

حل تحلیلی و بررسی رفتار شعله در احتراق پیش مخلوط جریان متقابل میکروذرات آلومینیوم

مجید سبزوپوشانی^{۱*}، یسنا پورمحمد^۲

۱- دانشیار، ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه کاشان، کاشان

(تاریخ وصول: ۹۶/۵/۲۸، تاریخ پذیرش: ۹۶/۷/۲۳)

چکیده

امروزه پودر آلومینیوم به صورت گسترده در پیشرانهای سوخت جامد، مواد منفجره و مواد آتش‌زا جهت افزایش توان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه به بررسی تحلیلی احتراق پیش مخلوط جریان متقابل ذرات آلومینیوم در مقیاس میکرو پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا معادلات بقای جرم و بقای انرژی با استفاده از تعریف نرخ کرنش، در حالت احتراق جریان متقابل ذرات بدست آمده و سپس به صورت تحلیلی حل شده‌اند. تغییرات سرعت سوزش برحسب قطر ذرات بدست آمده و با نتایج تجربی مراجع مختلف مقایسه شده و از تطابق خوبی برخوردار است که بیانگر دقت مدل حاضر می‌باشد. تغییرات مکان و ضخامت شعله و همچنین دمای احتراق برحسب نرخ کرنش برای اندازه‌های مختلف ذرات سوخت جامد ارائه گردیده است. نتایج حاضر نشان دادند که با کاهش فاصله شعله از مبدا و قطر ذرات و نیز افزایش نرخ کرنش، ضخامت شعله کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که در احتراق جریان متقابل ذرات آلومینیوم، مکان شعله با کاهش نرخ کرنش و قطر ذرات از دیوار مرکز تقارن دورتر شده، دمای احتراق افزایش یافته و شعله به نواحی با سرعت‌های بالاتر جریان منتقل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: احتراق، ذرات میکرو آلومینیوم جامد، جریان متقابل، شعله.

Analytical Solution and Investigating of the Characteristics of Flame in the Premixed Counterflow Combustion of Micro Aluminum Particles

M. Sabzpooshani^{*}, Y. Pourmohammad

University of Kashan, Kashan

(Received: 8/19/2017, Accepted: 10/15/2017)

Abstract

Today, aluminum powder is a widely used in solid propellants, explosives, and pyrotechnics to increase its power. In this study, an analytical investigation of counterflow premixed flame of micro aluminum particles carried out. For this purpose, continuity and energy conservative equations obtained by using of the definition of strain rate for counterflow combustion of metal particles and then analytically solved. Variation of burning rate via particles diameter is obtained and compared with the experimental results of the others references which showed good accurate. Variations of the flame location, flame thickness and combustion temperature with strain rate for deferent particles diameters are presented. Current results showed that with decreasing flame distance from origin and particles diameters and also increasing of strain rate, the flame thickness is decreased. Also it is found that in the counterflow combustion of aluminum particles, the flame location with decreasing the strain rate and the particles diameters moves away from the symmetry wall, combustion temperature increases and location of flame transfers to the higher velocity field of flow.

Keyword: Combustion, Micro Aluminum Solid Particles, Counterflow, Flame.

۱- مقدمه

توزیع آنها فرآیند احتراق سوخت را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. در سوخت‌هایی که سرعت سوزش از اهمیت بالایی برخوردار است سعی می‌شود که اندازه ذرات اجزا تا حد امکان (با توجه به خصوص مکانیکی و فرآیندی سوخت) ریزتر انتخاب گردند. ذرات آلومینیوم در اندازه میکرو یکی از فلزات پرکاربرد در زمینه سوخت فلزی می‌باشند.

مدلهای احتراقی آلومینیوم از حدود دهه ۱۹۶۰ میلادی گسترش یافتند. برژستوسکی و گلسمن [۱] از نخستین کسانی بودند که احتراق آلومینیوم در فاز بخار را مطرح نمودند. آنها بیان نمودند که اگر دمای جوشش فلز کمتر از دمای جوشش اکسید آن باشد، فلز بایستی در فاز گازی بسوزد. مدل آنها شامل بسیاری از مفروضاتی است که در احتراق قطرات هیدروکربنی بکار برده می‌شد. لوو [۲] برای نخستین بار برخی از اثرات اکسید بر روی بر احتراق ذرات آلومینیوم را در مدلی ارائه داد. مدل تحلیلی لوو توسط ترنز، بروکز و باتیا با اضافه نمودن فرضیاتی به مدل لوو تکمیل گردید [۳-۵]. بسیاری از مدل‌های اخیر بر روی محاسبه زمان سوزش و دمای شعله تمرکز دارند و قادر به پیش بینی توزیع مقادیر فیزیکی و فرآیندهایی مانند چگالش و رسوب نمی‌باشند. گرمیچکین و همکارانش [۶ و ۷] مدلی را برای احتراق ذرات آلومینیوم توسعه دادند که شامل نفوذ اکسید کننده به سطح ذرات و واکنش ناهمگن در آنجا بود. فرآیند احتراق ذرات آلومینیوم به شکستن لایه محافظ اکسید آلومینیوم که اطراف ذره را می‌پوشاند بستگی دارد. این لایه مانع از تماس اکسید کننده با لایه زیرین خود می‌گردد و در نتیجه مانع از سوختن آن می‌شود. وقتی که دمای ذره افزایش پیدا می‌کند و در حدود دمای ذوب اکسید (تا حدود 2300 K) این لایه ضعیف شده و در نتیجه می‌شکند. بنابراین امکان احتراق آلومینیوم درون آن در حالت گازی فراهم می‌شود. اگرچه ذرات فلزی می‌توانند به شکل‌های مختلف (کروی، کره متخلخل یا ناهموار) باشند، اما در اکثر محاسبات این ذرات به شکل کروی فرض می‌شوند.

شروع موفقیت آمیز پرتاب یک راکت نیازمند نیروی رانش پایا از سوی موتور همراه با کمترین سطح ارتعاشات و کنترل مناسب روی شعله جهت تولید قدرت است که احتراق جریان متقابل با در نظر گرفتن میزان کشیدگی شعله این ویژگی را ایجاد می‌کند. از هندسه جریان متقابل در صنایع گرمایی از جمله بویلرها، کوره‌ها و راکتورها برای تولید قدرت استفاده می‌گردد، (به جهت کاهش حجم سیستم به این دلیل که جریان کشیده شده و شعله‌ها در لایه مخلوط حرارتی شکل می‌گیرند). از آنجایی که در بسیاری از کاربردهای عملی میدان جریان به طرز محسوسی دارای کشیدگی و کرنش می‌باشد، به منظور پیش-بینی واقع بینانه‌تر رفتار شعله تحت این شرایط، پیکربندی جریان متقابل در این موارد مناسب می‌باشد. در طول چند دهه گذشته احتراق جریان متقابل به طور گسترده در مطالعات نظری، آزمایشگاهی و عددی به عنوان روشی برای تحقیق اثرات گوناگون فیزیکی همچون کشیدگی، نفوذ مطلوب، تشعشع و سینتیک شیمیایی به کار گرفته شده است [۱۰-۱۳].

در طبیعت ذرات جامد زیادی با قابلیت احتراق وجود دارند که اگر شرایط احتراق برایشان مهیا گردد و در مجاورت جرقه ای قرار بگیرند، شروع به سوختن می‌نمایند. میزان انرژی جرقه یا منبع مورد نیاز جهت فعال سازی احتراق، بستگی به طبیعت و ابعاد ذره دارد. معمولاً با کاهش اندازه این ذرات جامد، قابلیت احتراق آنها به شدت افزایش یافته و هنگامی که به شکل غبار یا پودر در معرض اکسید کننده قرار گیرند، شرایط جهت احتراق به مراتب مساعدتر شده و سریع تر محترق می‌گردند. دلیل این امر آن است که هوا یا اکسیژن راحت تر به درون توده ذرات نفوذ کرده و زمینه مناسب جهت سوختن سریع ذرات را فراهم می‌سازد. از دیدگاه ایمنی، میتوان بیان داشت که ذرات قابل احتراقی که در برخی صنایع تولید می‌شوند، بسیار خطرناک بوده و در صورت وجود منبع جرقه ای در نزدیکی آنها می‌توانند منجر به آتش سوزی یا انفجار گردند.

ذرات ریز جامد از قبیل پودرهای فلزی به منظور بهینه‌سازی احتراق در موشکها و راکت‌های سوخت جامد به کار می‌روند. از جمله این پودرهای فلزی میتوان به آلومینیوم، بور، منیزیم، بریلیم اشاره کرد. پیش‌رانه‌های سوخت جامد بسیار پرتوان هستند و پس از احتراق، معمولاً محصولات گازی با دمای بالا تولید می‌کنند. از ایرادات استفاده از ذرات جامد به عنوان سوخت می‌توان به تشکیل دود، درخشش گازهای خروجی و پراکندگی اکسید ذرات فلزی در محیط اشاره نمود. اندازه ذرات اکسید شده باقیمانده، به اندازه ذرات سوخت و فرآیند احتراق وابسته است که با انتخاب مناسب اندازه ذرات میتوان اندازه اکسید خروجی حاصل از سوختن ذرات فلزی را کنترل نمود.

افزایش سرعت سوزش از دیگر خصوصیات مطلوب پودرهای فلزی می‌باشد. پودرهای فلزی این ویژگی را از دو جهت بالا می‌برند. انتقال حرارت توسط فلزات بالا بوده و بنابراین نفوذ حرارت در ناحیه جامد سریع‌تر انجام شده و دمای سوخت‌های باقیمانده را زمان کوتاه‌تری به حد درجه احتراق می‌رساند. از طرف دیگر سوختن فلزات حرارت زیادی ایجاد نموده و در نتیجه بالا رفتن حرارت محفظه احتراق سرعت سوزش نیز افزایش می‌یابد. افزایش سرعت سوزش سوخت نیز در بسیاری از موارد بخصوص در پیشران‌ها مورد توجه است زیرا سوختی که سرعت سوزش بالاتری داشته باشد نیروی بیشتری را در واحد زمان فراهم نموده و در نتیجه سرعت حرکت را نیز افزایش خواهد داد.

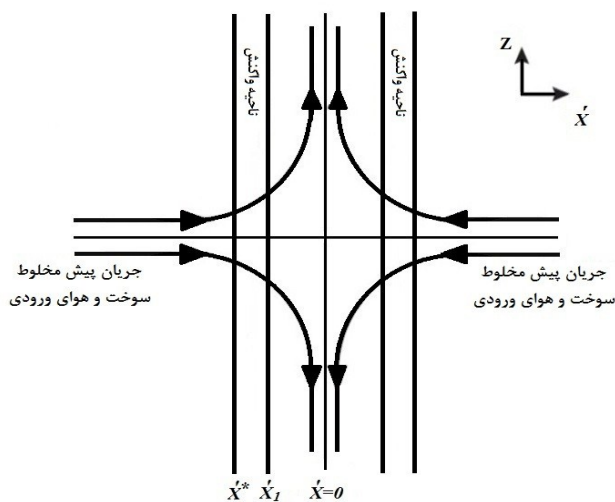
فلزات در اثر سوختن در مقایسه با دیگر سوختها گرمای بیشتری آزاد می‌کنند. یکی از دلایل برای استفاده از ذرات فلزی، چگالی انرژی بالای آنها در مقایسه با هیدروکربن‌ها است. با این حال در سیستم‌های پیشران، احتراق فلزات به طور معمول از طریق ذرات با قطر کوچک رخ می‌دهد که می‌تواند هر کدام از اندازه‌های نانو و یا میکرو باشد. اندازه ذرات پودرهای جامد در سوخت‌ها، نقش مؤثری در خواص فیزیکی، مکانیکی و احتراقی آنها دارند. علاوه بر این موارد اندازه ذرات و

(۵) بر اساس نتایج گروشین و همکاران [۱۵] زمان سوزش معلوم فرض شده است.

(۶) ذرات آلومینیم قبل از احتراق تبخیر شده و در فاز گازی با هوا واکنش می‌دهند.

(۷) جریان مخلوط سوخت و هوا به صورت آرام و رقیق فرض شده است.

برای تحلیل احتراق میکرو ذرات آلومینیم از مدل یک بعدی با تقارن محوری شعله پیش مخلوط در پیکربندی جریان متقابل (شکل ۱) استفاده شده است.



شکل ۱- پیکربندی احتراق پیش مخلوط جریان متقابل ذرات آلومینیم.

واکنش دهنده‌ها از جهت X وارد و گازهای خروجی از جهت Z خارج می‌شوند. با توجه به تقارن پیکربندی، تمامی محاسبات برای یک ناحیه (طرف منفی مختصات) انجام می‌شود. لازم به ذکر است اندیس f برای بیان کمیت در ناحیه شعله، اندیس u برای شرایط ورودی، اندیس s برای ذره آلومینیم جامد، اندیس st برای حالت استوکیومتریک و علامت * معرف نقطه شروع ناحیه شعله و اندیس ۱ پایان آن می‌باشند همچنین کمیت‌های E و R به ترتیب معرف انرژی فعالسازی و ثابت جهانی گازها می‌باشند. همانطور که اشاره شد ساختار شعله شامل سه ناحیه پیش گرم، شعله و ناحیه پس از شعله می‌باشد که در این مقاله نتایج برای ناحیه پیش گرم ارائه شده‌اند.

میدان سرعت به صورت تابعی خطی از x و از تعریف نرخ کرنش (معادله ۱) در مختصات کارتزین به دست می‌آید که در آن a نرخ کرنش می‌باشد.

$$2a = -\frac{1}{\rho} \frac{d(\rho v)}{dx} \quad (1)$$

معادله (۱) با استفاده از تعریف نرخ کرنش و ترکیب آن با معادله بقای جرم حاصل شده است. از آنجایی که میزان چگالی ذره آلومینیم در طول مسیر واکنش با توجه به متغیر بودن دمای آن، تغییر می‌یابد از رابطه (۲) برای تغییر متغیر مکانی استفاده شده است:

بیدآبادی و همکارانش [۱۷-۱۴]، در سال‌های اخیر مطالعاتی بر روی احتراق جریان متقابل ذرات ارگانیک انجام داده‌اند و با ارائه مدلی تحلیلی، تاثیر شعاع ذرات و سایر مشخصه‌ها را بر روی احتراق این ذرات محاسبه نمودند. تحقیقات صورت گرفته بیشتر برای سوخت‌های گازی و ذرات ارگانیک بوده و هنوز بسیاری از جنبه‌های احتراق جریان متقابل ذرات، خصوصاً ذرات فلزی ناشناخته مانده است. بیدآبادی و همکاران [۲۲] احتراق جریان متقابل ذرات ارگانیک با فرض نرخ کرنش ثابت و تبخیر ذرات سوخت ارگانیک را بررسی نموده و اثر مکان شعله را مطالعه نمودند. همچنین بیدآبادی و همکاران [۲۳] مدل‌سازی احتراق متقابل ابر ذرات نفوذی (ذرات سوخت از یک طرف و جریان اکسیدکننده از طرف مقابل آن) برای ذرات ارگانیک انجام داده و تغییر مکان تشکیل شعله و دمای شعله را بررسی نمودند.

ساختار شعله‌های پیش مخلوط در سیستم‌های احتراقی بسیار اهمیت دارد و در این تحلیل مخلوط واکنش‌دهنده‌ها به شکل ذرات سوخت معلق توزیع شده به صورت یکنواخت در یک مخلوط با گاز اکسیدکننده فرض شده است. در این مقاله ساختار شعله پیش مخلوط یک-بعدی میکروذرات آلومینیم در پیکربندی جریان متقابل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا معادلات حاکم استخراج، بی بعدسازی و سپس به صورت تحلیلی به حل معادلات بقای انرژی گاز و ذره پرداخته می‌شود.

۱-۱- نرخ سوزش

برای شعله ذرات پراکنده زمان واکنش شیمیایی را میتوان با توجه به زمان سوزش ذره که تابعی از قطر ذره می‌باشد، تعیین نمود. فرض می‌شود احتراق میکرو ذرات آلومینیم از قانون d^n پیروی می‌کند [۸]. روابط زیادی در این زمینه وجود دارند که هر کدام با توجه به شرایط مسئله از توانی در محدوده ۱/۵ تا ۲/۰ برای احتراق میکروذرات آلومینیم استفاده می‌کنند. بکستید [۹] با بررسی بسیاری از کارهای تجربی در زمینه احتراق ذرات آلومینیم با اندازه‌های گوناگون به این نتیجه رسید که بهترین رابطه‌ای که میتواند این داده‌ها را با یکدیگر مرتبط سازد رابطه $\tau_b = 0.003D^2$ می‌باشد که در آن قطر بر حسب μm و زمان سوزش بر حسب mSec است.

۲-۱- احتراق جریان متقابل

در شکل (۱) پیکربندی در نظر گرفته شده شامل شعله‌های صفحه‌ای دوگانه نمایش داده شده است. در حالت کلی برای احتراق مخلوط رقیق آلومینیم با هوا، سه ناحیه پیش گرم، شعله و پس از شعله تعریف می‌شود. فرضیات اساسی در انجام این تحلیل عبارتند از:

- (۱) ابر ذرات دارای توزیع یکنواخت ذرات آلومینیم است.
- (۲) سرعت ذرات برابر سرعت گاز است و مقدار آن در طول مسیر متغیر است.
- (۳) از اثرات اتلاف و تشعشع حرارتی صرف نظر شده است.
- (۴) میزان واکنش در ناحیه پیش گرم ناچیز می‌باشد.

$$\gamma = \frac{3 Le}{4 \nu} \quad (14)$$

$$Le = \frac{\alpha}{D} \quad (15)$$

پس از بی بعد سازی معادلات حاکم (۳) و (۴) با استفاده از روابط فوق این معادلات به شکل روابط (۱۶) و (۱۷) خواهند بود:

$$-2k^2 y \frac{d\theta}{dy} = \frac{d^2\theta}{dy^2} + \mu\phi k(\theta_{si} - 1) \quad (16)$$

$$-y \frac{d\theta_s}{dy} = \frac{\gamma}{k}(\theta - \theta_s) \quad (17)$$

با فرض آنکه واکنش های شیمیایی تنها در ناحیه واکنش اتفاق می افتد و در ناحیه پیش واکنش، واکنش شیمیایی رخ نمی دهد، عبارت واکنش شیمیایی از معادله انرژی گاز در ناحیه پیش گرمایش حذف می گردد و برای این ناحیه معادله (۱۶) و شرایط مرزی آن به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{d^2\theta}{dy^2} + 2k^2 y \frac{d\theta}{dy} = 0 \quad (18)$$

$$\begin{cases} \theta = \theta_s = 1 \leftarrow \text{at } y = -\infty \\ \theta = \theta_i \leftarrow \text{at } y = y^* \\ \theta_s = \theta_{si} \end{cases} \quad (19)$$

از حل معادله انرژی در ناحیه پیش گرمایش و با توجه به شرایط مرزی داده شده رابطه (۲۰) برای تغییرات دما در این ناحیه بدست می آید:

$$\theta = (\theta_i - 1) \frac{1 + \operatorname{erf}(ky)}{1 + \operatorname{erf}(ky^*)} + 1 \quad (20)$$

که با جایگذاری آن در رابطه (۱۶)، دمای میکرو ذره جامد نیز قابل محاسبه خواهد بود. در ناحیه واکنش شرایط مرزی معادلات حاکم به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \theta^+ = \theta^-, \frac{d\theta}{dy} \Big|_{y^*+} = \frac{d\theta}{dy} \Big|_{y^*-} \leftarrow y \rightarrow y^* \\ \theta^+ = \theta^-, \frac{dT}{dy} \Big|_{y_1} = 0 \leftarrow y \rightarrow y_1 \end{cases} \quad (21)$$

با استفاده از شرایط مرزی (۲۱) معادله (۱۶) در ناحیه واکنش، معادله انتقال حرارت در این ناحیه قابل حل می گردد. برای ناحیه واکنش از تغییر متغیر زیر برای کاهش مرتبه معادله (۱۶) و کمک به حل آن استفاده می شود:

$$T' = \frac{d\theta}{dy}, \frac{dT'}{dy} = \frac{d^2\theta}{dy^2} \quad (22)$$

و با قرار دادن رابطه (۲۲) در معادله (۱۶) با توجه به ثابت ماندن ترم دوم سمت راست معادله رابطه (۲۳) حاصل می شود:

$$-2\kappa^2 y T' = \frac{dT'}{dy} + \mu\phi k(\theta_{si} - 1)$$

$$\begin{cases} T'_{y^*+} = \frac{d\theta}{dy} \Big|_{y^*+} \leftarrow \text{at } y \rightarrow y^* \\ T'_{y_1} = 0 \leftarrow \text{at } y \rightarrow y_1 \end{cases} \quad (23)$$

که با حل معادله برای T' نتیجه زیر حاصل می گردد:

$$x = \int_0^{x'} \frac{\rho}{\rho_u} dx' \quad (2)$$

در نتیجه معادلات انرژی حاکم برای مخلوط گازی و نیز ذره جامد آلومینیوم به صورت روابط (۳) و (۴) می باشند.

$$-2\rho_u \alpha c \frac{dT}{dx} = \lambda_u \frac{d^2T}{dx^2} + \omega_f \frac{\rho_u Q}{\rho} \quad (3)$$

$$-\frac{2}{3} \rho_s c_s \alpha x \frac{dT_s}{dx} = \frac{\lambda}{r^2} (T - T_s) \quad (4)$$

معادله شماره (۳) مربوط به بقا انرژی گاز بوده و در آن c گرمای ویژه گاز، λ_u ضریب هدایت حرارتی، Q گرمای واکنش در واحد جرم و ω_f نرخ واکنش در ناحیه شعله می باشد که با توجه به تحقیقات هوانگ و همکارانش [۱۹]، از رابطه (۵) بدست می آید:

$$\omega_f = \frac{\sigma}{\tau_b} \quad (5)$$

این رابطه بیانگر نسبت غلظت ذرات سوخت به زمان سوزش است که با فرض کوچک بودن ناحیه واکنش از فرمول (۶) پیروی می کند:

$$\tau_b = \frac{r^2 \rho_s}{2D \sigma_{st}} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، τ معرف شعاع ذره سوخت و D ، ضریب دیفیوژن جرمی می باشد.

قابل ذکر است که معادله شماره (۴) مربوط به بقای انرژی ذره در احتراق جریان متقابل می باشد که این معادله نشان دهنده مقدار تغییرات انرژی داخلی ذره در اثر انتقال حرارت جابجایی با محیط اطراف خود است.

۲- بی بعد سازی و حل معادلات حاکم

با استفاده از روابطی که در ادامه داده می شود، معادلات حاکم را می توان بی بعدسازی نمود:

$$\theta = \frac{T}{T_u} \quad (7)$$

$$\theta_s = \frac{T_s}{T_u} \quad (8)$$

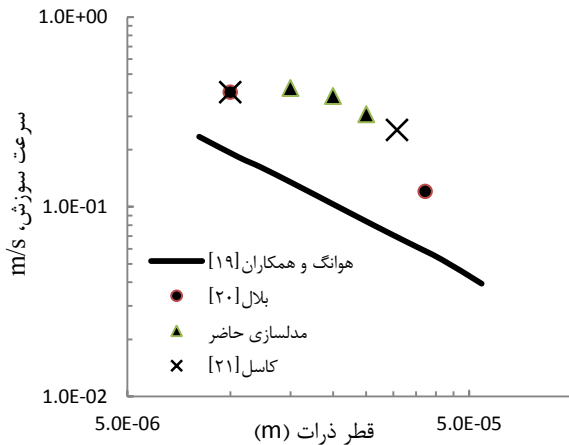
$$y = \sqrt{\frac{\rho_u C}{\lambda_u a \tau_c^2}} x \quad (9)$$

$$\nu = \frac{\sigma_{st} C_s}{\rho_u C} \quad (10)$$

$$\kappa = a \tau_b \quad (11)$$

$$\phi = \frac{\sigma}{\sigma_{st}} \quad (12)$$

$$\mu = \frac{\sigma_{st} Q}{\rho C_p (T_{si} - T_u)} \quad (13)$$



شکل ۲- نمودار مقایسه سرعت سوزش حاصل از مدلسازی انجام شده یا نتایج تجربی [۲۰] و [۲۱] و کار هوانگ و همکاران [۱۹].

شکل (۳) نشان‌دهنده نمودار تغییرات شعله در احتراق جریان متقابل میکروذرات آلومینیوم بر حسب نرخ کرنش می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌گردد با افزایش قطر ذرات سوخت و افزایش میزان نرخ کرنش، مکان شعله به مرکز تقارن نزدیکتر می‌گردد. نزدیک شدن مکان شعله به مرکز تقارن و انتقال شعله به نواحی سرعت پایین، بیانگر کاهش سرعت سوزش است. با توجه به شکل، کاهش قطر ذرات سبب افزایش سرعت سوزش و دور شدن شعله از مرکز تقارن شده است. هر چه سرعت سوزش بیشتر باشد مکان شعله نیز به نواحی سرعت بالا که دور از مرکز تقارن قرار دارند انتقال می‌یابد.

در نمودار شکل (۴) ضخامت شعله بر حسب نرخ کرنش در قطر ذرات متفاوت ارائه گردیده است که در آن ضخامت شعله با افزایش نرخ کرنش و کاهش قطر ذرات سوخت، کاهش یافته است. بنابراین در حالت کلی با افزایش نرخ کرنش، شعله نازکتر می‌گردد. زیرا با افزایش نرخ کرنش و کشیدگی شعله، طول شعله افزایش می‌یابد و در نتیجه از ضخامت آن کاسته می‌شود که این تغییر ضخامت برای ذرات بزرگتر به مراتب بیشتر خواهد بود.

در نمودار شکل (۵) نمودار دمای بی‌بعد احتراق بر حسب نرخ کرنش در قطر ذرات متفاوت نشان داده شده است که در آن دمای شعله با کاهش قطر ذرات آلومینیوم و کاهش نرخ کرنش افزایش یافته است. در واقع با کاهش میزان نرخ کرنش، همواره دمای احتراق افزایش یافته و از تاثیر قطر ذرات سوخت و حتی نرخ کرنش بر روی آن کاسته شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده، رفتار شعله در احتراق پیش مخلوط جریان متقابل میکرو ذرات فلزی به اندازه ذره و میزان کشیدگی جریان سیال وابسته است. البته همواره باید توجه داشت که برای محاسبه ضخامت شعله و مکان شعله حقیقی بایستی از رابطه (۲) مقادیر بدست آمده را اصلاح نمود.

$$T' = c_1 e^{-\kappa^2 y^2} + i \frac{b\sqrt{\pi}}{2\kappa} (e^{-\kappa^2 y^2} \operatorname{erf}(i\kappa y)) \quad (24)$$

$$c_1 = \frac{2\kappa}{\sqrt{\pi}} \frac{\theta_i - 1}{1 + \operatorname{erf}(\kappa y^*)} - i \frac{b\sqrt{\pi}}{2\kappa} \operatorname{erf}(i\kappa y^*)$$

حل معادله ذره (۱۷) نیز با توجه به شرایط مرزی موجود در زیر آمده است:

$$\theta_s = \frac{(\theta_i - 1)}{1 + \operatorname{erf}(\kappa y^*)} (1 + \operatorname{erf}(\kappa y)) + \quad (25)$$

$$\frac{\kappa y (\kappa^2 y^2)^{\frac{\gamma - \kappa}{2\kappa}}}{\sqrt{\pi}} \Gamma\left(\frac{\kappa - \gamma}{2\kappa}, \kappa^2 y^2\right) + 1$$

به کمک معادلات اخیر به همراه شرط مرزی اضافی موجود و با توجه به آنکه مطابق با تئوری گروشین [۱۳] زمان سوزش معلوم فرض شده است و با استفاده از نتایج بکستید [۹] برای تعیین مقدار آن، می‌توان مجهولات مسئله را از طریق حل دستگاه معادلات مذکور تعیین نمود. با استفاده از τ_b طول ناحیه واکنش، با توجه به سرعت مصرف سوخت در آن ناحیه، تعیین می‌گردد:

$$y_1 = y^* \exp(-2\kappa) \quad (26)$$

با ادغام این معادله و معادلات قبلی می‌توان مکان شعله (y^*) را برای نرخ کرنش‌های متفاوت بدست آورد.

۳- نتایج و بحث

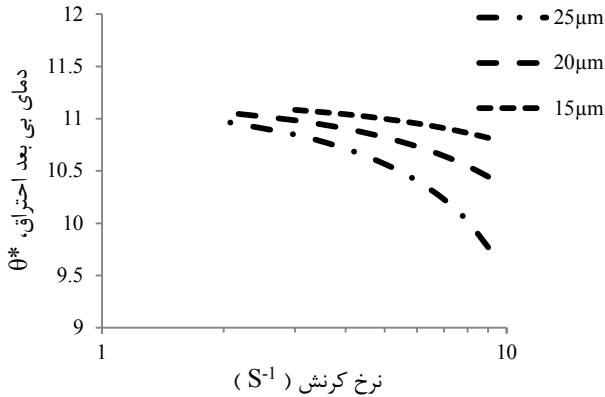
در این قسمت نتایج حاصل از مدلسازی و حل تحلیلی معادلات حاکم ارائه شده است. در این بخش نمودارهایی جهت نشان دادن عوامل موثر بر رفتار شعله در احتراق جریان متقابل میکروذرات آلومینیوم در حالت پیش مخلوط آورده شده است. محاسبات انجام شده در این بخش برای مخلوط رقیق سوخت می‌باشد و نمودارهای مختلف ارائه شده برای اندازه ذرات $15\mu\text{m}$ ، $20\mu\text{m}$ و $25\mu\text{m}$ ترسیم شده‌اند.

علیرغم وجود پژوهشهای زیاد در زمینه احتراق ذرات فلزی، اما متأسفانه به دلیل کمبود پژوهش در زمینه احتراق جریان متقابل ذرات آلومینیوم و بررسی تاثیر نرخ کرنش بر احتراق ذرات فلزی، تطبیق کامل نتایج با سایر مقالات امکان پذیر نخواهد بود؛ اما می‌توان با فرض نرخ کرنش اندک ($a = 2.0$) صحت نتایج را مورد ارزیابی قرار داد. در احتراق جریان متقابل سرعت سوزش از رابطه (۲۷) محاسبه می‌گردد:

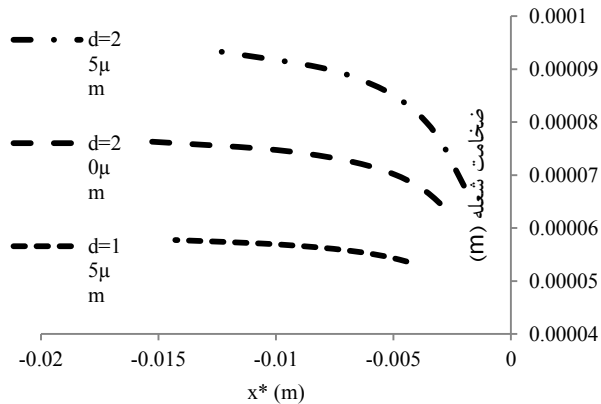
$$S_L = -ax^* \quad (27)$$

هوانگ و همکاران [۱۹] با مطالعه بر روی ذرات آلومینیوم نشان دادند که با افزایش قطر ذرات سرعت سوزش کاهش می‌یابد که نتایج آنها در شکل (۲) ترسیم شده است. با محاسبه سرعت سوزش بر اساس مدلسازی صورت گرفته در این پژوهش و مقایسه آن با نتایج تجربی که در شکل (۲) آورده شده است، سازگاری بسیار خوبی با نتایج تجربی مشاهده می‌گردد. همانگونه که نشان داده شده است، در احتراق جریان متقابل ذرات آلومینیوم نیز همواره با کاهش قطر ذرات سرعت سوزش افزایش می‌یابد.

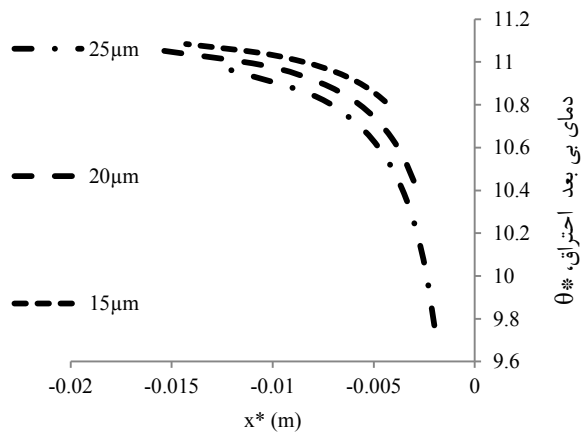
دهنده کاهش طول ناحیه پیش گرمایش است. نرخ افزایش دمای ذرات در نزدیکی محل تشکیل شعله به شدت افزایش می‌یابد و در نتیجه گرادیان دما در این ناحیه بسیار زیاد می‌باشد. قابل ذکر است که ذرات با رسیدن به دمای احتراق شعله‌ور شده و انرژی خود را آزاد می‌کنند.



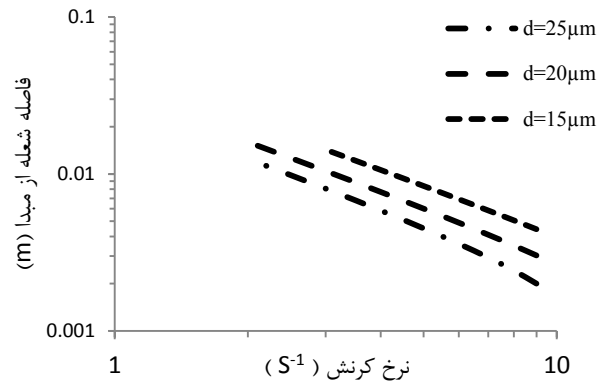
شکل ۵- نمودار دمای بی بعد احتراق برحسب نرخ کرنش برای قطر ذرات متفاوت



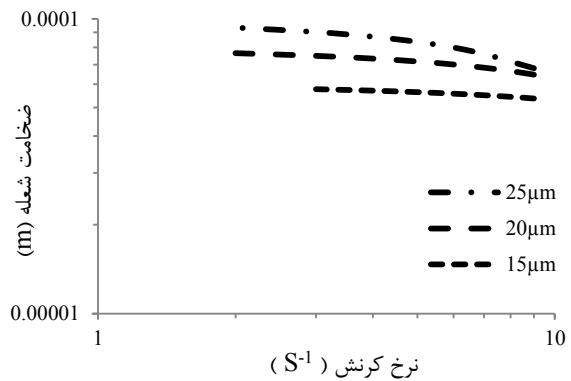
شکل ۶- نمودار ضخامت شعله برحسب مکان شعله در قطر ذرات متفاوت



شکل ۷- نمودار دمای بی بعد احتراق برحسب مکان شعله در قطر ذرات متفاوت



شکل ۳- نمودار فاصله شعله از مبدا برحسب نرخ کرنش برای قطر ذرات متفاوت



شکل ۴- نمودار ضخامت شعله برحسب نرخ کرنش برای قطر ذرات متفاوت

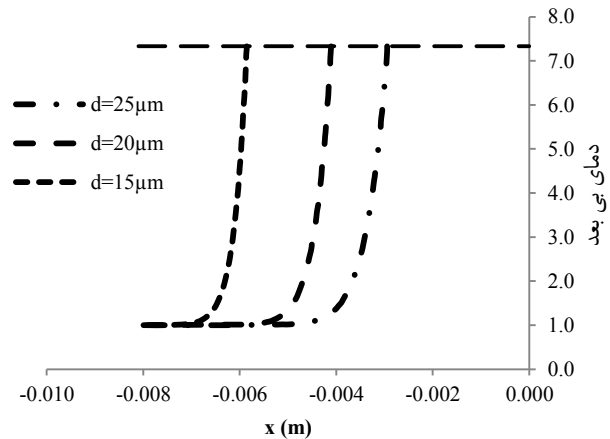
با توجه به تاثیر نرخ کرنش بر روی مکان شعله که در شکل (۳) به آن پرداخته شد، در ادامه این پژوهش، اثر مکان شعله بر روی پارامترهای مختلف احتراق پیش مخلوط جریان متقابل ذرات فلزی مورد بررسی قرار گرفته است. نمودارهای مرتبط با آن در قطر ذرات متفاوت برای نسبت تعادلی $\phi = 0.8$ ترسیم شده اند.

شکل (۶) نشان دهنده نمودار ضخامت شعله در احتراق جریان متقابل میکروذرات آلومینیوم بر حسب مکان شعله می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌گردد با افزایش قطر ذرات سوخت و با دور شدن ناحیه تشکیل شعله از مرکز تقارن، ضخامت شعله افزایش می‌یابد. برای مکانهایی با فاصله زیاد از مبدا، اثر اندازه ذرات سوخت بر ضخامت شعله بیشتر از اثر مکان تشکیل شعله خواهد بود.

نمودار شکل (۷) دمای بی بعد احتراق که بیانگر حداقل دمای جریان گاز برای تشکیل شعله در آن می‌باشد را برحسب مکان شعله بیان می‌کند و نشان می‌دهد که با دور شدن از مرکز تقارن دمای احتراق افزایش می‌یابد. با دور شدن از مرکز تقارن اثر مکان شعله بر دمای احتراق کاهش خواهد یافت. در شکل (۸) پروفیل تغییرات دمایی ذرات در طول شعله را نشان می‌دهد. دمای ذرات در ناحیه پیش گرمایش با کاهش قطر ذرات با روند سریعتری به دمای احتراق می‌رسد که نشان

مراجع

- [1] Brzustowski, T. A.; Glassman I. "Spectroscopic Investigation of Metal Combustion, Heterogeneous Combustion"; Academic Press, New York. 1964.
- [2] Law, C. K. "A Simplified Theoretical Model for the Vapor-Phase Combustion of Metal Particles"; Combust. Sci. Technol. 1973, 7, 197-212.
- [3] Turns, S. R.; Wong, S. C.; Ryba, E. "Combustion of Aluminum-Based Slurry Agglomerates"; Combust. Sci. and Tech. 1987, 54, 299-318.
- [4] Brooks, K. P.; Beckstead, M. W. "Dynamics of Aluminum Combustion"; J. Propul. Power 1995, 11(4), 769-780.
- [5] Bhatia, R.; Sirignano, W.A. "Transient Heating and Burning of Droplet Containing a Single Metal Particle"; Combust. Sci. and Tech. 1992, 54, 141-161.
- [6] Gremyachkin, V. M. "Theory of Ignition of Metallic Particles"; Combust. Explos. Shock Waves 1983, 19(3), 259-262.
- [7] Gremyachkin, V. M.; Istratov, A. G.; Leipunskii, O. I. "Model for the Combustion of Metal Droplets"; Combust. Explos. Shock Waves 1975, 11(3), 313-318.
- [8] Kovalev, O. B. "Adiabatic Method in the Thermal Theory of Ignition of Metal Particles in Gases"; Combust. Explos. Shock Waves 1994, 30(5), 29-33.
- [9] Beckstead, M. W. "Correlating Aluminum Burning Times"; Combust. Explos. Shock Waves. 2005, 41(5), 533-546.
- [10] Daou, J. "Strained Premixed Flames: Effect of Heat Loss, Preferential Diffusion and Reversibility of the Reaction"; Combust. Theory Model. 2011, 15(4), 437-454.
- [11] Thatcher, R. W.; AlSarairah, E. "Steady and Unsteady Flame Propagation in a Premixed Counterflow"; Combust. Theory Model. 2007, 11(4), 569-583.
- [12] Mohammadi, M.; Bidabadi, M.; Khalili, H.; Poorfar, A. K. "Modeling Counterflow Combustion of Dust Particle Cloud in Heterogeneous Media" J. Energy Eng. 2017, 143(2), 27-36.
- [13] Uemichi, A.; Nishioka, M. "Numerical Study on Ultra-Lean Rotating Counterflow Twin Premixed Flame of Hydrogen-Air"; Proc. Combust. Inst. 2013, 34, 1135-1142.
- [۱۴] بیدآبادی، مهدی؛ پورمحمد، یسنا؛ ذاکری، موسی؛ اسماعیل نژاد، علی "بررسی اثر تغییر شعاع ذرات بر شعله پیش مخلوط جریان متقابل ابرذرات ارگانیک"; مجله علمی- پژوهشی مواد پراورزی، سال هشتم، شماره ۲، صفحه ۴۹-۵۶، ۱۳۹۲.
- [۱۵] بیدآبادی، مهدی؛ پورمحمد، یسنا؛ اسماعیل نژاد، علی "بررسی اثر تخلخل در احتراق پیش مخلوط جریان متقابل در ابر ذرات ارگانیک"; نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال سوم، شماره ۲، صفحه ۲۷-۳۰، ۱۳۹۲.
- [16] Bidabadi, M.; Esmailnejad, A. "An Analytical Model for Predicting Counterflow Flame Propagation Through Premixed Dust Micro Particles with Radiative Heat Loss"; J. Loss Prevent. Proc. 2015, 35, 182-199.
- [17] Bidabadi, M.; Vakilabadi, M. A.; Poorfar, A. K.; Monteiro, E.; Rouboa, A.; Rahbari, A. "Mathematical Modeling of Premixed Counterflow Combustion of Organic Dust Cloud"; Renew. Energ. 2016, 92, 376-384.
- [18] Goroshin, S.; Kolbe, M.; Lee, J. H. S. "Flame Speed in a Binary Suspension of Solid Fuel"; Proc. Combust. Inst. 2000, 2811-2817.
- [19] Huang, Y.; Risha, G. A.; Yang, V.; Yetter, R.A. "Effect of Particle Size on Combustion of Aluminum Particle Dust in Air"; Combust. Flame. 2009, 156(1), 5-13.



شکل ۸- نمودار تغییرات دمایی ذرات در طول شعله در قطر ذرات متفاوت برای نرخ کرنش 1 s^{-1}

۴- نتیجه گیری

در این مقاله ساختار شعله پیش مخلوط یک بعدی میکروذرات آلومینیم در پیکربندی جریان متقابل بصورت کاملا تحلیلی بررسی گردید و نحوه تاثیرگذاری نرخ کرنش و نیز مکان شعله بر روی مشخصه های شعله مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از نتایج حاصله می توان به شناخت دقیق تری در ارتباط با نحوه تاثیرگذاری اثر نرخ کرنش بر مکان شعله و ضخامت آن رسید که این مسئله می تواند در طراحی مشعل های ذرات فلزی مفید باشد. با توجه به تحقیقات قبلی، شعله های جریان متقابل متشکل از سه ناحیه: پیش گرمایش، واکنش و پس از شعله در نظر گرفته شد. با بی بعدسازی و حل تحلیلی معادلات بقای انرژی برای گاز و ذره، مکان شعله، ضخامت شعله و دمای احتراق بدست آمد و نمودارهای آنها برحسب تغییرات نرخ کرنش برای اندازه ذرات متفاوت ترسیم گردید. نتایج موجود در این پژوهش با نتایج تجربی مراجع مختلف مقایسه شده است که با توجه به آن مشاهده گردید که نتایج حاصل از مدلسازی صورت گرفته با نتایج تجربی و فیزیکی حاکم بر احتراق جریان متقابل ذرات جامد سازگاری مناسبی دارد.

با استفاده از نتایج بدست آمده مشخص شد که با افزایش نرخ کرنش و کاهش قطر ذرات ضخامت شعله کاهش می یابد. مکان شعله نیز با کاهش نرخ کرنش و قطر ذرات از مرکز تقارن دورتر خواهد شد که این مسئله به دلیل افزایش سرعت سوزش می باشد. افزایش سرعت سوزش سبب می شود احتراق در سرعت های بالاتر پروفیل جریان متقابل که در فاصله دورتری نسبت به مرکز تقارن قرار دارند، رخ دهد. همچنین در نتیجه این پژوهش نشان داده شد که دمای احتراق با کاهش قطر ذرات و کاهش نرخ کرنش افزایش می یابد. زیرا کاهش قطر ذرات سبب کاهش زمان سوزش و کاهش ضخامت شعله می گردد.

کاربردی و محاسباتی در مکانیک، سال بیست و هشتم، شماره ۱، صفحه ۱۲۸-۱۱۹، ۱۳۹۳.

[۲۳] بیدآبادی، مهدی؛ رمضان پور، میلاد؛ خوئینی پورفر، علیرضا "مدلسازی تحلیلی احتراق جریان متقابل نفوذی ابرذرات"؛ نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، سال بیست و هشتم، شماره ۱، صفحه ۲۷-۲۰، ۱۳۹۵.

[20] Ballal, D.R. "Flame Propagation through Dust Clouds of Carbon, Coal, Aluminum and Magnesium in an Environment of Zero Gravity"; Proc. R. Soc. London A 1983, 385, 21-51.

[21] Cassel, H.M. "Reports of Investigations 6551", Bureau of Mines, 1963.

[۲۲] بیدآبادی، مهدی؛ اسماعیل نژاد، علی؛ پورمحمد، یسنا "بررسی اثر مکان شعله بر دمای شعله در احتراق ابر ذرات جریان پیش مخلوط متقابل"؛ نشریه علوم