش مخلوط ابر ذرات بایومس

مهدی بیدآبادی^۱، میلاد عظیمی^{۲*}، علیرضا طربی^۳

آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشگاه علم و صنعت ایران

*میلاد عظیمی: milad_azimi@mecheng.iust.ac.ir

چکیده

در این مقاله ساختار شعله پیش مخلوط آرام، یک بعدی و پایا در سیستم های قابل احتراق، که شامل توزیع یکنواخت ذرات سوخت در مخلوط اکسیداسیون هوا می باشد به منظور پیش بینی اثر بازخورد حرارت در پایرولیزیز ذرات چوب با در نظر گرفتن سوختن چارها با اکسیژن به عنوان اکسیدایزر بررسی شده است. شعله به سه ناحیه کلی تقسیم بندی شده و با دیواری محصور می شود. فرض می شود که در ناحیه اول ابتدا رطوبت موجود در ذرات چوب تبخیر می شود، سپس ذرات جامد سوخت طی عملیات تبخیر در ناحیه واکنشی به ذرات سوخت گازی که از نظر ساختار شیمیایی شناخته شده اند، تبدیل می شوند. مدل با استفاده از فرضیات مرسوم در احتراق ذرات بنا شده و نقش بازخورد حرارت را در احتراق ذرات ریزارگانیک بررسی می کند. سرانجام تاثیر این ترم بر سرعت سوزش و دمای شعله به صورت ترمودینامیکی در شعاع های مختلف ذره مقایسه شده است که با در نظر گرفتن باز خورد حرارت، سرعت و دما نسبت به حالتی که اثر بازخورد حرارت در نظر گرفته نشده است، افزایش یافته اند.

واژه های کلیدی: پایرولیزیز - بازخورد حرارت - سرعت سوزش

۱- مقدمه

مطالعه بر روی احتراق ابرذرات، به خصوص ابر ذرات بایومس که چوب نیز از زیر مجموعه های آن می باشد، از نظر کنترل آلودگی محیط زیست از درجه اهمیت بالایی برخوردار است [1,2]. حجم کاری بسیار زیادی در زمینه پایرولیزیز واثر باز خورد حرارت در سوختن و تولید چار ذرات بایومس وجود دارد [3]. مدل های متعددی برای پایرولیزیز (سوختن) ذرات جامد حاوی چار و بدون چار در [4-6] توسعه داده شده است که این مدل ها از رفتار ساده پروسه احتراق و پایرولیزیز به واسطه هدایت حرارتی گرفته تا پایرولیزیز شدن مواد حاوی چار با استفاده از مدل های پیچیده نرخ های سینتیک شیمیایی تغییر می کنند [7,8] علاوه بر این وجود سوخت (چوب) در آتش سوزی هایی که در ساختمان اتفاق می افتد، اغلب اکسیژن محیط اطراف را به شدت مصرف می کند [9]. به منظور تعیین میزان رشد آتشسوزی در ساختمان ها، اطلاع از میزان پایرولیزیز چوب تحت اکسیدایزری مانند اکسیژن امری حیاتی می باشد [10]. همچنین مطالعه بر روی توسعه شعله پیش مخلوط به منظور افزایش درک انفجار ذرات ذغال نیز از موارد قابل توجه می باشد [11]. تئوری توسعه شعله به صورت یکنواخت، ساکن بدون جاذبه ابر ذرات، به مدت یک دهه توسعه داده شده است [12].

۱- استادیار - دانشگاه علم و صنعت ایران

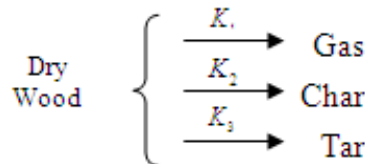
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشجوی کارشناسی - دانشگاه آزاد اسلامی سمنان

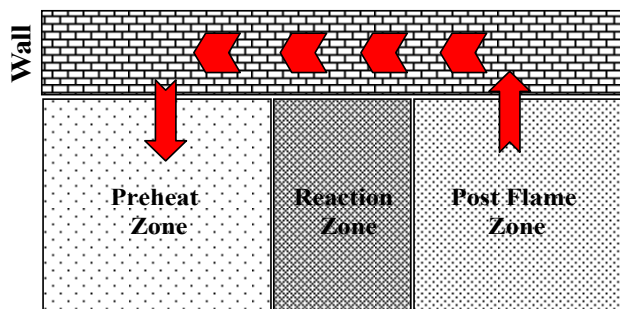
بسیاری از وجوه این مدل‌های تئوری بسیار نزدیک و در موازات سیستم‌های گازی پیش مخلوط هستند [10-12]. در این مدل‌ها پراکندگی ذرات به صورت یکنواخت فرض شده است [10]، همچنین آزمایشات تجربی در آزمایشگاهها بر روی این گونه سیستم‌ها به منظور دست‌یابی به رسوب‌گذاری ذرات در یک میدان جاذبه معمولی روی زمین بسیار مشکل می‌باشد. اخیراً آزمایشات در مرکز تحقیقاتی لوئیس ناسا به منظور مشخص کردن ساختار و سرعت شعله پیش مخلوط در یک مخلوط احتراقی از متان و هوا انجام شده است. این آزمایشات در شرایط جاذبه کاهیده ($g \leq 0.01g_0$) به کمک برج قطره، همانند پرواز لیرجت در خط سیر کپلرین انجام شده است [11,12].

۲- مدل فیزیکی

در این پروسه ابتدا ابر ذرات چوب پس از تبخیر رطوبت محترق شده و همزمان با تبخیر شدن ذرات سوخت، تار و نهایتاً چار تولید شده و وارد واکنش با اکسیدایزر (در اینجا O_2 می‌باشد) میشود و ناحیه واکنشی را تشکیل می‌دهند.



مبدا مختصات و مبدا اندازه‌گیری‌های خود را وسط ناحیه واکنشی در نظر می‌گیریم، طوری که قبل این مبدا o^- ناحیه بعد از آن (تا ابتدای ناحیه کانوکشن) o^+ خواهد بود. از احتراق ذرات چوب پنج ماده فرار تشکیل میشود که شامل CO, CO_2, H_2, H_2O و یک هیدروکربن سبک که از نظر ترمودینامیکی ساختار شناخته شده‌ای را دارمی باشد [10-12]، با این فرض که سرعت سوختن گاز را با سرعت سوختن ذرات جامد یکسان در نظر می‌گیرد [10].



شکل (۱): شماتیکی از ساختار شعله

برای احتراق ذرات چوب و سوزاندن بایومس‌ها، و به وجود آوردن ذرات چوب به صورت ابر ذرات، از پدیده ماسه‌گذاری چوب درختان بلوط و چنار استفاده می‌کنند. میزان انتشار شعله به میزان انتقال حرارت از شعله، تعادل ترمودینامیکی بین فاز گاز و جامد و ناحیه در حال سوزش به ناحیه سوخته نشده ذرات جامد، که تغییر فاز به حالت گازی داده‌اند، بستگی دارد. سه پدیده کلی احتراق، خشک شدن، پایرولیز (تجزیه در اثر حرارت) و احتراق چارها با در نظر گرفتن اثر باز خورد حرارت در نظر گرفته شده‌اند. برای سوخته‌های چوبی و یا بایومس‌ها، چارهای حاصله، از (۸۰ تا ۹۷ درصد) کربن خالص تشکیل شده است. مطالعه روی انتشار شعله‌های پیش مخلوط می‌تواند در درک انفجار ذرات چوب موثر باشد [10]. همچنین انتشار شعله در یک مخلوط قابل احتراق شامل: ۱- توزیع یکنواخت ذرات سوخت ۲- ذرات سوخت به صورت گازی ۳- هوا می‌باشد. از دیگر

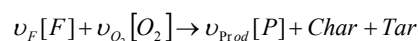
فرضیات این مقاله این است، که از دیفیوژن حاصله از گرادیان فشار و از واکنش های سطحی صرف نظر شده است. و در آخر به بررسی اثر بازخورد حرارت در اکسیداسیون چار و سرعت سوزش ابر ذرات چوب می پردازد.

۳- مدل ریاضی

این مدل به منظور توضیح حالت پایدار، یک بعدی، توسعه صفحه ای شعله در مخلوط قابل احتراقی که شامل توزیع یکنواخت ذرات فرار سوخت در هوا می باشد، توسعه داده شده است. فرض می شود که تعداد اولیه ذرات n_{ii} (تعداد ذرات بر واحد حجم) و شعاع اولیه r_{ii} مشخص می باشند. فرض می شود که تمام نیروهای خارجی شامل اثرات جاذبه قابل صرف نظر کردن است.

از دیگر فرضیات بیان شده این است که از دیفیوژن ایجاد شده به واسطه گرادیان فشار و همچنین از انتقال حرارت تشعشعی صرف نظر شده است. مطالعه تئوری اخیر نشان می دهد که انتقال حرارت تشعشعی نقش مهمی را در توسعه شعله بازی می کند [10-12]. همچنین تحلیل پیشین که نشان داد انتقال حرارت تشعشع در سرعت سوزش نقش موثری دارد.

از آنجا که نرخ کاهش فلاکس تشعشعی محلی با مقدار تعداد ذرات n_{ii} متناسب است و شعاع ذرات r منتقل شده توسط این مکانیزم برای n_s های کوچک، کوچک در نظر گرفته شده و همچنین زمانی که $r_f/r_{ii} \ll 1$ ، که شعاع ذرات سوخت در ناحیه واکنشی می باشد، صحبت در مورد این تحلیل با وجود این محدودیت ها حتماً امکان پذیر می باشد. اگرچه می توان نشان داد که نتایج به دست آمده در این مقاله از نظر کیفی تغییرات مهمی با حالتی که انتقال حرارت تشعشعی در نظر گرفته شده است ندارند. میان دو کمیت ϕ_u و ϕ_g تمایزی وجود دارد به این قرار که ϕ_g استوکیومتری موثر فاز گازی در ناحیه واکنشی می باشد که در ادامه تحلیل، تعریف می شود. در این تحلیل فرض می شود که ذرات سوخت تبخیر می شوند تا به شکل ترکیب گازی شناخته شده ای که اکسید می شود تبدیل شوند. بنابراین از واکنش های سطحی صرف نظر می شود. برای ساده سازی فرض می شود که درجه حرارت ذره تقریباً معادل درجه حرارت گاز می باشد. پروسه احتراق با یک واکنش تک مرحله ای مدل شد:



که F و O_2 و P به ترتیب بیانگر سوخت، اکسیژن و محصولات می باشند و کمیت های ν_{Prod} ، ν_{O_2} ، ν_F ضرایب استوکیومتری مربوطه می باشند.

نرخ ثابت واکنش کلی به شکل رابطه آرهینیوس

$$K_F = B \exp(-E/(RT)) \quad (1)$$

$$K_T = -\rho K_f \exp(-E/(RT))$$

که B فاکتور فرکانس و E انرژی اکتیواسیون و R ثابت جهانی گازها و K_f نرخ واکنش تار می باشد. اندیس های F و T به ترتیب معرف فاز سوخت گازی و تار می باشند. عدد زدوویچ نیز طبق رابطه زیر تعریف می شود که آن را مقدار بسیار بزرگی در نظر می گیریم:

$$Z_e = \frac{E(T_f - T_u)}{RT_f^2} \quad (2)$$

در اینجا زیر نویس f بیانگر حالت درون شعله و زیر نویس u بیانگر حالت فضای اطراف جریان واکنش می باشد.

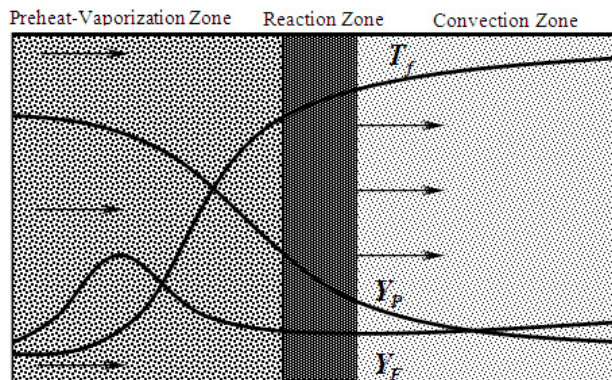
در این تحلیل ابتدا فرض می شود که رطوبت موجود در سوخت بخار می شود، سپس ذرات سوخت به صورت بخار در می آیند. بنابراین با این فرض از واکنشهای سطحی صرف نظر می کنیم. نرخ تبخیر شدگی و دولاتیلیزیشن فرض می شود که طبق فرمول زیر محاسبه گردد:

$$w_v = An_s 4\pi T^n r^2 \quad (3)$$

$$w_{de} = A'n_s 4\pi T^n r^2$$

که واحد w_v ، جرم سوخت گازی تبخیر شده بر واحد حجم بر ثانیه می باشد. مقادیر A و n ثابت هایی هستند که دانسته فرض می شوند و T بیانگر درجه حرارت گاز می باشد. و w_{de} میزان جرم ذرات بخار شده از فاز گازی بر واحد حجم ثانیه می باشد.

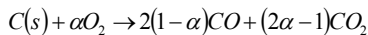
ناحیه واکنش را به سه قسمت کلی تقسیم می کنیم شکل (۳)، ناحیه پیش گرم، ناحیه واکنشی و ناحیه کانوکشن را نشان می دهد. در ناحیه پیش گرم از ترم واکنش بین سوخت و اکسیدایزر صرف نظر می شود. تا زمانی که عمل تبخیر شدن ذرات سوخت در ناحیه کانوکشن پیش بینی می شود، واکنش شیمیایی بین ذرات سوخت و اکسیدایزر ادامه می یابد.



شکل (۲): ساختار شعله پیش مخلوط ذرات بایومس

شکل (۲) شماتیکی از تصویر ساختار شعله فرض شده را نشان می دهد. به منظور تعیین ساختار این نواحی، تعدادی از فرضیات در معادلات بقاء حاکم بر ساختار شعله تعریف شده است.

محصولات اولیه احتراق چار، CO ، CO_2 می باشند که طبق معادله ترمودینامیکی زیر تولید می شوند:



با نسبت CO به CO_2 که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$CO/CO_2 = 2500 \exp(-6420/T) \quad (4)$$

و همچنین نرخ احتراق چار که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$R_{C(s)} = P_{O_2} / (1/K_r + 1/K_d) \quad (5)$$

که K_r و K_d به ترتیب ثابتهای مربوط به نرخ واکنش شیمیایی و دیفیوژن می باشد. در این آنالیز از تمام گرادیان های موجود از جمله گرادیان دما، در راستای موازی با انتشار شعله صرف نظر می شود. همچنین در نظر گرفته می شود که سرعت ذرات با سرعت گازها یکسان می باشد، بنابراین:

$$\frac{n_s}{\rho} = Const \quad (6)$$

که ρ دانسیته مخلوط گاز و ذرات سوخت می باشد. برای اعداد ماخ کوچک، معادلات بقاء به فرم زیر استخراج شده است:

$$(7)$$

$$\rho v = \text{Const}$$

برای احتراق ابر ذرات چوب معادله بقاء انرژی به فرم زیر استخراج می شود:

$$\rho v C \frac{dT}{dx} = \lambda_u \frac{d^2 Y_F}{dx^2} - w_F \frac{\rho_u}{\rho} Q + w_C \frac{\rho_C}{\rho} Q + w_T \frac{\rho_T}{\rho} Q - w_v \frac{\rho_v}{\rho} Q - w_{de} \frac{\rho_u}{\rho} Q - Q_L \text{Sign}(x) \quad (8)$$

که در آن $Q_L = K(T - T_u)$ تعریف می شود که بیانگر اثر بازخورد حرارت در معادلات بقاء می باشد.

معادله بقاء فاز گازی سوخت:

$$\rho v \frac{dY_F}{dx} = \rho_u D_u \frac{d^2 Y_F}{dx^2} - w_F \frac{\rho_u}{\rho} + w_v \frac{\rho_u}{\rho} + w_{de} \frac{\rho_u}{\rho} + w_T \frac{\rho_T}{\rho} \quad (9)$$

معادله بقاء فاز جامد سوخت:

$$\rho v \frac{dY_S}{dx} = -w_v \frac{\rho_u}{\rho} - w_{de} \frac{\rho_u}{\rho}, \quad \rho v \frac{dY_C}{dx} = w_C \frac{\rho_C}{\rho} \quad (10)$$

که ρ_S دانسیته ذرات سوخت می باشد و ρ_C دانسیته چار می باشد که ثابت فرض می شوند. در معادله ای که بیانگر کسر جرمی ذرات سوخت است (Y_S)، ترم دیفیوژن قابل صرف نظر است.

معادله حالت با در نظر گرفتن رفتار گاز کامل:

$$\rho T = cte \quad (11)$$

متغیر مستقل x به کمک رابطه زیر به یک مختصات فضایی (x') مربوط می شود:

$$x = \int_0^{x'} \left(\frac{\rho}{\rho'} \right) dx' \quad (12)$$

نقطه $x = 0$ که مبدا مختصات می باشد را روی ناحیه نازک واکنشی در نظر می گیریم. همانطور که مشاهده می شود ترم های احتراق چار، تار و اثر ترم بازخورد حرارت به معادلات بقاء اضافه شده است.

در معادلات انرژی و بقاء فاز گازی و جامد ρ دانسیته، v سرعت جریان، Y_F کسر جرمی سوخت، Y_C کسر جرمی چار، w_F نرخ واکنش سوخت، w_C نرخ احتراق تار، w_T نرخ احتراق تار، w_v نرخ تبخیر شدگی، Q اتلاف حرارت بر واحد جرم سوخت سوخته شده، و Q_v حرارت مربوط به تبخیر شدگی بر واحد جرم سوخت می باشد. ظرفیت حرارتی C که خود شامل ظرفیت حرارتی گاز و ظرفیت حرارتی جامد می باشد از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$C = C_p + \frac{4\pi r^3 C_s \rho_s n_s}{3\rho} \quad (13)$$

و شرایط در لایه مرزی برای حل معادلات بقاء به صورت زیر می باشد:

$$\text{at } x = -\infty, Y_F = 0, \quad T = T_u, \quad Y_S = Y_{Fu} \quad (14)$$

$$\text{at } x = +\infty, Y_F = \text{finite}, \quad T = T_b + T_C, \quad Y_C = \text{finite}$$

که T_C, T_b به ترتیب دمای آدیاباتیک حاصل از احتراق ذرات سوخت گازی و ماکزیمم دمای حاصل از احتراق چارها در ناحیه واکنشی می باشند.

مقدار Y_{Fu} نیز کسر جرمی ذرات سوخت موجود در کل ذرات سوخت می باشد.

۴- بی بعد سازی معادلات حاکم

کمیت های بی بعد

$$y_S = \frac{Y_S}{Y_{FC}}, \quad z = \frac{\rho_u v_u C}{\lambda_u} x, \quad y_F = \frac{Y_F}{Y_{FC}}, \quad y_C = \frac{Y_C}{Y_{FC}}, \quad m = \frac{\rho v}{\rho_u v_u}, \quad \theta = \frac{T - T_u}{T_f - T_u}, \quad D = \frac{T_f - T_w}{T_f - T_u} \quad (15)$$

تعریف می شوند، که T_f ماکزیمم دمای به دست آمده در ناحیه واکنشی، که با صرف نظر کردن از حرارت تبخیر شدگی ذرات محاسبه شده است. کمیت Y_{FC} به فرم زیر در نظر گرفته می شود:

$$Y_{FC} Q = C(T_f - T_u) \quad (16)$$

کمیت v_u مشخصه سرعت سوزش شعله توسعه یافته در مخلوط احتراقی ذرات سوخت در هوا می باشد که با صرف نظر کردن از حرارت تبخیر شدگی ذرات محاسبه شده است. با جایگذاری تعاریف انجام شده در معادله (۱۵) و معادلات (۸-۱۰) و با استفاده از معادله (۱۶) معادلات بی بعد زیر به دست می آیند:

$$m \frac{d\theta}{dZ} = \frac{d^2\theta}{dZ^2} + \omega_F \frac{\rho_u}{\rho} + \omega_C \frac{\rho_C}{\rho} + \omega_T \frac{\rho_t}{\rho} - q \gamma y_S^{2/3} (\theta^\circ)^n - q \gamma' y_S^{2/3} (\theta^\circ)^n - k \theta \text{Sign}(x) \quad (17)$$

$$m \frac{dy_F}{dZ} = \frac{d^2 y_F}{dZ^2} + \omega_F \frac{\rho_u}{\rho} + \gamma y_S^{2/3} (\theta^\circ)^n + \gamma' y_S^{2/3} (\theta^\circ)^n + \omega_T \frac{\rho_t}{\rho}$$

$$m \frac{dy_S}{dZ} = \frac{d^2 y_S}{dZ^2} - \gamma y_S^{2/3} (\theta^\circ)^n - \gamma' y_S^{2/3} (\theta^\circ)^n$$

$$m \frac{dy_C}{dZ} = \omega_C \frac{\rho_C}{\rho}$$

که شعاع r که جزء ترم های $y_S = 4\pi\rho_s r^3 n_s / (3\rho Y_{FC})$ می باشد با آن به فرم $\lambda / (\rho CD) = 1$ تا هنگامی که نرخ تبخیر شدگی با افزایش T افزایش می یابد، می توان انتظار داشت که شرایط غالب شرایط نزدیک به ناحیه واکنشی است. فرض می شود که نرخ تبخیر شدگی نشان داده شده در معادله (۳) متناسب است با $(T - T_u)^n \approx 1 \gg (T_f - T_u) / T_u$ و این فرمول اصلاح شده، در تعریف معادله (۱۷) به کار میرود. کمیت-های $\omega_F, \omega_{de}, \omega_C, \gamma, q$ تعریف شده در معادله (۱۷) به فرم زیر تعریف می شوند:

$$\omega_F = \frac{\lambda_u \times w_F}{(\rho_u v_u)^2 \times C \times Y_{FC}}, \quad \omega_C = \frac{\lambda_u \times w_C}{(\rho_u v_u)^2 \times C \times Y_{FC}}, \quad q = \frac{Q_v}{Q} \quad (18)$$

$$\omega_{de} = \frac{\lambda_u \times w_{de} \times Y_{FC}}{(\rho_u v_u)^2 \times C^3 \times (T_f - T_u)^2}, \quad \gamma' = \frac{4.836 A' n_u^{1/3} \lambda_u (T_f - T_u)^n}{v_u^2 \rho_u^{4/3} C Y_{FC}^{1/3} \rho_s^{2/3}}$$

$$\omega_T = \frac{\lambda_u \times w_T}{(\rho_u v_u)^2 \times C \times Y_{FC}}, \quad \gamma = \frac{4.836 A n_u^{1/3} \lambda_u (T_f - T_u)^n}{v_u^2 \rho_u^{4/3} C Y_{FC}^{1/3} \rho_s^{2/3}}$$

شرایط مرزی برای معادله (۱۷) به فرم زیر می باشد

$$\theta = \theta_b = (T_b - T_u) / (T_f - T_u) \quad y_F = \text{finite} \quad y_C = \text{finite} \quad \rightarrow z = \infty \quad (19)$$

$$\theta = 0 \quad y_S = \alpha \quad y_F = 0 \quad y_C = 0 \quad \rightarrow z = -\infty$$

که $\alpha = Y_{Fu} / Y_{FC}$ به این دلیل که در ناحیه پیش گرم مواد فرار و بخار موجود در ذره چوب از آن خارج نشده و سوخت در فاز جامد (چار) تشکیل نشده است. بنابراین میزان کسر جرمی سوخت برابر صفر خواهد شد، که در این تحلیل کمیت q ، که نسبت حرارت مورد نیاز برای تبخیر ذرات سوخت به کل حرارت خارج شده از شعله می باشد، کوچک فرض شده است. اگر θ^0 بیانگر درجه حرارت بی بعد شده برای $q = 0$ باشد، آنگاه معادله (۱۷) با $m = 1$ به فرم زیر نوشته می شود:

$$\frac{d\theta^o}{dz} = \frac{d^2\theta^o}{dz^2} + \omega_F \frac{\rho_u}{\rho} + \omega_C \frac{\rho_C}{\rho} + \omega_T \frac{\rho_t}{\rho} - k\theta^0 \text{Sign}(x) \quad (20)$$

$$\frac{dy_F}{dz} = \frac{d^2y_F}{dz^2} - \omega_F \frac{\rho_u}{\rho} + \gamma y_S^{2/3} (\theta^o)^n + \omega_T \frac{\rho_t}{\rho} + \gamma' y_S^{2/3} (\theta^o)^n$$

$$\frac{dy_S}{dz} = -\gamma y_S^{2/3} (\theta^o)^n - \gamma' y_S^{2/3} (\theta^o)^n$$

$$\frac{dy_C}{dz} = \omega_C \frac{\rho_C}{\rho}$$

۵- ناحیه پیش گرم

همانطور که پیشتر هم اشاره شد مبدا مختصات خود را ناحیه واکنشی در نظر می‌گیریم، به این ترتیب در حد $Z_e \rightarrow \infty$ واکنش شیمیایی بین سوخت گازی و اکسیدایزر در ناحیه $Z < 0$ قابل نظر می‌باشد. بنابراین اولین عبارت معادله (۲۰) برابر می‌شود با:

$$\frac{d\theta^o}{dz} = \frac{d^2\theta^o}{dz^2} + k\theta^0 \quad (21)$$

یعنی می‌توان در این ناحیه از ترم های $\omega_T, \omega_C, \omega_F$ صرف نظر کرد. همچنین از تعریف T_f به عنوان دمای شعله در

ناحیه واکنشی که در $\theta^o = 1, z = 0$ ، نگاه در $\theta^o = 0, z = -\infty$. بنابراین با انتگرال گیری نتیجه به صورت زیر خواهد شد

$$\theta^o = \text{Exp}\left(\frac{1 + \sqrt{1 - 4k}}{2} z\right), \quad z \leq 0 \quad (22)$$

با جایگذاری معادله (۲۲) در سومین عبارت معادله (۲۰) و با انتگرال گیری و استفاده از شرایط مرزی نشان داده شده

در معادله (۱۹) داریم:

$$y_S = \left[-\frac{a}{\beta} \times \text{Exp}(\beta z)^n + \alpha^{1/3}\right], \quad z \leq 0 \quad (23)$$

که

$$a = \frac{\gamma + \gamma'}{3n}, \quad \beta = \frac{1 + \sqrt{1 - 4K}}{2} \quad (24)$$

با جایگذاری معادله (۲۱) و (۲۳) در دومین عبارت معادله (۲۰) و با یک بار انتگرال گیری بین دو حد $z = -\infty$ تا $z = 0^-$ که

اندیس - بیانگر شرایط در فصل مشترک بین ناحیه پیش گرم و ناحیه واکنشی می‌باشد، به نتیجه زیر می‌رسیم

$$\left[\frac{dy_F}{dz}\right]_{0^-} = \left(-\frac{a^3}{\beta^3 - \beta\delta} - \frac{\alpha^{2/3} a}{\beta/3 - \delta/\beta} - \frac{2a^2}{2\beta^{2/3} - \delta} - y_{Ff}\right) \quad (25)$$

که

$$\delta = \frac{\beta}{3n} \quad (26)$$

که معادله (۲۵) با شرایط مرزی زیر محاسبه شده است:

$$y_F = Y_{Ff} \quad \text{at} \quad z = 0 \quad (27)$$

$$y_F = dy_F / dz \quad \text{at} \quad z = -\infty$$

در ناحیه کانوکشن، ناحیه ای که پایین دست ناحیه واکنشی قرار دارد، فرض می‌شود که ترم دیفیوژن در معادلات بقاء از

مرتبه کمتری نسبت به ترم های کانوکشن و تبخیرشدگی در معادله (۲۰) برخوردار است.

بنابراین ساختار این ناحیه به کمک معرفی مختصات قراردادی $\xi = \varepsilon z$ تحلیل می‌شود. که ε یک کمیت کوچک می

باشد. همچنین واضح است که در $z = 0^+$ کمیت های $d\theta^o / dz$ و dy_F / dz از مرتبه ε می‌باشند، که بیانگر شرایط در سطح

مشترک بین ناحیه کانوکشن و ناحیه واکنشی می‌باشد.

۶- ناحیه واکنشی

همانطور که قبلاً اشاره شد در این ناحیه احتراق ذرات سوخت و تبدیل این ذرات به ذرات بخار گازی شکل و احتراق ذرات چار و تار حاصل از ذرات سوخت اولیه انجام می‌گیرد که ترکیب سوخت حاصل از آن شبیه به ساختار گاز متان در نظر گرفته می‌شود. در ناحیه واکنشی دو ترم کانوکشن و تبخیرشدگی در معادلات بقاء در مقایسه با دو ترم دیفیوژن و واکنشی کوچک می‌باشند. از آنجا که در این تحلیل سوخت در ناحیه واکنشی به عنوان یک محدود کننده وجود دارد، نرخ واکنشی w_T و w_{de} و w_C که در معادلات (۸-۱۰) ظاهر شد به فرم زیر نوشته می‌شود:

$$w_F = v_F W_F k_F C_F \quad (28)$$

$$w_T = v_T W_T k_T C_T$$

$$w_C = v_C W_C k_C C_C$$

$$w_{de} = A' \eta_s 4\pi T^n r^2$$

که w_F و C_F به ترتیب غلظت مولی و وزن مولکولی سوخت و اندیس های T و C و de به ترتیب بیانگر تار، چار و دولاتیلیزیشن می‌باشند. به منظور تحلیل ساختار این ناحیه پارامترهای زیر تعریف می‌شوند:

$$z = \varepsilon \eta \quad , \quad y_F = \varepsilon(b + y) \quad , \quad \theta^0 = 1 - \varepsilon t \quad (29)$$

که $\varepsilon = 1/Ze$ و $b = y_{Ff}/\varepsilon$ پارامتر انبساطی می‌باشد که کوچک فرض می‌شود. پارامترهای b و T از مرتبه یک فرض می‌شوند. با جایگذاری معادلات انبساطی (۲۹) در عبارات اول و دوم معادله (۲۰) و با استفاده از معادله (۱۸) و (۲۸) و با حد $\varepsilon \rightarrow 0$ به

$$\frac{d^2 t}{d\eta^2} = \Lambda(b + y)\exp(-t) \quad (30)$$

$$\frac{d^2(t + y)}{d\eta^2} = 0$$

می‌رسیم که کمیت Λ از مرتبه یک فرض می‌شود و به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$\Lambda = \frac{\lambda_u B \varepsilon^2 \left[v_F \exp\left(-\frac{E_{aF}}{RT_F}\right) + \frac{v_C \exp\left(-\frac{E_{aC}}{RT_C}\right)}{\rho_u} + \frac{v_T \exp\left(-\frac{E_{aT}}{RT_T}\right)}{\rho_u} \right]}{\rho_u v_u^2 C} \quad (31)$$

با فرض $\omega_C C_C = \omega_F C_F = \omega_T C_T$ شرایط مرزی برای معادله (۳۰) از حل دو ناحیه پیش گرم برای $\eta \rightarrow -\infty$ و ناحیه کانوکشن برای $\eta \rightarrow +\infty$ به دست می‌آید. از متج کردن با ناحیه کانوکشن به کمک حد $\varepsilon \rightarrow 0$ داریم

$$As \quad \eta \rightarrow +\infty \quad \frac{dt}{d\eta} = \frac{dy}{d\eta} = 0 \quad (32)$$

از معادلات (۲۹) و (۳۰) و (۳۲) داریم $t = y$. از متج کردن با ناحیه پیش گرم، حل معادله (۱۷) با حد $\varepsilon \rightarrow 0$:

$$As \quad \eta \rightarrow -\infty \quad \frac{dt}{d\eta} = -1 \quad (33)$$

اولین عبارت معادله (۳۰) با یک بار انتگرال گیری و استفاده از شرایط مرزی (۳۲) و (۳۳) به نتیجه زیر می‌رسد:

$$2(1 + b)\Lambda = 1 \quad (34)$$

۷- معادله سرعت سوزش

با جایگذاری معادله (۳۴) در معادله (۳۱)

$$v_u^2 = \frac{2(1+b)\lambda_u B \varepsilon^2 \left[v_F \exp\left(-\frac{E_{aF}}{RT_F}\right) + \frac{v_C \exp\left(-\frac{E_{aC}}{RT_C}\right)}{\rho_u} + \frac{v_T \exp\left(-\frac{E_{aT}}{RT_T}\right)}{\rho_u} \right]}{\rho_u C} \quad (35)$$

معادله (۳۵) به منظور محاسبه v_u به کار می رود البته اگر T_f و b معلوم باشند. به منظور مشخص کردن این کمیت ها، لازم است که ساختار ناحیه کانوکشن تحلیل شود. برای مقادیر بسیار بالای T_f مناسب و منطقی است که $y_{FF} = 0$ که منجر به $b = 0$ میشود. مقدار T_f با داشتن گرادیان های θ^0 و y_F به منظور جایگذاری در شرایط پرشی از ناحیه واکنشی زیر به دست می آید

$$\left[\frac{dy_C}{dz} \right]_{0^-} + \left[\frac{d\theta^0}{dz} \right]_{0^-} + \left[\frac{dy_F}{dz} \right]_{0^-} = \left[\frac{dy_F}{dz} \right]_{0^+} + \left[\frac{d\theta^0}{dz} \right]_{0^+} + \left[\frac{dy_C}{dz} \right]_{0^+} \quad (36)$$

با جایگذاری معادلات (۲۱) و (۲۵) در معادله (۳۶) و با $y_{FF} = 0$ و همچنین با فرض تغییرات در 0^+ از مرتبه ε می باشند، داریم

$$\beta + \frac{a^3}{\beta^3 - \beta\delta} - \frac{\alpha^{2/3} a}{\beta/3 - \delta/\beta} - \frac{2a^2}{2\beta^2/3 - \delta} + k = 0 \quad (37)$$

با توجه به اینکه فرض کردیم اندکی پس از شروع تبخیر شدگی در ناحیه واکنش، اکسیداسیون چار آغاز می شود و تا اندکی قبل از اتمام واکنش ادامه دارد، می توان فرض کرد که ترم تغییرات اکسیداسیون چار در شرایط متچینگ قابل نظر است.

اگر سینتیک تبخیر شدگی و سوخت گازی تشکیل شده از ذرات سوخت مشخص باشند، آنگاه مقادیر A ، A' و n موجود در معادله (۳) تعیین می شوند. اگر سینتیک اکسیداسیون سوخت گازی مشخص باشد، پارامترهای سینتیک شیمیایی کل، B و E ، ضریب استوکیومتریک U_F و حرارت آزاد شده Q بر واحد جرم سوخت مصرف شده تعیین می شود. بعلاوه اگر کمیت های λ_S ، ρ_u ، ρ_S و C مشخص باشند، آنگاه معادلات (۱۶)، (۳۵) و (۳۷) برای محاسبه کمیت های T_f و \mathcal{V}_{FC} و U_u به کار می روند. کمیت های γ و a ظاهر شده در این معادلات، می توانند با استفاده از معادلات (۱۸) و (۲۴) محاسبه شوند. معادله (۳۵) نشان می دهد که U_u متناسب است با:

$$v_u \approx \exp[-E/(2RT_f)] \quad (38)$$

اگر U_v بیانگر سرعت سوزش محاسبه شده با در نظر گرفتن اثر حرارت تبخیر شدگی ذرات سوخت باشد، آنگاه U_v متناسب است با:

$$v_v \approx \exp[-E/(2RT_{fv})] \quad (39)$$

که

$$T_{fv} = T_f - q(T_f - T_u) \quad (40)$$

بنابراین برای مقادیر کوچک q داریم:

$$v_v = v_u \exp(-qZ_e/2) \quad (41)$$

۸- بحث و نتیجه گیری

اگر یکنواخت تبخیر شده ذرات سوخت را در یک مخلوط اکسیدایزر در نظر بگیریم. به منظور توضیح دادن آن، فرض می شود که سوخت گازی حاصل شده از ذرات سوخت، متان می باشد. نتایج برای سرعت سوزش به عنوان تابعی از غلظت اولیه

متان در مخلوط احتراقی محیا می باشد [12]. از آنجا که این تحلیل ابتدا تحت تاثیر شرایطی که نرخ واکنش شیمیایی در ناحیه بالا می باشد، نرخ واکنش شیمیایی $E = 25000 \text{ Cal / mole}$ در نظر گرفته شد [10] و $B = 5.16 \times 10^6 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$ میباشد. استفاده از فرضیات بالا و مقادیر داده شده، می توان $b = 0$ در نظر گرفت. با توجه با این مقادیر و حل عددی، معادله سرعت سوزش استخراج می شود. پارامتر معرف نرخ تبخیر شدگی عبارت است از $A = 3.4 \times 10^{-4} \text{ (g)}_F / [(cm^2)_S ks]$ و $n = 1.33$. تمامی محاسبات معادلاتی که در بالا استخراج شد به کمک مقادیر زیر قابل محاسبه می باشد:

$$\rho_u = 1.13 \times 10^{-3} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \lambda_u = 3 \times 10^{-4} \text{ (cal/cm.s.k)}$$

$$T_u = 300K \quad \rho_s = 0.72 \times 10^{-3} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad q = 0.01$$

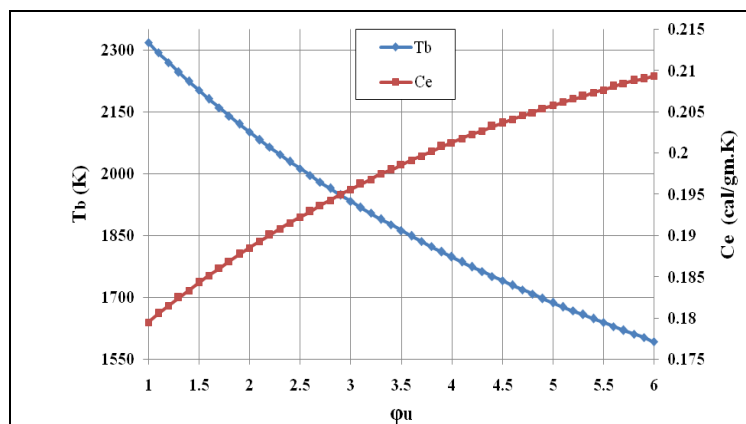
این مقادیر برای سه شعاع $r_u = 20, 30, 40 (\mu m)$ و $v_u = 10 \text{ (cm/s)}$ و $n_u = 3600 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ و $C = 0.3 \text{ (cal/g.k)}$. تمام محاسبات انجام شده با توجه به مقدار $\phi_u \geq 1$ استخراج شده است.

محاسبات عددی انجام شده برای اینچنین مخلوطی بیانگر آن است که $\phi_u \geq 1$ از رابطه $\phi_u = 17.18 Y_{Fu} / (1 - Y_{Fu})$ تبعیت می کند [10]. همچنین مقدار $\phi_g \leq 1$ یا همان نسبت اکی والان موثر فاز گازی در ناحیه واکنشی طبق رابطه $\phi_g = 17.18 Y_{Fc} / (1 - Y_{Fc})$ محاسبه می گردد.

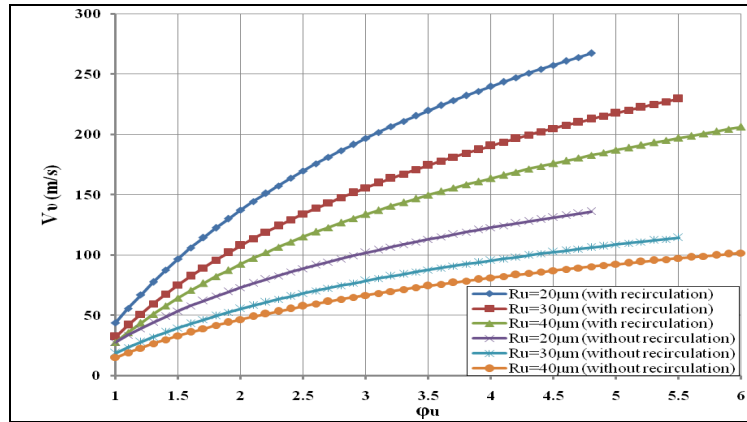
برای $\phi_u = 1$ مقدار $Y_{Fu} = 0.055$ بنابراین نتایج فقط برای مقادیر $Y_{Fu} \geq 0.055$ استخراج شده اند. بنابراین مقدار T_b محاسبه شده با صرف نظر کردن گرمای تبخیرشدگی ذرات از معادله زیر استخراج می شود:

$$C(T_b - T_u) = \frac{v_F W_F Q}{v_{O_2} W_{O_2}} Y_{O_2u} \quad (42)$$

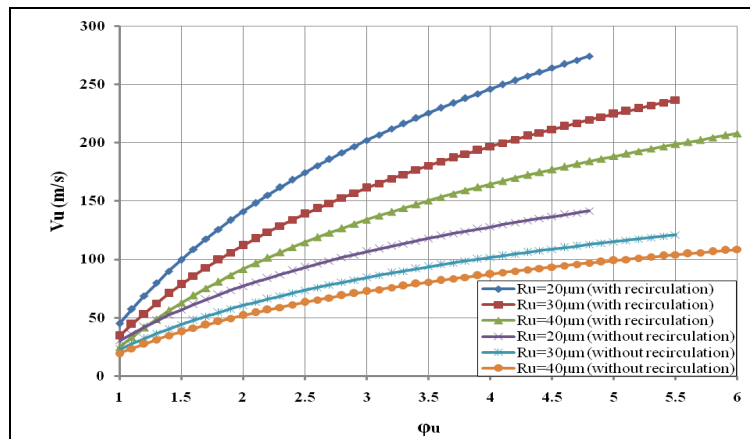
که Y_{O_2u} کسر جرمی اکسیژن در جریان واکنشی محیط می باشد و مقدار W_{O_2} بیانگر وزن مولکولی اکسیژن می باشد. درجه حرارت آدیاباتیک شعله برای مخلوط های متفاوتی از متان و هواکه با استفاده از برنامه کامپیوتری استاندارد محاسبه شده اند در شکل (۳) آورده شده اند. ظرفیت حرارتی، C از معادله (۴۲) محاسبه شد و نتایج در شکل (۳) نشان داده شده است. در این محاسبات محصولات احتراق CO_2, H_2O, N_2 و به مقدار زیاد CH_4 در نظر گرفته شده است. مقادیر C نشان داده شده در شکل (۳) در محاسبات بعدی به کار برده شده اند. در شکل (۴) سرعت سوزش محاسبه شده v_u بر حسب تابعی از نسبت اکی والانس، ϕ_u رسم شده است و نشان داده شده است که برای مقادیر ϕ_u ، سرعت سوزش با کاهش مقادیر r_u افزایش می یابد و نزدیک می شود به مقدار مخلوط احتراقی گاز خالص در حد $r_u \rightarrow 0$.



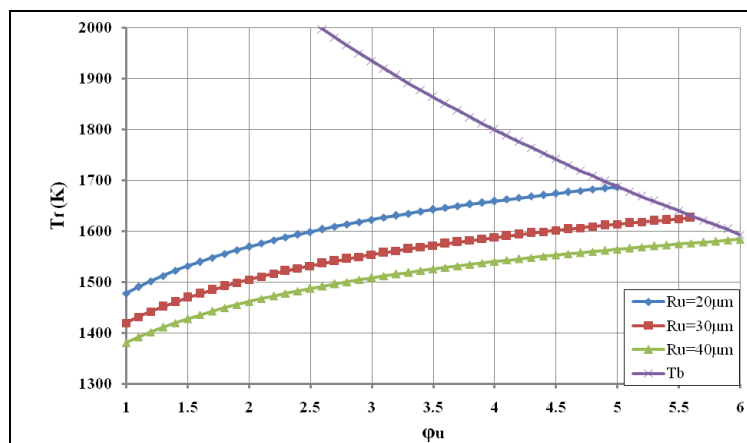
شکل (۳): مقادیر محاسبه شده دمای آدیاباتیک T_b (K) و ظرفیت حرارتی C (cal/(g.k)) بر حسب ϕ_u



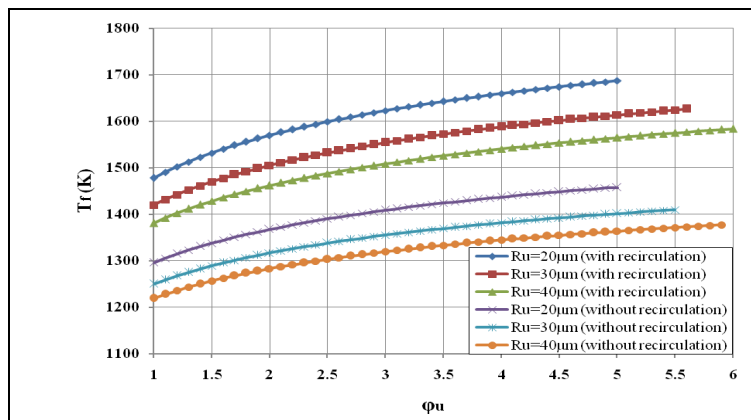
شکل (۴): محاسبه سرعت سوزش V_u (cm/s) بر حسب ϕ_u ، با در نظر گرفتن حرارت تبخیر شدگی ذرات سوخت.



شکل (۵): محاسبه سرعت سوزش V_u (cm/s) بر حسب ϕ_u ، با صرف نظر کردن از حرارت تبخیر شدگی ذرات سوخت.



شکل (۶): مقادیر محاسبه شده دمای شعله T_r (k) در ناحیه واکنشی و درجه حرارت آدیاباتیک شعله، T_b (k) بر حسب ϕ_u برای مقادیر مختلف



شکل (۷): مقایسه دمای شعله $T_f(k)$ در ناحیه واکنشی با در نظر گرفتن اثر بازخورد حرارت و بدون در نظر گرفتن اثر بازخورد حرارت

در شکل (۵) سرعت سوزش محاسبه شده v_u ، با صرف نظر کردن از حرارت تبخیر شدگی ذرات برحسب نسبت اکی والان ϕ_u رسم شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده برای سرعت سوزش و دمای شعله مشاهده می شود که حضور یک قید (در اینجا دیواره) باعث افزایش مقادیر دما و سرعت می شود که این خود حاکی از انتقال حرارت از ناحیه کانوکشن به ناحیه پیش گرم و گرم کردن مواد اولیه می باشد. با توجه پیش گرم کردن سوخت و اکسیدایزر سرعت انجام واکنش و به تبع آن دمای شعله نسبت به حالتی دیواره موجود نمی باشد افزایش می یابد.

همانطور که در شکل مشخص است، سرعت سوزش با افزایش ϕ_u ، افزایش می یابد و در یک ϕ_u ثابت با کاهش شعاع (r_u) ، سرعت سوزش افزایش می یابد و همچنین در یک نسبت اکی والان مشخص با در نظر گرفتن اثرات بازخورد حرارت مشاهده می شود که سرعت سوزش افزایش چشمگیری دارد. در شکل (۶)، مقدار درجه حرارت شعله در ناحیه واکنشی، T_f و مقدار درجه حرارت آدیباتیک شعله بر حسب تابعی از ϕ_u رسم شده است. برای مقادیر r_u داده شده، محاسبات برای مقادیری از ϕ_u که در آن T_f تقریباً برابر T_b شده است، متوقف شده است. شکل (۷) بیانگر مقایسه دمای شعله در دو حالت با در نظر گرفتن اثر بازخورد حرارت و بدون در نظر گرفتن اثر این ترم می باشد. همانطور که مشاهده می شود در یک شعاع مشخص با در نظر گرفتن ترم بازخورد حرارت دمای شعله افزایش یافته است.

۹- خلاصه و نتیجه گیری

تحلیل حدی به منظور پیش بینی ساختار و سرعت سوزش انتشار شعله در یک سیستم احتراقی با در نظر گرفتن پراکندگی یکنواخت ذرات سوخت در یک مخلوط گازی اکسیدایزر به منظور تعیین اثرات ترمودینامیکی تشعشع در اکسیداسیون چارها به کمک مدل مای توسعه داده شد. نتایج این تحلیل نشان می دهد که انتشار شعله برای مقادیر اکی والان های بر پایه سوخت گازی موجود، ϕ_u ، که اساساً بزرگتر از یک در نظر گرفته شده اند، امکان پذیر می باشد. برای شرایطی که $\phi_u \geq 1$ و $\phi_g \leq 1$ ، اکسیژن اضافی از ناحیه واکنشی به ناحیه کانوکشن نفوذ می کند. لایه داخلی سوخت هیدروکربنی توسط رادیکال های آزاد مورد حمله قرار می گیرد و عدد دامکولر مشخصه نرخ این واکنش ها عموماً بزرگتر از عدد دامکولر مشخصه نرخ واکنش های اتفاق افتاده در لایه اکسیداسیون می باشد. برای شعله ابر ذرات، جایی که عمل تبخیر شدگی در ناحیه کانوکشن اتفاق می افتد. با مقایسه بین نتایج بدون در نظر گرفتن اثر بازخورد حرارت و نتایج، با در نظر گرفتن



ترم باز خورد حرارت در مدل ارائه شده، مشاهده می‌شود که مقادیر سرعت سوزش و دمای شعله در مقایسه با حالت بدون در نظر گرفتن این ترم، افزایش یافته‌اند.

مراجع

- [1] Eckhoff, R. K., (1997). "Dust explosion in the process industries". (2nd ed.). Oxford: Butterworth Heineman
- [2] Saastamoinen, J. J., Horttanainen, M., and Sarkomaa, P. Ignition Wave Propagation and Release of Volatiles in Beds of Wood Particles. *Combustion Science and Technology*, 2001, 165, 41-60.
- [3] Ronney P.D., Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors, *Combustion and Flame*, 2003, 135, 421-439.
- [5] Calle, S., Klabá, L., Thomas, D., Perrin, L., and Dufaud, O. Influence of the size distribution and concentration on wood dust explosion: Experiments and reaction modelling. *Powder Technology*, 2005, 157, 144 – 148.
- [6] Kuo, J. T., and Hsi, C. L. Pyrolysis and ignition of single wooden spheres heated in high-temperature streams of air. *Combustion and Flame*, 2005, 142, 401-412.
- [7] Cetin, E., Moghtaderi, B., Gupta, R., and Wall, T.F. Biomass gasification kinetics: Influence of pressure and char structure. *Combustion Science and Technology*, 2005, 177, 765-791.
- [8] Mermoud, F., Salvador, S., Van de Steene, L., and Golfier, F. Influence of the pyrolysis heating I rate on the steam gasification rate of large wood char particles. *Fuel*, 2006, 85, 1473-1482.
- [9] Porteiro, J., Míguez, J. L., Granada, E., and Moran, J.C. Mathematical modelling of the combustion of a single wood particle. *Fuel Processing Technology*, 2006, 87, 169 – 175.
- [10] Bidabadi, M., Azimi, M., Rahbari, A. "Effects of radiation and particle size on the pyrolysis of biomass particles" *journal of mechanical engineering and science (IMECHE)* part C. accepted for publishing
- [11] Bidabadi, M., and Rahbari, A. Combustion modelling of the premixed flame propagation. *ASME Early Career Technical Journal*, 2008, 7 (1).
- [12] Bidabadi, M., and Rahbari, A. Modelling combustion of lycopodium particles by considering the temperature difference between the gas and the particles. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2009, 45, 49-57