

مطالعه تحلیلی اثر تبخیر ذرات سوختی بر احتراق ابر ذرات ارگانیک

حسین سخائی نیا^{۱*}، فرید عبدی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
* تهران، ۱۴۹۶۹۶۹۱۹۱، h.sakhaenia@iauctb.ac.ir

چکیده

زیست توده دارای فرآیند احتراق پیچیده ای است که شامل متغیرهای فراوانی است که به صورت مستقیم یا غیر مستقیم بر میزان انتشار آلاینده ها و راندمان احتراق تاثیر می گذارند. در این مقاله تلاش بر آن بوده است تا اثر پدیده تبخیر ذرات سوختی بر احتراق ابر ذرات ارگانیک به صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار گیرد. فرض شده است که ذرات ارگانیک بطور یکنواخت پخش شده اند و به دلیل گرادیان دمایی تحت اثر نیروی ترموفورتیک قرار می گیرند. در این کار از مدلی یک بعدی برای ارزیابی ویژگی های شعله استفاده شده است. جهت ساده سازی مدل، ساختار پیشانی شعله به سه ناحیه تقسیم شده است: ناحیه پیش گرم، ناحیه تبخیر و ناحیه شعله. نهایتاً یک روش استاندارد حدی به منظور حل معادلات حاکم به کار گرفته شده است؛ در انتها با استفاده از معادلات حاکم بر فیزیک مسئله و همچنین معادلات بقا، مشخصه های احتراقی مربوطه حاصل شده است و نتایج حاصل از این مدل سازی با داده های تجربی منتشر شده نیز مقایسه و توافق خوبی میان آنها بدست آمده است.

کلیدواژگان

زیست توده، لایکوپدیم، ابر ذرات ارگانیک، ساختار شعله، احتراق

Analytical study of the effects of evaporation of fuel particles on a particle cloud

Hossein Sakhaenia^{1*}, Farid Abdi²

1- Department of Chemical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- B.Sc Student, Department of Chemical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
*P.O.B. 1496969191 Tehran, Iran,

Abstract

Biomass has a complex combustion process which comprises of many variables which directly and indirectly influence the amount of efficiency of pollutants emissions. In this article an attempt has been made to study the caused by the evaporation of the fuel particles on cloud organic particles. It is assumed that cloud organic particles have been evenly distributed and because of some gradients are influenced by the force of thermofortic. For this study a model of a bottle for the assessment of the characteristic of the flame has been used. In order to simplify the model, the frontal structure of the flame has been divided into three areas: Preheated area, Evaporation area, Flame area. Finally, a standard method in order to solve the equations has been used. Ultimately by using these equations ruling physics and also other equations and the results obtained by this model and the experimental data have been compared and good accord between them has been achieved.

Keywords:

Biomass, Lycopodium, Organic Particle Cloud, Flame Structure, Combustion

احتراق ذرات ارگانیک هم زمان شامل انتقال حرارت، انتقال جرم،

تغییر فاز، تبخیر رطوبت، پیرولیز ذرات بر اثر حرارت و واکنش شیمیایی یا احتراق گازهای حاصل از پیرولیز است. با در نظر گرفتن این فرآیندها مشخص می شود که فرآیند احتراق ذرات ارگانیک یک مسئله بسیار پیچیده است که هنوز کاملاً شناخته شده نبوده و نیازمند تحقیقات و بررسی های فراوان است [۳].

این پیچیدگی نه تنها تحقیقات آزمایشگاهی در مورد آن را بسیار مشکل ساخته، بلکه، تحقیق در این زمینه با استفاده از روش های عددی و شبیه سازی رایانه ای نیز بسیار چالش برانگیز است. تنها پس از ظهور رایانه های پر قدرت بود که پژوهشگران توانستند احتراق را با جزئیات

۱- مقدمه

بیومس مثل چوب به عنوان یک منبع مهم تامین انرژی برای آینده مطرح است و اتحادیه اروپا در حال برنامه ریزی برای افزایش این مقدار است [۱]. با توجه به میزان قابل توجه زائدات کشاورزی و چوبی در کشور بویژه مناطق روستایی، لذا تکنولوژی گازی سازی (تبدیل ترمودینامیکی بیومس به گازهای قابل احتراق) راهکار مناسبی برای تامین بخشی از انرژی مورد نیاز کشور است. ۸۰ درصد از انرژی حاصل از احتراق چوب ناشی از احتراق گازهای حاصل از چوب و ۲۰ درصد باقی مانده به خاطر سوختن زغال چوب است [۲].

کانال در نظر گرفته شد و از اثرات رابطه بین ضخامت و قطر لوله با انتشار سرعت شعله مطالعه شد و شرط خاموشی به عنوان تابعی از متغییر اتلاف حرارت بدست آورده شد. مشهود است که تاثیر اتلاف حرارت در کاهش سرعت سوزش از تاثیر تشعشع در افزایش سرعت سوزش بیشتر است که خود بیان کننده اهمیت در نظر گرفتن اتلاف حرارت به عنوان یک عامل منفی است [۹].

دیزجی و بیدآبادی به بررسی نقش اندازه ذرات ارگانیک بر پدیده احتراق پرداخته و به این نتیجه رسیدند که برای ذرات با اندازه کوچکتر فرآیند احتراق کنترل کننده اصلی بوده و پس از آن پیرولیز ذرات کنترل کننده است در حالی که برای ذرات با اندازه بزرگ، پیرولیز ذرات کنترل کننده است [۳].

همچنین بررسی اثر گرانش بر شعله های ابر ذرات لایکوپدیم به صورت تئوری و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است، برخی از مطالعات بر روی خواص انتشار شعله ذرات در یک مجرای عمودی به منظور تبیین سرعت شعله آرام، ضخامت شعله، فاصله خاموشی و شتاب ذرات صورت گرفته است. این رفتار با استفاده از دوربین های سرعت بالا مشاهده شده است و این تحقیق بیانگر این نکته است که انتشار پیشانی شعله به صورت ناپیوسته و هموار می باشد [۷].

۲- مدل تحلیلی برای احتراق ابر ذرات

مدلسازی احتراق ذرات ارگانیک نیازمند بررسی معادلات بقایی است که شامل بقای انرژی، بقای سوخت گازی و در نهایت بقای ذرات می باشد [۳]. در این مقاله، مطالعه تحلیلی در چارچوب یک مدل نفوذی حرارتی و با به کار بردن قانون فوریه و فیک برای نفوذ حرارت و جرم، معادلات حاکم بر سیستم احتراق ابرذرات ارگانیک نوشته شده است. سپس ساختار پیشانی شعله به سه ناحیه تقسیم شده است که شامل ناحیه پیش گرم، ناحیه تبخیر و ناحیه واکنش است. در ناحیه پیش گرم و ناحیه تبخیر، از نرخ واکنش صرف نظر شده است. در ناحیه سوم که ناحیه حدی واکنش است ترم جابجایی و ترم تبخیر ذرات سوخت دارای مقدار بسیار کوچکی می باشند. برای تحلیل متغییرهای ساختار شعله، در هرکدام از این نواحی شرایط مرزی و سازگاری مناسب اعمال شده است. آنالیز در حالت حدی صورت گرفته و برای نسبت اکی والان و شعاع متفاوت ذرات، نتایج برای کسر جزئی سوخت در فاز جامد ارائه و صحت نتایج با منابع موجود برآورد شده است. هم چنین به منظور ساده سازی روابط در فرضیات اولیه از اثرات متقابل ذرات بر یکدیگر و حرکات برونین صرف نظر شده است.

۳- معادلات تحلیلی و حل آنها

در احتراق ذرات اگر نرخ تبدیل پایین تر از نرخ واکنش باشد، احتراق با روند کندتری محدود می شود که عامل کنترل کننده آن نرخ تبخیر ذرات می باشد. همچنین از گرمای مورد نیاز برای تبخیر مواد فرار ذرات نیز صرف نظر شده است. زیرا این مقدار در مقایسه با سایر ترم ها بسیار ناچیز است. در ضمن در این تحقیق فرض شده است که مقاومت داخلی ذره در مقابل مقاومت خارجی آن ناچیز باشد. یعنی عدد بایوت ذره صفر

قابل قبول به صورت عددی مدلسازی کنند. روش ها و الگوریتم های عددی متعددی برای غلبه بر پیچیدگی های شبیه سازی این پدیده ابداع شده است [۴].

سشاردی و همکاران در سال ۱۹۹۲ ساختار شعله آرام، یک بعدی و پایا برای ابر پیش مخلوط ذرات که حاوی مواد فرار است و در بستری از اکسید کننده هوا محترق می شود را مورد بررسی قرار دادند. مواد فرار ابتدا از ذرات جامد جدا شده و در فاز گازی به صورت گاز متان وارد واکنش شدند. ساختار شعله در این مدل به سه قسمت تقسیم شد: ناحیه پیش گرم، ناحیه واکنش و ناحیه پس از شعله. در نهایت پارامترهای مهم شعله نظیر سرعت سوزش و دمای احتراق در این مطالعه تعیین گردید. در این کار برای راحتی حل، در مدل تحلیلی ارائه شده، عدد لوئیس واحد در نظر گرفته شد و نتایج برای یک عدد زلدوویچ بالا ارائه گردید [۵]. نکته قابل توجه این است که سرعت سوزش محاسبه شده توسط سشاردی و همکارانش نسبت به داده های آزمایشگاهی محاسبه شده توسط میسن و ویلسون مقدار پایین تری دارند. مدل تحلیلی ارائه شده توسط سشاردی و همکارانش برای ابر ذرات لایکوپدیم را می توان اولین مدل تحلیلی معرفی شده دانست [۶]. میسن در سال ۱۹۶۷ به بررسی اثر غلظت ذرات لایکوپدیم بر سرعت سوزش پرداخت [۷].

یکی از خواص ذرات لایکوپدیم خاصیت تک سایزی بودن آن است. از اینرو از آن به عنوان ذره مرجع در احتراق ذرات ارگانیک استفاده می شود. خاصیت بعدی این ماده، تخلخل بالای آن است که باعث می شود گاز تولیدی در مرحله پیرولیز حداکثر بوده و خاصیت اشتعال پذیری بالایی را برای ذره فراهم کند [۸]. انفجار ذرات عامل اصلی انتشار شعله از میان ابر ذرات داخل هوا می باشد که سبب می شود ذرات به ذرات کوچکتر با خاصیت اشتعال پذیری بالا تقسیم شوند [۷].

همچنین بیدآبادی و رهبری مدلی را بر پایه اختلاف دما بین ذرات ارگانیک و گاز ارائه کرده اند، علاوه بر این بیدآبادی و همکاران توزیع سرعت و تراکم ذرات هنگام انتشار شعله در میان ابر میکرو ذرات آهن را نیز به صورت تحلیلی مطالعه کردند، آنها با در نظر گرفتن معادله لاگرانژ در دینامیک میکرو ذرات آهن هنگام پیشروی شعله بالا رونده در یک کانال و سپس با اعمال نیروهای متعدد وارده بر ذره، از جمله نیروی ترموفوروتیک، که به دلیل گرادیان دمای حاصل از احتراق است و نیروی وزن و شناوری و توزیع سرعت ذره نسبت به فاصله از جبهه شعله را تعیین کردند. بیدآبادی و جبرئیلی در یک کار تحلیلی دیگر و با استفاده از یک مدل ریاضی اثرات اتلاف حرارت داخلی را روی سرعت شعله و پروفیل دما در احتراق ذرات آلومینیوم به صورت تحلیلی بررسی کردند. اتلاف حرارت به محیط موضوعی است که در بسیاری از تجهیزات احتراقی نقش بسیار مهمی را در خاموشی شعله، محدودیت های اشتعال پذیری و سرعت سوزش ایفا می کند [۹].

نقش ضخامت لوله روی خاموشی در انتشار شعله پیش مخلوط موضوعی بود که بایوز و همکارانش با یک مدل نفوذی حرارتی به صورت عددی مطالعه کردند. در این کار اتلاف حرارت هدایتی به دیواره های

H تابع هویساید، τ_{vap} بیانگر زمان مشخصه تبخیر ذرات جامد و در نهایت T_v دمایی که تبخیر شدن از آن آغاز می‌گردد. n_u ، n_s ، m_0 به ترتیب بیانگر جرم واحد ذره، تعداد متوسط ذرات بر واحد حجم و تعداد متوسط ذرات بر واحد حجم در ناحیه سوخته نشده می‌باشند. شعاع ذره را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$r_p = \sqrt[3]{\frac{n_u m_0 Y_s^2}{\rho_p \psi}} r_u \quad (8)$$

معادله بقای انرژی:

$$\rho v C \frac{dT}{dx} = \lambda_u \frac{d^2T}{dx^2} + \rho_u Q \dot{\omega}_{chem} - \rho_u Q_v \dot{\omega}_{vap} \quad (9)$$

برای حل معادلات فوق در نواحی مختلف احتراقی اولین کار بی بعد سازی معادلات بقا است [۳].

۴- بی بعد سازی معادلات بقا

در مرحله بی بعد سازی معادلات فوق یک سری عدد بدون بعد حاصل می‌گردد که این اعداد بدون بعد نشان دهنده ی خصوصیات فرآیندهای موجود در احتراقی ذرات ارگانیک هستند [۳].

متغیرهای بی بعد زمان-مکان، رابطه بقای مومنتوم و کسرهای جرمی ذره جامد و گاز به صورت زیر بی بعد می‌شوند:

$$Z = \frac{\rho_u v_v C}{\lambda_u} x \quad (10)$$

$$\theta_v = \frac{T_v - T_u}{T_f - T_u} \quad (11)$$

$$m = \frac{\rho v}{\rho_u v_v} \quad (12)$$

$$y_s = \frac{Y_s}{Y_{FC}} \quad (13)$$

$$q = \frac{Q_v}{Q} \quad (14)$$

Y_{FC} به گونه ای انتخاب شده است تا رابطه زیر برقرار باشد:

$$Y_{FC} Q = C(T_f - T_u) \quad (15)$$

با وارد کردن این پارامترهای بی بعد در معادلات بقا روابط ما به صورت زیر در می‌آیند:

$$\frac{dy_s}{dz} = -\frac{y_s}{Da} H(\theta - \theta_v) \quad (16)$$

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{d^2\theta}{dz^2} - \frac{q}{Da} y_s H(\theta - \theta_v) \quad (17)$$

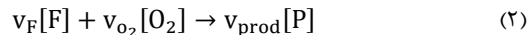
همچنین داریم:

$$D_{th} = \frac{\rho_u v_v C}{\lambda_u} \quad (18)$$

در نظر گرفته شده است. همچنین در این تحقیق از اختلاف دمای گاز و ذره صرف نظر شده است. یعنی فرض بر آن بوده که ذره با گاز اطراف آن هم دما است. در این آنالیز فرض شده است که ذرات سوخت تبخیر می‌شوند و به فرم یک ترکیب گازی شناخته شده درمی‌آیند و سپس اکسید می‌شوند. هم چنین از واکنش های سطحی و اثر تشعشع نیز صرف نظر شده است. در این مطالعه عدد دامکوهلر نسبت زمان مشخصه تبخیر کامل ذرات سوختی، τ_{vap} ، به زمان مشخصه انتقال ذرات در ناحیه پیش گرم، τ_p ، می‌باشد و به عنوان پارامتر اساسی در نظر گرفته شده است.

$$Da = \frac{\tau_{vap}}{\tau_p} \quad (1)$$

با در نظر گرفتن عدد نادسن کوچک، می‌توان نشان داد که معادله بولتزمن به معادله نویراستوکس در مکانیزم جریان سیال پیوسته کاهش می‌یابد. سیستم مورد مطالعه شامل دو جزء می‌شود: هوا و سوخت گازی ناشی از تبخیر ذرات ریز جامد فرار. گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و وزن مولکولی مخلوط گاز و ذرات سوختی ثابت فرض می‌شود. برای این ساده سازی فرض شده است که دمای ذرات تقریباً با دمای گاز برابر است و سینتیک شیمیایی به یک واکنش گرماده کلی تک مرحله ای کاسته می‌شود که با قانون آرنیوس بیان می‌گردد.



که v_F ، v_{O_2} و v_{prod} به ترتیب ضرایب استوکیومتری سوخت، اکساینده و محصولات می‌باشد. همچنین $[F]$ ، $[O_2]$ و $[P]$ به ترتیب معرف اجزای سوخت، اکساینده و محصولات است.

در این تحقیق کسر حجمی ذرات به صورت زیر تعریف شده است:

$$\psi = \frac{V_p}{V} \quad (3)$$

معادله بقای جرم نیز بشکل زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial(\rho_p U_{rel} \psi)}{\partial x} = \dot{\omega}_{vap} \quad (4)$$

در معادله بقای ذرات ریز جامد

$$\rho v \frac{dY_s}{dx} = -\rho_u \dot{\omega}_{vap} \quad (5)$$

Y_s کسر جرمی ذرات ریز جامد، v سرعت سوزش مخلوط گاز و ذرات سوختی و ρ چگالی مخلوط گاز و ذرات سوختی می‌باشد. نرخ تبخیر ذرات ریز، به صورت زیر توصیف می‌شود.

$$\dot{\omega}_{vap} = \frac{Y_s}{\tau_{vap}} H(T - T_v) \quad (6)$$

$$Y_s = \frac{m_p}{m_0} = \frac{r_p^3 n_s}{r_u^3 n_u} \quad (7)$$

$$\theta_{\text{vaporization}} = C_1 \exp[z] + C_2 + \frac{q\bar{Y}_s}{\left(\frac{1}{Da} + 1\right)} \exp\left(-\frac{z}{Da}\right) \quad (25)$$

که مقادیر ثابت C_1 و C_2 با در نظر گرفتن شرایط مرزی موجود به صورت زیر حاصل می شوند:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{\theta_v - 1}{\exp(z_v) - 1} \\ &- \frac{q\bar{Y}_s \exp\left(-\frac{z_v}{Da}\right) - 1}{\left(\frac{1}{Da} + 1\right) \exp(z_v) - 1} \\ C_2 &= 1 - \frac{\theta_v - 1}{\exp(z_v) - 1} \\ &+ \frac{q\bar{Y}_s \exp\left(-\frac{z_v}{Da}\right) - \exp(z_v)}{\left(\frac{1}{Da} + 1\right) \exp(\Pi z_v) - 1} \end{aligned} \quad (26) \quad (27)$$

۶- دینامیک ذرات

با در نظر گرفتن دو متغیر بی بعد، که در پدیده احتراقی مورد مطالعه بیشترین تاثیر را دارند، می توان به یک معیار طولی نسبی (L_t) دست یافت. این طول مشخصه در واقع فاصله ای مشخص از شعله است بگونه ای که برای مقادیر بیش از این فاصله اثر نیروی ترموفورتیک قابل چشم پوشی باشد. این طول مشخصه را می توان از معادله زیر استنتاج نمود:

$$L_t = \left(\frac{\rho_p}{m_0 n_u}\right)^{0.1} \left(\frac{\rho_g V_f C}{kg} D\right)^{0.2} x_v \quad (28)$$

قابل ذکر است که توان های مربوط به ترمهای بی بعد شده از مرجع تجربی منتشر شده توسط هان بدست آمده است [۱۰، ۱۱]. برای بررسی دقیق تر دینامیک حرکت ذره، ناحیه پیش گرم به دو فصل مجزا مفروض شده است، که به ترتیب در محدوده $-\infty < x < L_t$ و $L_t < x < x_v$ قرار دارند.

1- ناحیه $-\infty < x < L_t$

در این محدوده فرض شده است که در فاصله مشخصی از پیشانی شعله L_t می توان از اثر نیروی ترموفورتیک صرف نظر کرد. همچنین مقدار کسر حجمی ذره ثابت بوده و به صورت معادله زیر قابل محاسبه می باشد:

$$\bar{\psi} = \frac{n_u m_0}{\rho_p} \quad (29)$$

$$\theta_v = \frac{T_v - T_u}{T_f - T_u} \quad (19)$$

با توجه به ناچیز گرفتن اثر گرمای نهان تبخیر می توان مقدار m را برابر با یک ($m = 1$) فرض کرد.

۵- حل معادلات بی بعد شده در حالت پایا

بررسی احتراق ذرات ارگانیک نیازمند بررسی فرآیندهای مختلفی است که این پدیده را منجر می شوند [۳].

در ادامه برای حل معادلات بقای بی بعد و تحلیل ساختار شعله، شعله را به سه ناحیه اصلی تقسیم می کنیم که عبارتند از:

۱- ناحیه پیش گرم $\{Z | -\infty < Z < Z_{\text{vap}}\}$: که در این ناحیه ذرات برای سوختن آماده می شوند.

۲- ناحیه گازی شدن ذرات جامد $\{Z | Z_{\text{vap}} < Z < 0^-\}$ که در آن ذرات جامد بخار شده و به گاز آماده سوخت تبدیل می شود. به کل فرآیندی که در این ناحیه رخ می دهد پایرولایز می گویند.

۳- ناحیه واکنش $\{Z | 0^+ < Z < 0^+\}$: در این ناحیه ذرات تبخیر شده سوخت، می سوزند، شعله در این ناحیه تشکیل می شود.

برای حل معادلات بقا در مرز مشترک این ناحیه ها از شرایط مرزی استفاده می شود، که در زیر این شرایط مرزی آورده شده است:

کران بالا ناحیه پیش گرمایش:

$$Z \rightarrow -\infty \Rightarrow y_s = \alpha, \theta = 0 \quad (20)$$

مرز ناحیه تبخیر و ناحیه پیش گرمایش:

$$\begin{aligned} Z \rightarrow Z_{\text{vap}} \Rightarrow y_s = \alpha, \theta = \theta_{\text{vap}} \\ y_s|_{Z_v^-} = y_s|_{Z_v^+} \end{aligned} \quad (21)$$

مرز ناحیه تبخیر و ناحیه واکنش:

$$Z \rightarrow 0^- \Rightarrow Y_s = \bar{Y}_s, \theta = 1 \quad (22)$$

بنابراین حل پایدار معادلات بی بعد حاکم بر ساختار شعله ابر ذرات، با انتگرال گیری ناحیه به ناحیه و اعمال شرایط مرزی و سازگاری مطابق زیر بدست می آید.

بعد از حل برای ناحیه اول داریم:

$$\theta_{\text{preheat}} = \theta_v \exp(z - z_v) \quad (23)$$

$$y_s = \alpha \quad (24)$$

برای ناحیه تبخیر داریم:

مراجع	مقدار	پارامتر
هان [۱۰،۱۱]	16 μm	r_p
سشادری [۵]	850 K	T_{vap}
سشادری [۵]	0.11	Da

در ادامه تغییرات سرعت ذره در روبروی پیشانی شعله در شکل (۱) و (۲) نشان داده شده است. سرعت ذره در ناحیه دوری از لبه شعله دارای سرعتی ثابت و رو به پایین است. با نزدیک شدن به شعله و افزایش گرادیان دمایی، نیروی ترموفورتیک نیروی غالب گشته و سرعت رو به پایین ذره کاهش می یابد و منجر به آن می شود که سرعت ذره در ناحیه ای خاص صفر شود. در این نقطه جهت حرکت ذره عکس شده و بدلیل گرادیان دمایی بیشتر، ذره رو به بالا شتاب می گیرد. با نزدیک تر شدن ذره و شعله، از دست رفتن جرم به دلیل تبخیر باعث کاهش شدت شتاب رو به بالا می شود. از دیدگاه نیرویی می توان علت این امر را به نیروی تراست بر واحد جرم نسبت داد که نتیجه مستقیم تبخیر و جریان جرمی خروجی از ذره است. این نیرو را در اولین ترم دست راست معادله (۳۳) می توان یافت.

$$f(x) = \bar{\Psi}(U_t - v_v) - v_v \frac{\bar{Y}_s}{\rho_p} \left\langle \exp \left[-\frac{1}{Da} D_{th} x \right] - \exp \left[-\frac{1}{Da} D_{th} x_v \right] \right\rangle \quad (33)$$

تغییرات کسر حجمی ذره نرمالایز شده در شکل (۳) و (۴) نشان داده شده است. ابتدا کسر حجمی ذره، در حین حرکت ذره به سمت شعله، افزایش می یابد تا کاهش سرعت نسبی در این ناحیه، $(U_p + v_v)$ ، را جبران کند و معادله (۳۴) ارضا شود.

$$U_{rel} \Psi = \bar{\Psi}(U_t - v_v) \quad (34)$$

در $x = x_0$ ، جایی که ذرات ساکن شده و تجمع می کنند؛ بنابراین، کسر حجمی به مقدار ماکزیمم خود می رسد. با توجه به همین معادله، پس از آن همزمان با توسعه حرکت ذره به سمت بالا و افزایش سرعت نسبی در این منطقه، مقدار کسر حجمی ذره تا رسیدن به مرز ناحیه تبخیر افت می کند. همانگونه که در تصاویر فوق نیز مشاهده می شود تطابق مناسبی بین نتایج کار و مشاهده تجربی هان و همکارانش [۱۰،۱۱] وجود دارد.

۲- ناحیه $L_t < x < x_v$

در این محدوده فرض شده است که نیروی ترموفورتیک، بالانس موجود را بر هم میزنند و خود نیروی غالب می شود. و در انتها کسر حجمی ذره را می توان به صورت زیر بدست آورد:

$$\psi = \frac{(U_t - v_v)}{(U_p - v_v)} \bar{\Psi} \quad (30)$$

3- ناحیه $x_v < x < 0$

معادله نیوتن حرکت ذره در، ناحیه تبخیر، بصورت زیر می باشد:

$$U_p \frac{d(m_p U_p)}{dx_p} = -24\pi\mu^2 r_p \frac{k_g}{k_p + 2k_g} \frac{\nabla T}{\rho_g T_{ave}} \quad (31)$$

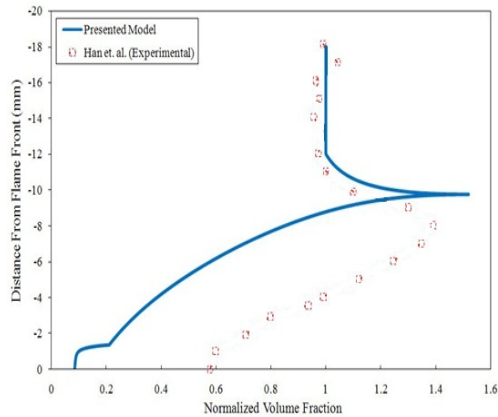
که در آن m_p و r_p به ترتیب جرم و شعاع ذره در ناحیه تبخیر می باشند. و در انتها، می توان کسر حجمی ذره یا چگالی تعداد ذره را در این ناحیه بدست آورد.

$$\psi = \frac{\bar{\Psi}(U_t - v_v) - \frac{v_v \bar{Y}_s}{\rho_p} \left\{ \exp \left[-\frac{z}{Da} \right] - \exp \left[-\frac{z_v}{Da} \right] \right\}}{U_p - v_v} \quad (32)$$

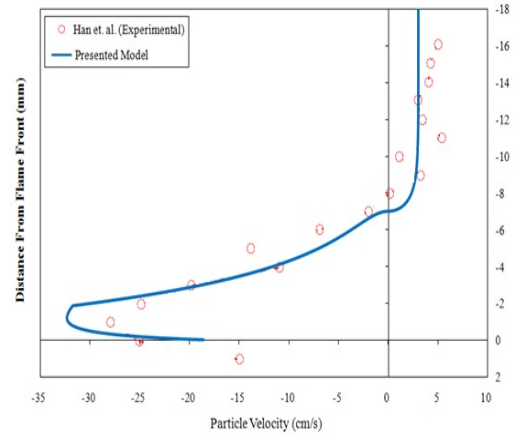
۷- اعتبارسنجی

به منظور مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی به برخی از داده های اولیه نیاز داریم. این پارامترها عبارتند از: شعاع ذره r_p ، دمای آغاز تبخیر ذرات T_{vap} ، عدد دامکوهلر Da ، عدد لوییس Le ، عدد دامکوهلر تبخیر مواد فرار Da_{vap} . این پارامترها با استفاده از کارهای محققین قبلی که در این زمینه کار کرده اند، به دست آمده است [۵]. دمای آغاز تبخیر مواد فرار هم از تحلیل DTG نمودار TG ذره لایکوپودیوم که هان [۱۰،۱۱] ارائه داده است، بدست آورده شده است. در جدول ۱ مقادیر این پارامترها قابل مشاهده است:

جدول ۱ خواص ذره لایکوپودیوم



شکل ۴ کسر حجمی ذره بر حسب فاصله از لبه شعله برای ۴۷ گرم بر سانتیمتر مکعب [۱۰،۱۱]



شکل ۱ سرعت ذره بعنوان تابعی از فاصله از لبه شعله برای ۴۷ گرم بر سانتیمتر مکعب [۱۰،۱۱]

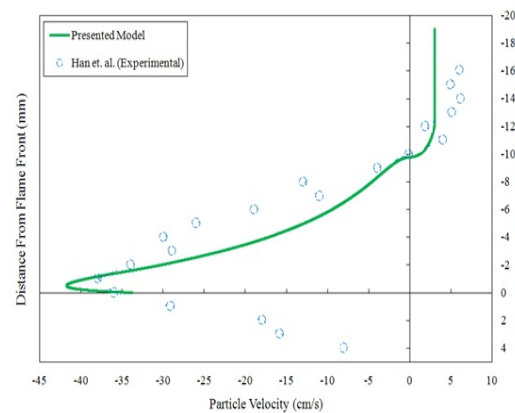
۸- نتیجه گیری

با افزایش نیازهای بشر به انرژی و نیز روند رو به کاهش منابع انرژی فسیلی و هسته‌ای، تحقیق درباره منابع تجدیدپذیر و پاک انرژی، اجتناب ناپذیر است. منابع سوخت حاصل از زیست‌توده به دلیل ارزانی، فراوانی و نیز آلاینده‌گی بسیار پایین جایگزین بسیار مناسبی برای منابع فسیلی و هسته‌ای است. در مطالعه حاضر فرآیند احتراقی زیست‌توده تحت اثر نیروی ترموفورتیک مورد بررسی قرار گرفته و رفتار ابر ذرات زیست‌توده در قبال آن تحلیل گردید.

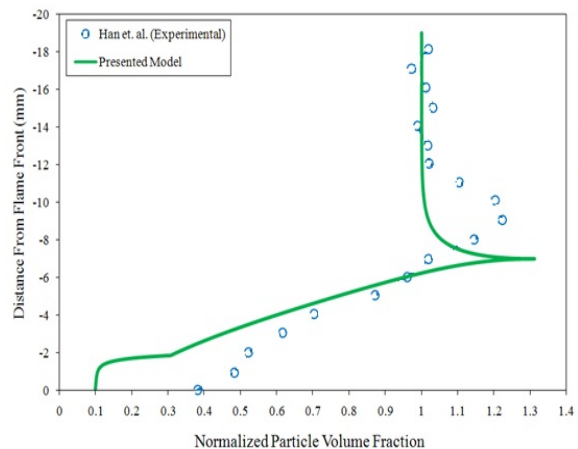
بر اساس تحقیق انجام شده بر روی رفتار احتراقی ابر ذرات زیست‌توده، با لحاظ نمودن پدیده ترموفورتیک، مدلی برای توصیف دینامیک حرکت ذرات سوختی ارگانیک و کسر حجمی ذرات ارائه شد و با استفاده از این مدل، رفتار ابر ذرات لایکوپدیوم به عنوان نمونه مورد بررسی و تحلیل گردید.

در این بخش خلاصه‌ای از تمام یافته‌ها و دست آورد های این تحقیق مطابق زیر ارائه می‌گردد:

- نیروی ترموفورتیک اثر مستقیمی بر تجمع ذرات در ناحیه پیش گرم و متوقف کردن آنها داشته و متعاقباً کاهش سرعت سوخت خواهد شد.
- نیروی تراست که به واسطه خروج گاز از ذرات سوختی ایجاد می‌شود در ناحیه تبخیر غالب بوده و در برابر نیروی ترموفورتیک مقاومت می‌کند.
- اثر نیروی ترموفورتیک شدیداً به شعاع ذره وابسته بوده و با کاهش شعاع ذره در ناحیه تبخیر از شدت آن کاسته می‌شود.
- مشاهده شد که شعاع اولیه ذره سوختی بر فاصله نقطه سکون از لبه شعله موثر می‌باشد؛ به نحوی که برای ذرات بزرگتر این فاصله کاهش می‌یابد و ذرات در ناحیه نزدیکتری به شعله تجمع می‌کند.



شکل ۲ سرعت ذره بعنوان تابعی از فاصله از لبه شعله برای ۱۲۲ گرم بر سانتیمتر مکعب [۱۰،۱۱]



شکل ۳ کسر حجمی ذره بر حسب فاصله از لبه شعله برای ۴۷ گرم بر سانتیمتر مکعب [۱۰،۱۱]

- همچنین نتایج حاصله از این مدلسازی با داده‌های تجربی منتشر شده نیز مقایسه شد و توافق خوبی میان آنها بدست آمد.

۹- مراجع

- [1] M. Bidabadi, A. V. Azad, *Combustion of Organic Particles*, Arna Publication, first edition, pp. 7-14, 2015. (In Persian)
- [2] M. J. Sigaroudi, B. B. Dashti, A. Shabanikia, The study of producing energy from wood waste by the use of the technology of producing cold gas, *First Conference of Bioenergy*, Kashan, Iran, 2010. (In Persian)
- [3] M. B. Dizaji, M. Bidabadi, Study of the role of the amount lycopodium organic particles on the number of combustion, *Third conference of bioenergy, Kashan, Iran, 2012*, (In Persian)
- [4] M. Ashna, M. H. Rahimian, Developing Lattice Boltzmann method for simulation of reduced combustion mechanisms in laminar methane jet diffusion flames, *Modares Mechanical Engineering*, Vol 16.No 1, 2016, (In Persian)
- [5] K. Seshadri, A. L. Berlad, V. Tangirala, The structure of premixed particle cloud flames, *Combustion and Flame*, Vol 89, pp 333-342, 1992.
- [6] M. Bidabadi, A. Esmailnejad, Modeling of the Combustion of Cloud Particles of Premixed in the Flow of Flames, *5th Conference of Fuel and Combustion, Kashan, Iran, 2013*. (In Persian)
- [7] M. Bidabadi, A. Rahbari, Analytical Modeling of Combustion of Lycopodium Particles Considering the difference between the temperature of gas and Particle, *Quarterly Scientific and Profession Magazine of Mechanical Engineering*, First year, 4th Issue, Summer, 2008. (In Persian)
- [8] H. B. Dizaji, M. Bidabadi, Analytical Study of the Different Processes on the Pyrolysis of cloud organics, *Science and Research Publication of Fuel and Combustion*. 6th year, Second Edition Fall and Winter .2013. (In Persian)
- [9] M. Bidabadi, F. Ebrahiminasab, Heat dissipation effect on the burning rate of organic cloud distribution, *Scientific and Research Publications*, 6th year, Second Edition, Fall and Winter, 2013, (In Persian)
- [10] D. Han, M. Yashima, T. Matsuda, H. Natsui, A. Miyake, T. Ogawa, A study of flame propagation mechanisms in lycopodium dust clouds based on dust particles behavior, *Jornal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol 14, pp 153-160, 2001.
- [11] D. Han, M. Yashima, T. Matsuda, H. Natsui, A. Miyake, T. Ogawa, Behavior of flames propagating through lycopodium dust clouds in a vertical dust, *Jornal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol 13, pp 449-457, 2000
- [12] M. Bidabadi, F. Ebrahiminasab, Influence of Heat Loss on the Burning Velocity of Flame Propagation through Organic Dust Particles, *Fuel and Combustion Journal*, Volume 6, Number 2. 2013. (In Persian)