

## مدل ریاضی انتشار شعله آرام ابر ذرات آلومینیوم: اثر تشعشع بر فاصله خاموشی و حد رقیق انتشار

مهدی بید آبادی<sup>۱</sup>، محمد صدیقی<sup>۲</sup>، ساسان سالخورده<sup>۳</sup>

آزمایشگاه تحقیقاتی احتراق، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران

تهران، خیابان هنگام، خیابان دانشگاه، دانشگاه علم و صنعت ایران

salkhordeh@just.ac.ir

### چکیده

جهت شناسایی هر چه بهتر فرآیند احتراق ذرات ریز جامد، نیاز به انجام آزمایش‌های تجربی و ارائه مدل‌های تحلیلی می‌باشد. در این مقاله یک مدل ریاضی جدید ارائه شده که پارامترهای بنیادی در مطالعه احتراق ذرات ریز جامد یعنی فاصله خاموشی و حد رقیق انتشار را بیان می‌کند. مدل با استفاده از فرضیات مرسوم در احتراق بنا نهاده شده و نقش تشعشع در احتراق ذرات ریز جامد را بررسی می‌کند. روابط ریاضی بدست آمده برای احتراق ذرات آلومینیوم در مقیاسه با مدل قبلی کامل‌تر بوده و همچنین با نتایج تجربی هماهنگی بهتری را دارد.

واژه‌های کلیدی: احتراق آلومینیوم - فاصله خاموشی - مدل ریاضی - تشعشع - حد رقیق انتشار شعله.

### ۱- مقدمه

احتراق ذرات ریز جامد، خصوصاً ذرات ریز فلزی کاربرد وسیعی در زمینه‌های مختلف تکنولوژی مدرن دارد. سیستم‌های جلوبرنده، ایمنی انفجار در معادن و سیلوها و احتراق زغالسنگ از جنبه‌های مختلف استفاده از علم احتراق ابر ذرات هستند. با وجود کاربرد روزافزون و تحقیقات وسیعی که امروزه در سراسر جهان صورت می‌گیرد، درک مفاهیم بنیادی و مدل کردن فرایند احتراق در مقایسه با شعله‌های گازی هنوز نیازمند بسط و توسعه بسیار است [۱]. دلایل زیادی مانند سختی ایجاد شرایط آزمایشگاهی که خود شامل توزیع یکنواخت و آرام ذرات معلق و نیز مشکلات و پیچیده‌گیهای ایجاد شرایط بدون جاذبه و حتی جاذبه ناچیز، می‌شود و مشکل مدل سازی احتراق ذرات ریز جامد به سبب پیچیدگی خود فرایند و تغییرات وسیع و گاه شگفت‌انگیز رفتار شعله و کمیتهای مرتبط، با تغییر نوع و حتی اندازه ذرات، باعث این عقب ماندگی شده است [۲].

از طرف دیگر وجود نتایج تجربی زیاد در منابع معتبر علمی، نیاز به آرایه مدل‌های تحلیلی برای بیان ریاضی و شرح و تفسیر داده‌های تجربی بیش از پیش احساس می‌شود. مدل تحلیلی که هم بدرستی فرایند را در بر گیرد و قابل حل با روشهای معمول باشد.

دو پارامتر بسیار مهم در تئوری شعله‌های آرام فاصله خاموشی و حد رقیق انتشار شعله هستند. در این مقاله سعی شده با استفاده از مدل ارزشمند سال ۱۹۹۶ میلادی که مهمترین و آخرین مدل ریاضی ارائه شده است [۳]، اثر تشعشع بر احتراق

۱- دکترای مکانیک

۲- عضو هیأت علمی دانشگاه هوایی

۳- کارشناس ارشد هوا - فضا

ذرات آلومینیوم بیان گردد. از سوی دیگر اهمیت تشعشع از دیر باز مورد اشاره قرار گرفته است [۴] اما در هردو شاخه تجربی و تحلیلی نیاز به پیشرفت فراوان احساس می‌شود. مدل ریاضی کنونی توانسته با هماهنگی بسیار خوب با داده‌های تجربی موجود، مقادیر فاصله خاموشی و حد رقیق انتشار شعله را پیش بینی کند.

## ۲- مدل ریاضی احتراق ذرات ریز جامد

احتراق ذرات فلزی (آلومینیوم به صورت ویژه) در این فرمول بندی مورد توجه قرار گرفته است. اطلاعات بسیار کمی در مورد نوع مکانیزم احتراق ذرات آلومینیوم در فضای اکسیدکننده گزارش شده است اما هیچ جزئیات مورد قبول علمی در مورد نوع مکانیزم اشتعال ذرات آلومینیوم وجود ندارد. مطابق نظر اغلب محققین، سوزش به واسطه واکنش همگن آلومینیوم مایع با اکسید کننده در حین عبور آن از فیلم اکسیدکننده به وقوع می‌پیوندد [۵]. احتراق در فاز گازی جایی که آلومینیوم بخار شده با اکسیدایزر واکنش می‌دهد اتفاق می‌افتد. در فرمول بندی ارائه شده فرض شده است که واکنش احتراقی در فاز گازی و با تشکیل یک شعله کروی شکل دیفیوژن که اطراف ذره سوخت منتشر شده به وقوع می‌پیوندد

در این فرمول بندی یک مدل احتراق ذرات آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته است. فرض شده است که مخلوط دو فاز قابل احتراق یک بعدی که شامل توزیع یکنواخت سوخت در هوا است که از صفحه منبع گرما که عمود بر خط جریان است عبور می‌کند.

برای مدل کردن اتلاف گرما به خارج فرض شده است که ترم اتلاف با دما نسبت خطی دارد. در طی این اتلاف فرض بر این است که انتقال حرارت هدایتی از گاز به دیواره باعث نمی‌شود که دمای دیواره تغییر کند و برابر با دمای ثابت بالا دست می‌ماند. در مدل، تغییرات تمام متغیرها از جمله دما و غلظت در جهت موازی جبهه شعله چشم پوشی شده است و این یعنی فرض کنیم که سرعت ذرات برابر سرعت گاز است [۳].

فرض شده که مقادیر غلظت و قطر اولیه ذره را می‌دانیم تمام نیروهای خارجی مثل نیروهای گرانشی و اثر آنها قابل چشم پوشی فرض شده و دیگر این که واکنش های شیمیایی مورد توجه ما محلی شده هستند یعنی نزدیک سطح ذرات اتفاق می‌افتند.

## ۳- معادلات

اساس معادلات بقایی همان معادلات مدل سال ۱۹۹۶ میلادی هستند [۳] اما معادله کلی شدت تشعشع بصورت زیر است:

$$\frac{dI}{dx} = +K_a I + K_s I - K_a I_b - \frac{K_s}{4\pi} \int I(\Omega) P(\theta, \Phi) d\Omega \quad (1)$$

در رابطه بالا مقادیر  $K_a$ ،  $K_s$  و  $I$  بترتیب برابر با ضریب پراش نور، ضریب جذب و شدت تشعشع می‌باشند.

معادله کلی انرژی برابر است با رابطه زیر که  $q(r)$  انتقال حرارت تشعشعی را نمایش می‌دهد:

$$V_u \rho g u C_g \frac{dT}{dx} = \lambda u \frac{d^2 T}{dx^2} + W_F \frac{\rho u}{\rho} - \alpha \frac{\rho u}{\rho} (T - T_u) + q(r) \quad (2)$$

از طرف دیگر ضرایب جذب و پراش نور را می‌توان بدست آورد:

ضریب جذب برای گاز:

$$K_{ag} = -\frac{1}{\delta} \ln(1 - \epsilon_g) \quad (3)$$

و برای ذرات جامد:

$$K_a = \frac{3}{2} Q_a \frac{\sigma}{\rho_p d_p} \quad (4)$$

و با فرض اینکه پراش نور تنها توسط ذرات صورت می‌گیرند [۶]:

$$K_s = \frac{3}{2} Q_s \frac{\sigma}{\rho_p d_p} \quad (5)$$

و در نهایت با توجه روابط و ساده سازیها و با استفاده از حل Mie از معادلات Maxwell خواهیم داشت [۷]:

$$q(r) = K_a I_f e^{K_r x} \quad (6)$$

که این رابطه تنها در ناحیه پیش گرم شعله در معادله انرژی اثر می‌کند. و  $I_f$  برابر شدت تشعشع ساتع شده از شعله به ناحیه پیش گرم می‌باشد. بنابراین معادله انرژی می‌شود:

$$V_u \rho g u C_g \frac{dT}{dx} = \lambda u \frac{d^2 T}{dx^2} + W_F \frac{\rho u}{\rho} - \alpha \frac{\rho u}{\rho} (T - T_u) + \frac{\rho_u}{\rho} K_a I_f e^{K_r x} \quad (7)$$

#### ۴- ساختمان شعله در مخلوط رقیق و غنی

انتشار شعله در این نوع مخلوط که اکسیژن زیادی دارد، مورد بررسی قرار گرفته است. برای مخلوط رقیق ما می‌توانیم سه ناحیه جدای پیش گرم، ناحیه واکنش و ناحیه پس از شعله را تعریف کنیم. ناحیه اول ناحیه شعله  $x < 0$  جایی است که دما ذره از دمای اشتعال کمتر است و نرخ واکنش برابر صفر است. ناحیه دوم ناحیه است که به نام ناحیه واکنش معروف است  $(0 < x < v_u \tau_C)$  جایی است که ذرات در رژیم دیفیوژن می‌سوزند و دمای ذره تقریباً ثابت باقی می‌ماند. فرض شده است که تمام گرمای تولید شده توسط واکنش مستقیماً به ناحیه احتراق برود. ناحیه سوم ناحیه پس از شعله نام دارد  $x > v_u \tau_C$  که جایی است که دما احتراق به صورت asymptatic کاهش می‌یابد تا به دمای محدود در بی نهایت برسد. به خاطر زیاد بودن اکسیژن کاهش غلظت اکسیژن در شعله کوچک است و زمان احتراق ذرات در ناحیه واکنش همانند زمان احتراق تک ذره در حالت غلظت اکسیژن اولیه است [۳]. در مخلوط غنی می‌توان فرض کرد که شعاع ذره معلق ثابت است و نرخ احتراق دیفیوژنی در مخلوط غلیظ فقط به مصرف اکسیژن در ناحیه واکنش بستگی دارد به عبارت دیگر به خاطر بزرگی زمان احتراق، برخلاف مخلوط رقیق، ناحیه بعد از شعله در ساختمان شعله مخلوط غنی وجود ندارد [۳].

#### ۵- پارامترهای بدون بعد و شکل بدون بعد معادلات در هر ناحیه

گرمای تبادل شده بین ذرات و گاز در منطقه پیش گرم را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\left(\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_s C_s\right) v \frac{dT_s}{dx} = (4\pi r^2) \frac{\lambda}{r} \frac{\rho_u}{\rho} (T - T_s) \quad (8)$$

شرایط مرزی کلی مساله بصورت زیر است:

$$\begin{aligned} x = -\infty & \quad T = T_s = T_u & \quad Y_{O_2} = Y^u_{O_2} \\ x = 0 & \quad T = T_i & \quad T_s = T_{si} \\ x = +\infty & \quad T = T_u \end{aligned} \quad (9)$$

با استفاده از پارامترهای بدون بعد زیر معادلات بقا را بدون بعد می‌کنیم

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{x}{v\tau_c} & \kappa^2 &= \frac{v^2\tau_c}{a} & \theta &= \frac{T}{T_u} \\
 \eta &= b' \frac{a\tau_c}{d^2} & \zeta &= \frac{3Le}{2v} & \phi &= \frac{\sigma}{\sigma_{st}} \\
 \Phi &= \frac{Y_{O_2}}{Y_{O_2}^u} & \mu &= \frac{\sigma_{st}Q}{\rho C_p(T_{si} - T_u)} & \nu &= \frac{C_s\sigma_{st}}{C\rho}
 \end{aligned} \tag{10}$$

زمان احتراق  $\tau_c$ ، در این عبارتها، زمان احتراق تک ذره واکنش سطحی ناهمگن است. پارامترهای بی بعد بالا دارای معانی فیزیکی واضحی هستند. سرعت شعله بی بعد  $\kappa$  عبارت است از نسبت ضخامت منطقه احتراق به ضخامت منطقه پیش گرم. پارامتر اتلاف گرما  $\eta$  نسبت زمان مشخصه انتقال حرارت از کانال است به زمان احتراق ذره.  $\mu$  مشخص تولید گرمایی احتراق است و نسبت بیشترین دمای ممکن آدیاباتیک به دمای اشتعال است. حال دو پارامتر بدون بعد جدید زیر را معرفی می‌کنیم:

$$\begin{aligned}
 \gamma &= K_f V \tau_c \\
 \beta &= \frac{I_f K_a V^2 \tau_c^2 \rho_u}{\lambda_u T_u \rho}
 \end{aligned} \tag{11}$$

بعد از بدست آوردن پارامترهای بی بعد، معادلات بقایی بی بعد شده نهایی را در هر ناحیه برای مخلوط رقیق می‌نویسیم:

$$\frac{d^2\theta}{dy^2} - \kappa^2 \frac{d\theta}{dy} = \kappa^2 \eta (\theta - 1) - \beta \exp(\gamma y) \tag{12}$$

$$\frac{d\theta_s}{dy} = \xi (\theta - \theta_s) \tag{13}$$

با شرایط مرزی:

$$\begin{aligned}
 y \rightarrow -\infty &\Rightarrow \theta = \theta_s = 1 \\
 y \rightarrow 0^- &\Rightarrow \theta = \theta_i; \theta_s = \theta_{si}
 \end{aligned} \tag{14}$$

ناحیه واکنش:

$$\frac{d^2\theta}{dy^2} - \kappa^2 \frac{d\theta}{dy} = \kappa^2 \eta (\theta - 1) - \mu \phi \kappa^2 (\theta_{si} - 1) \tag{15}$$

با شرایط مرزی:

$$\begin{aligned}
 y \rightarrow 0^+ &\Rightarrow \theta^+ = \theta^-; \frac{d\theta}{dy}\bigg|_{0^+} = \frac{d\theta}{dy}\bigg|_{0^-} \\
 y \rightarrow 1^- &\Rightarrow \theta^+ = \theta^-; \frac{d\theta}{dy}\bigg|_{1^+} = \frac{d\theta}{dy}\bigg|_{1^-}
 \end{aligned} \tag{16}$$

ناحیه پس از شعله:

$$\frac{d^2\theta}{dy^2} - \kappa^2 \frac{d\theta}{dy} = \kappa^2 \eta (\theta - 1) \tag{17}$$

با شرایط مرزی:

$$y \rightarrow 1^+ \Rightarrow \theta^+ = \theta^-; \left. \frac{d\theta}{dy} \right|_{1^+} = \left. \frac{d\theta}{dy} \right|_{1^-} \quad (18)$$

$$y \rightarrow 1 \Rightarrow \theta = 1$$

### ۶- روابط جبری کلیدی برای بیان سرعت شعله به غلظت ذرات

با مساوی قرار دادن شارها در مرز هر ناحیه و مقادیر دما [۷] روابط کلیدی برای بیان سرعت شعله به غلظت ذرات بدست خواهد آمد. اما قبل از بیان روابط، با حل معادلات بالا صورتهای صحیح اعداد بدون بعد رابطه (۱۱) بصورت زیر نمایان می‌شوند:

$$\gamma^2 = K_t^2 \alpha \tau_c$$

$$\beta = \frac{\alpha l_f K_a \tau_c \rho_u}{\lambda_u T_u \rho} \quad (19)$$

$$f(y) = \frac{\beta e^{\gamma y}}{\gamma^2 - 1 + \eta} \rightarrow f(0) = \frac{\beta}{\gamma^2 - 1 + \eta}$$

برای مخلوط رقیق:

$$\frac{(1 - \exp(-K_1))}{\sqrt{1 + \frac{4\eta}{\kappa^2}}} \times \frac{\mu\phi}{K_1} = \frac{\xi + K_1}{\xi} - \frac{K_1 - \kappa^2\gamma}{K_1} \times \frac{f(0)}{\theta_{si} - 1} \times$$

$$\left( \frac{K_1}{\kappa^2 \sqrt{1 + \frac{4\eta}{\kappa^2}}} + \sqrt{1 + \frac{4\eta}{\kappa^2}} \times \frac{\kappa\gamma - K_1}{\kappa\gamma + \xi} \right) \quad (20)$$

که در رابطه بالا:

$$K_1 = \frac{\kappa^2}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + 4 \frac{\eta}{\kappa^2}} \right) \quad (21)$$

و با انجام تمام مراحل بالا برای مخلوط غنی:

$$\frac{3}{2} \mu\phi\kappa^4 = (K_+ - K_-)(K_+ - Z) \left( \kappa^2 - \frac{Z}{Le} \right)$$

$$\left[ \frac{\xi + K_+}{\xi} + \frac{f(0)}{\theta_{si} - 1} (K_+ - \gamma) \left( \frac{1}{\xi + \gamma} + \frac{1}{K_+ - K_-} \right) \right] \quad (22)$$

که خواهیم داشت:

$$K_{\pm} = \frac{(1 + \nu\phi)\kappa^2}{2} \pm \sqrt{\left( \frac{(1 + \nu\phi)\kappa^2}{2} \right)^2 + \kappa^2\eta} \quad (23)$$

$$Z_- = \frac{\kappa^2 Le}{2} - \sqrt{\left( \frac{\kappa^2 Le}{2} \right)^2 + 3 \frac{\kappa^2 \phi Le}{2}} \quad (24)$$

## ۷- محاسبه ضرایب و مقادیر پارامترها

گام مهم بعدی محاسبه ضرایب و پارامترهای روابط (۲۰) و (۲۲) است، تا بتوان منحنی تغییرات  $K$  یعنی پارامتر بدون بعد سرعت را به ازای مقادیر مختلف  $\phi$  یعنی پارامتر بدون بعد غلظت را ترسیم کرد.

### ۷-۱- ضرایب تشعشی

توجه به روابط (۲۰) و (۲۲) ابتدا از محاسبه  $I_f$  شروع می‌کنیم با توجه به مرجع [۹] داریم:

$$I_f = (\varepsilon_f + \varepsilon_{pf} e^{-K_{af}\delta_f}) \sigma T_f^4 \quad (25)$$

در این رابطه  $\sigma$  ثابت "استفن بولتزمن" است. و

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-K_{af}\delta_f} \quad (26)$$

$$\varepsilon_{pf} = 1 - e^{-K_{apf}\phi_f}$$

اما با توجه به ساده سازیهای ریاضی که به واسطه کوچکی  $\delta$  ضخامت شعله در نهایت می‌توان نوشت [۹]:

$$I_f = 2K_a \sigma T_f^4 \quad (26)$$

### ۷-۲- ضرایب مربوط به احتراق آلومینیوم

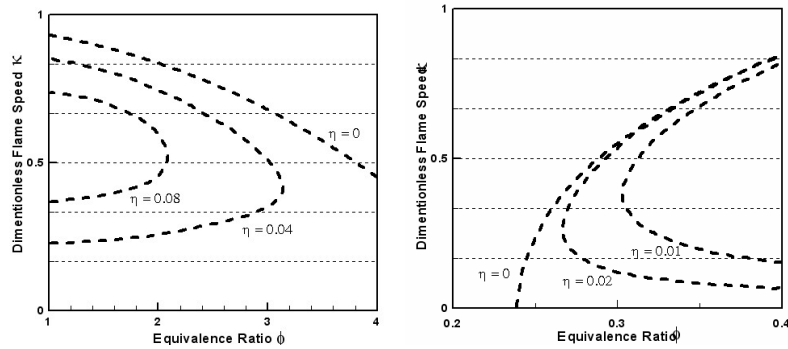
برای ذرات آلومینیوم با قطر ۵،۴ میکرون تمامی ضرایب مطابق جدول ۱ محاسبه می‌شود:

جدول ۱- پارامترهای مرتبط با احتراق آلومینیوم در این مساله

$\rho_s = 2770 \text{ kg} / \text{m}^3$	$C_s = .896 \text{ kJ} / (\text{kg}^\circ \text{K})$	$\lambda_u = .02624 \text{ W} / (\text{m}^\circ \text{K})$
$\rho_u = 1.1774 \text{ kg} / \text{m}^3$	$C_p = 1.0057 \text{ kJ} / (\text{kg}^\circ \text{K})$	$Q = 30945 \text{ kJ} / \text{kg}$
$d_p = 5.4 \mu\text{m}$	$b' = 8$	$E/R = 21100^\circ \text{K}$
$D_u = .206 \text{ E} - 4 \text{ m}^2 / \text{sec}$	$T_{si}^u = 2200^\circ \text{K}$ $T_u = 300^\circ \text{K}$	$\tau_c / d_p^2 = 4 \text{ E} + 6 \text{ sec} / \text{m}^3$

## ۸- نتایج تحلیلی

با استفاده از مقادیر عددی محاسبه شده در قسمت بالا، نوبت به رسم روابط کلیدی (۲۰) و (۲۲) می‌رسد. حل معادله‌های کلیدی برای مقادیر غیر صفر  $\eta$  دو جواب برای سرعت شعله به ما می‌دهد که مقدار کمتر ناپایدار است [۱۰ و ۳]. به نقطه ظهور این جواب دوم یا به عبارت دیگر نقاط مینیمم نمودار شکل (۱) را نقاط bifurcation point می‌گویند. مکانیزم خاموشی شعله در احتراق ذرات مشابه آنچه در مخلوطهای همگن اتفاق می‌افتد است یعنی یک فیدبک بین سرعت شعله و اتلاف حرارتی که از طریق هدایت (صفحات خاموشی) صورت می‌گیرد [۱۰]. اگر چه یکسری اختلاف بین این دو مکانیزم وجود دارد.

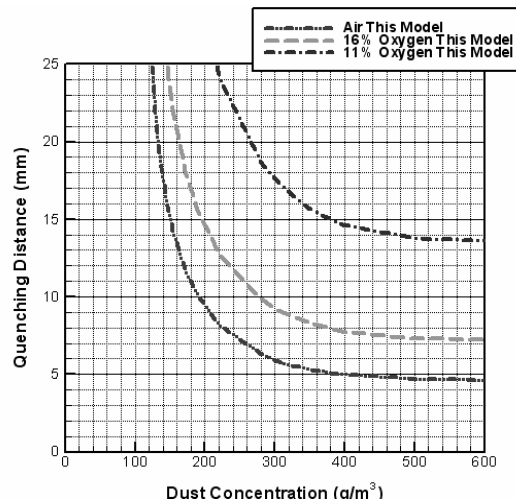


شکل ۱- نمودار بدون بعد سرعت شعله به غلظت برای مخلوط رقیق و غنی

مهمترین اختلاف این است که بیشترین افت دما برای مخلوطهای گازی همگن قبل از خاموشی بخاطر اتلاف دما بیشتر از  $RT_{ad}^2 / E$  نیست [۱۰] (یعنی چیزی در حدود چند صد درجه) در حالیکه برای حالت مورد بحث یعنی آلومینیوم، چون احتراق در رژیم دیفیوژن صورت می‌گیرد، نرخ احتراق با رابطه Arrhenius کنترل نمی‌شود و افت دمای گاز قبل از خاموشی فقط توسط دمای اشتعال آلومینیوم محدود گشته و افت دمای میانگین گاز به راحتی به هزار درجه می‌رسد.

## ۹- فاصله خاموشی و حد رقیق انتشار شعله

اکنون زمان آن رسیده که نمودار مقادیر تحلیلی فاصله خاموشی برای سه حالت هوا و ۱۶٪ و ۱۱٪ اکسیژن اولیه را در شکل ۲ ارائه دهیم.

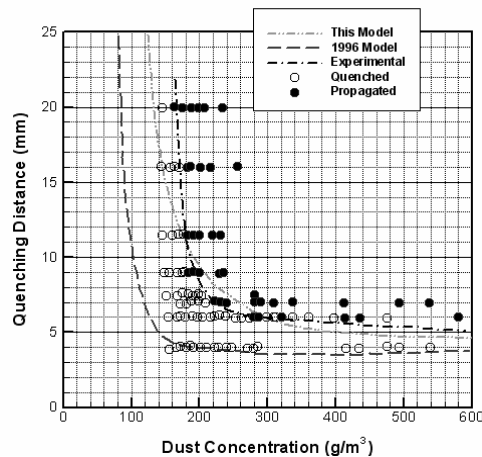


شکل ۲- نمودار فاصله خاموشی به غلظت ذرات برای سه حالت هوا و ۱۶٪ و ۱۱٪ اکسیژن اولیه برای آلومینیوم با قطر: ۵،۴ میکرون

## ۱۰- مقایسه و نتیجه‌گیری

فاصله خاموشی به عنوان تابعی از غلظت ذرات، در مخلوطهای مختلفی از درصد اکسیژن اولیه در شکل ۲ ملاحظه گردید. حال با مقایسه نتایج حاصل از مدل ارائه شده در این فصل و نتایج تئوری مدل اولیه که در سال ۱۹۹۶ میلادی ارائه شده است [۳] و نتایج تجربی معروف ثبت شده در منابع علمی نتیجه‌گیری حاصل می‌شود.

در شکل ۳ هر سه نمودار تئوری و تجربی ذکر شده برای هوا مقایسه شده است. همانطور که از شکل ۳ مشاهده می‌شود، مقدار تجربی کمترین فاصله خاموشی بدست آمده برای ذرات آلومینیوم با قطر ۵.۴ میکرون برابر ۵ میلی‌متر است [۳] که این مقدار نزدیک به مقدار تخمینی ۴ میلی‌متر که از روی آزمایش اشتعال ذرات توسط Ballal بدست آمده است [۱۱]، می‌باشد. از طرف دیگر این مقدار کمتر است از مقدار ۱۰ میلی‌متر که توسط Jarosinski برای ذرات ۷.۵-۹ میکرون به ثبت رسیده است. این در حالیست که مدل سال ۱۹۹۶ میلادی مقدار قابل قبول ۴ میلی‌متر را پیش‌بینی می‌کند [۳]. مدل کنونی با همخوانی بسیار خوب مقداری نزدیک مقدار تجربی را نشان می‌دهد یعنی مقداری نزدیک ۵ میلی‌متر برای کمترین فاصله خاموشی.



شکل ۳- نمودار فاصله خاموشی به غلظت ذرات برای  
هوا و آلومینیوم با قطر: ۵.۴ میکرون

همانطور که انتظار می‌رفت تشعشع بخاطر کوچک بودن فاصله خاموشی (فاصله بین کانالها) خیلی اثر بزرگی نگذاشته، اما آنچه باعث همخوانی بسیار خوب بین مقادیر تئوری و تجربی شده است، قابل ملاحظه است.

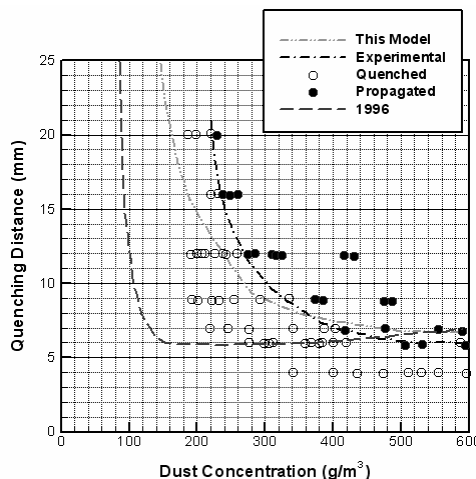
جدول ۲- مقایسه نتایج احتراق آلومینیوم با هوا

مدل	اندازه ذره (میکرون)	فاصله خاموشی (میلی‌متر)	حد رقیق انتشار موج احتراق (گرم بر سانتیمتر مربع)
تجربی	۵.۴	۵	۱۵۰
۱۹۹۶	۵.۴	۴	کمتر از ۱۰۰
حال حاضر	۵.۴	۵	در حدود ۱۱۵
Ballal	۱۰	۴	۱۶۰
Jarosinski	۷.۵-۹	۱۰	-

علاوه بر مقادیر فاصله خاموشی از شکل ۳ می‌توان مقادیر مربوط به حد غلظت رقیق انتشار موج احتراق را نیز مشاهده کرد. مقدار تجربی ثبت شده حد غلظت رقیق برابر  $150 \text{ g/m}^3$  است [۱]. این مقدار نزدیک مقدار  $160 \text{ g/m}^3$  است که توسط Ballal برای آلومینیوم با قطر ۱۰ میکرون ثبت شده است می‌باشد [۱۲]. اما برای این پارامتر مهم احتراق یعنی حد غلظت رقیق مدل سال ۱۹۹۶ میلادی مقدار قابل قبولی را نشان نمی‌دهد [۳]، از طرف دیگر مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل کنونی نسبت



به مدل سال ۱۹۹۶ میلادی وضعیت بهتری دارد و مقداری در حدود  $115 \text{ g/m}^3$  را نشان می‌دهد. با مقایسه سه مقدار نتیجه می‌گیریم مدل‌های تئوری نیازمند بهبود هستند و عواملی مانند اثر شناوری [۱۳] و اثر همرفت آزاد نیز [۳] باید مورد توجه قرار گیرند. مقایسه کلی نتایج را در جدول ۲ می‌توان دید. در شکل ۴ هر سه نمودار تئوری و تجربی ذکر شده برای مقدار ۱۶٪ اکسیژن اولیه مقایسه شده‌اند.



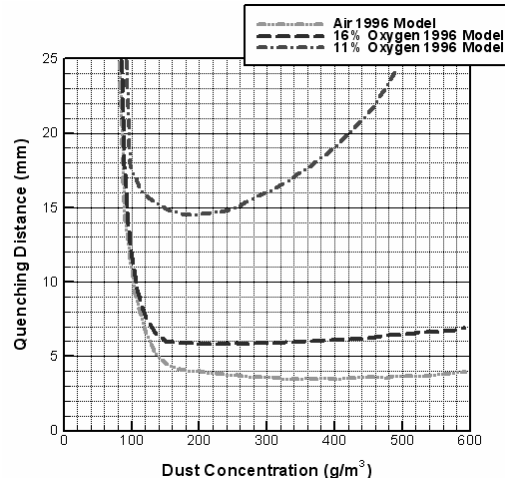
شکل ۴- نمودار فاصله خاموشی به غلظت ذرات برای اکسیژن اولیه ۱۶٪  
و آلومینیوم با قطر: ۵،۴ میکرون

در این نمودار آنچه مشهود است این است که مقدار تجربی کمترین فاصله خاموشی برابر ۶ میلی‌متر است، در حالیکه این مقدار را مدل ۱۹۹۶ میلادی و مدل ارائه شده کنونی، با توافق بسیار خوب با مقدار تجربی، کمی بیشتر پیش‌بینی می‌کنند که البته مقدار پیش‌بینی مدل کنونی به مقدار تجربی نزدیکتر است. در مورد مقادیر مربوط به حد غلظت رقیق انتشار موج احتراق آنچه نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد مقدار  $190 \text{ g/m}^3$  است. مدل ۱۹۹۶ نسبت به تغییرات این پارامتر حساسیت زیادی ندارد که شکل کامل آن را خواهیم آورد. اما مدل کنونی اگرچه مقداری نزدیک به مقدار تجربی را نمی‌دهد اما نه تنها اختلافش با مقدار تجربی با مقدار پیش‌بینی مدل ۱۹۹۶ کمتر شده بلکه نسبت به تغییرات مقدار اولیه اکسیژن هم مدل کنونی حساس شده است.

در شکل (۵) نیز هر سه نمودار (تئوری و تجربی) برای مقدار ۱۱٪ اکسیژن اولیه مقایسه شده است. برای مقدار کمترین فاصله خاموشی در حالت ۱۱٪ اکسیژن اولیه، مطابق شکل (۵) مقدار تجربی ثبت شده برابر ۱۵ میلی‌متر است، اما همانطور که ملاحظه می‌شود مدل ۱۹۹۶ میلادی مقدار قابل قبولی به ما نمی‌دهد در حالیکه مدل حاضر با هماهنگی مناسب با مقدار تجربی ثبت شده برای فاصله خاموشی مقدار ۱۴ میلی‌متر را می‌دهد. در مورد حد غلظت رقیق انتشار موج احتراق مطابق آنچه در بالا ذکر شد، مدل ۱۹۹۶ میلادی با تغییرات اکسیژن اولیه تغییری در مقدار پیش‌بینی شده حد غلظت رقیق نمی‌دهد، در حالیکه مدل حاضر اگرچه با اختلاف با مقدار  $360 \text{ g/m}^3$  تجربی ثبت شده [۳]، مقداری تا حدودی نزدیک می‌دهد.

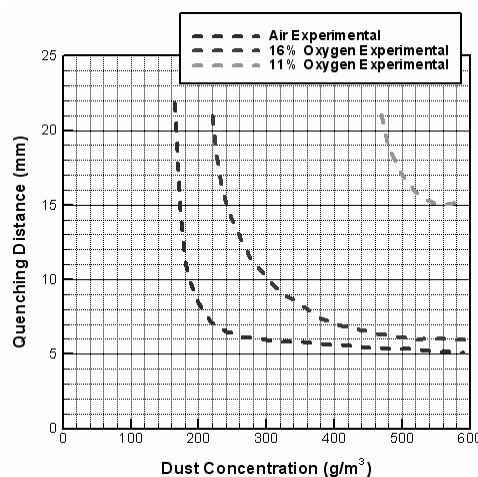
با مقایسه شکل (۲) با شکل (۶) که نمودارهای تحلیلی مدل سال ۱۹۹۶ میلادی را ترسیم کرده است، و نمودار تجربی شکل (۷) خواهیم دید که مدل کنونی برای حالتی که فواصل خاموشی و در نتیجه فاصله بین کانال‌های صفحه بزرگ است پیش‌بینی بسیار بهتری نسبت به مدل سال ۱۹۹۶ داشته است پس در این نواحی همانطور که انتظار می‌رفت تشعشع نقش پررنگی دارد.

علاوه بر این مقایسه هر سه نمودار ذکر شده، نشان می‌دهد که اگرچه هماهنگی رفتار مدل سال ۱۹۹۶ میلادی با رفتاری که نمودار تجربی دارد خوب است، اما حال می‌توان دید رفتار نمودارهای مدل کنونی بسیار هماهنگ‌تر از قبلی شده است. خصوصاً در مورد غلظت‌های کمتر اکسیژن اولیه و نواحی مربوط به حد رقیق انتشار شعله این هماهنگی بهتر است.



شکل ۵- نمودار نتایج تحلیلی مدل سال ۱۹۹۶  
برای آلومینیوم با قطر: ۵،۴ میکرون

اما پیش‌بینی مدل ارائه شده در این مقاله در مورد سرعت سوزش نه تنها بهبودی نسبت به مدل ارائه شده در سال ۱۹۹۶ میلادی [۳] حاصل نمی‌شود بلکه اختلافش با نمودار تجربی بیشتر هم شده است و این بخاطر فرض یک بعدی است که کرده‌ایم، چون از نمودار  $\eta = 0$  از شکل ۱ استفاده کردیم که نشان دهنده وقتی است که اتلاف گرما صفر است یا به عبارت دیگر صفحه خاموشی وجود نداشته باشد و فرض یک بعدی تشعشع بخاطر بزرگ بودن شعاع لوله آزمایش فرض نادرستی است.



شکل ۶- نمودار نتایج تجربی برای آلومینیوم  
با قطر: ۵،۴ میکرون

## مراجع

- 1- Dreizin, E. L., combustion explosion, and shock waves 39(681-693), (2003).
- 2- Eapen B.Z., Hoffmann V.K., Schoenitz M., Dreizin, E. L. *Combust. Sci. Technol.* 176:1055–1069 (2004).
- 3- Goroshin, S., Bidabadi, M., and Lee, J. H. S., *Combust Flame* 105:147–160 (1996).
- 4- Yarin, L.P. and Hetsroni, G., "Combustion of Two Phase Reaction Media" . Springer, (2004).
- 5- Merzhavov, A.G., Grigorjev, Yu.M, and Galchenko, Yu.A. "Aluminum Ignition", *Combustion and Flame*, Vol. 29, pp. 1-14, (1977)
- 6- Bohren, C.F. , Huffman, D.R. "Absorption and Scattering of Light by Small Particles" ,Wiley Science Series, (1998).
- 7- Smoot, L.D., Smith, P.J. "Coal Combustion and Gasification", Plenum Press, New York, (1985).
- 8- Williams, F.A., "Combustion Theory", 2<sup>nd</sup> ed., Menlo Park, Calif. Benjamin Cummings Publishing Company, Inc , (1985).
- 9- Bidabadi. M., "Fundamental Properties of Dust Flame Propagation", PhD Thesis, MC Gill University Canada, (1996).
- 10- Zeldovich, Ya.B, Barenblatt, G.I, Librovich, V.B, Makhviladze, G.M., "The Mathematical Theory of Combustion and Explosions", New York, Consultants Bureau (1985).
- 11- Ballal, D.R., "Ignition and Flame Quenching of Quiescent Dust Clouds of Solid Fuels", *Proc. Roc. Soc., A*, 369, pp.479-500, (1980).
- 12- Ballal, D.R., "Flame Propagation through Dust Clouds Of Carbon, Coal, Aluminum, and Magnesium in an Environment of Zero Gravity", *Proc. Roc. Soc., A*, 385, pp.21-25, (1983).
- 13- Linnet, J., and Simpson, C.J.S.M., "Combustion of Metal Dust Clouds", Sixth symposium (international) on combustion Chapman and hall, pp. 20-27, (1956).