

# اندازه گیری سرعت سوزش و زمان احتراق ابر ذرات میکرونی آلومینیوم

مهدی بیدآبادی<sup>1</sup>، محمد صدیقی<sup>2</sup>، حمید رضا گرکانی نژاد<sup>3</sup>، مریم سیدی<sup>4</sup>

دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت تهران نارمک دانشگاه علم و صنعت  
bidabadi@iust.ac.ir

## چکیده

این پژوهش یک مطالعه تجربی در رابطه با سرعت سوزش و زمان احتراق ابر ذرات میکرونی آلومینیوم در مخلوط گازی اکسیژن و نیتروژن می باشد. آزمایشات با ذرات 18 میکرونی آلومینیوم و مخلوط گازی (25٪ اکسیژن و 75٪ نیتروژن) صورت گرفته است. نتایج حاصل از آزمایشات نشان می دهد که افزایش غلظت سبب افزایش سرعت سوزش و کاهش زمان احتراق می شود. همچنین ملاحظه گردید پارامترهای سرعت سوزش و زمان احتراق در محدوده غنی ( $\phi > 1$ ) تقریباً مستقل از غلظت ذرات بوده، اما در ناحیه رقیق به شدت وابسته به غلظت ذرات می باشند. همچنین با استفاده از نتایج آزمایشات قبلی همین گروه تحقیقاتی اثر تغییر درصد اکسیژن در مخلوط گازی و اثر تغییر قطر مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شد زمان احتراق با قطر ذره نسبت مستقیم داشته یا به عبارت بهتر با افزایش قطر ذره زمان احتراق افزایش می یابد. همچنین ملاحظه گردید که افزایش درصد اکسیژن در گاز بستر افزایش سرعت سوزش و کاهش زمان احتراق را در پی خواهد داشت.

واژه های کلیدی: احتراق ابر ذرات - زمان احتراق - احتراق آلومینیوم - سرعت سوزش - سرعت انتشار شعله.

## 1- مقدمه

### 1-1 کلیات

پس از وقوع انفجاراتی در صنایع و معادنی مانند معادن زغال سنگ که با ذرات سر و کار داشتند، مبحث احتراق ذرات مورد توجه محققان علوم احتراقی قرار گرفت. استفاده از ذرات فلزی در موتورهای موشک [1]، موتورهای زیرآبی [2] مورد استفاده در اژدرها و موشکهای زیر آبی، سر جنگی موشکها و بمبهای (Thermobaric) و اخیراً استفاده در موتورهای فضایی، کاربردهای جدیدتر احتراق ذرات فلزی هستند که سبب اهمیت هر چه بیشتر این مبحث شده اند. برای احتراق آلومینیوم سه ناحیه پیش گرم، شعله و پس از شعله در نظر گرفته می شود. ذرات در ناحیه پیش گرم حرارت دریافت کرده و دمای آنها به دمای اشتعال نزدیک می شود. در ناحیه شعله به دمای اشتعال رسیده و اکسید می شوند و در نهایت در ناحیه پس از شعله حرارت خود را از دست می دهند. باید توجه داشت که منظور از زمان احتراق و سرعت سوزش

1- استادیار- مهندسی مکانیک

2- استادیار- مهندسی هوا فضا

3- دانشجوی کارشناسی ارشد- مهندسی مکانیک

4- دانشجوی کارشناسی ارشد- مهندسی مکانیک

در این تحقیق به ترتیب زمان حضور ذرات در ناحیه شعله و سرعت تبدیل ذرات نسوخته به سوخته می‌باشد. نتایج مبین این است ذرات کوچک آلومینیوم تحت مکانیزم سینتیک (Kinetically controlled) می‌سوزند. بدین صورت که مولکول‌های اکسیژن به درون ذرات آلومینیوم نفوذ کرده و اکسیداسیون در سطح ذره صورت می‌پذیرد. اما ذرات بزرگ به صورت دیفیوژن (Diffusion) محترق می‌گردند [3]. در مکانیزم دیفیوژن، ذرات آلومینیوم تبخیر شده و در فاز گاز با اکسیژن ترکیب می‌شوند. احتراق ذرات فلزی را می‌توان به دو صورت احتراق تک ذره و احتراق ابر ذرات مورد بررسی قرار داد.

### 1-2 احتراق تک ذره آلومینیوم

احتراق تک ذره آلومینیوم به صورت نامتقارن رخ می‌دهد. بعضی علت این عدم تقارن را به سبب وجود جریان‌های همرفت دانسته‌اند، اما آزمایشات صورت گرفته در محیط‌های کم جاذبه (Low Gravity) نشان دهنده احتراق نامتقارنی مشابه با محیط‌های معمولی می‌باشد که دلیلی برای رد نظریه فوق است. شاید بتوان عدم تقارن را به سبب نفوذ نامتقارن مولکول‌های اکسیژن به درون ذرات آلومینیوم و نیز عدم تقارن در تبخیر آلومینیوم و همچنین تشکیل لایه اکسید بر روی ذره به صورت نامتقارن دانست. چرا که ذرات به دست آمده پس از احتراق آلومینیوم نشان دهنده عدم یکنواختی میزان اکسیداسیون مولکول‌های آلومینیوم است [4].

### 1-3 احتراق ابر ذرات آلومینیوم

احتراق ابر ذرات را می‌توان تابعی از احتراق تک ذره و همچنین اندرکنش میان ذرات دانست. این اندرکنشها عبارت از: انتقال حرارت بین ذرات، مکانیزم‌های نرخ سوزش، ساختار شعله تولیدی و خصوصیات ذرات در هوا (خصوصیات جریان دو فاز گاز - جامد) می‌باشد [2]. بنابراین فقط می‌توان برای قسمت رقیق احتراق ابر ذرات از نتایج موجود احتراق تک ذره استفاده گردد و در حالات نزدیک به احتراق استوکیومتری و غنی نیاز به انجام آزمایشات متعدد برای دستیابی به نتایج مناسب می‌باشد.

### 1-4 سرعت سوزش

پارامترهای دینامیکی احتراق ذرات عبارت از: سرعت انتشار شعله، سرعت سوزش، فاصله خاموشی، ضخامت شعله و زمان احتراق می‌باشد. سرعت انتشار شعله عبارتست از سرعتی که شعله با آن سرعت، فاصله بین دو نقطه را طی کرده و یا به عبارت بهتر مسافت طی شده توسط شعله در واحد زمان است. اما سرعت سوزش شعله به معنی سرعتی است که مخلوط نسوخته به سوخته تبدیل می‌گردد [5]. در صورتیکه بتوان از نیروی گرانشی زمین صرفنظر کرد و یا آزمایشات در یک محیط جاذبه صفر صورت پذیرد، در آن صورت سرعت سوزش با سرعت انتشار شعله برابر خواهد بود [6]، اما در صورت وجود گرانش زمین این دو پارامتر با یکدیگر متفاوت بوده و می‌توان سرعت سوزش را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$S_b = \frac{S_L}{\frac{A_f}{A_c}} \quad 10$$

که در آن  $S_b$  سرعت سوزش،  $S_L$  سرعت انتشار شعله،  $A_c$  سطح مقطع لوله،  $A_f$  مساحت پیشانی شعله می‌باشد. در این تحقیق نسبت سطح شعله به سطح لوله برابر  $1/42$  می‌باشد. [7]

### 1-5 زمان احتراق

زمان احتراق یکی از پارامترهای مهم در بررسی احتراق ذرات بوده که بیانگر نرخ احتراق ذرات می‌باشد یا به عبارت دیگر زمانیکه ذرات در ناحیه واکنش حضور دارند. این پارامتر در تبیین مکانیزم احتراق ذرات، که یکی از مهمترین پارامترها

برای شناخت ویژگی‌های احتراق ذرات می‌باشد، نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند. زمان احتراق کمتر از سایر پارامترهای احتراقی مورد بررسی محققان قرار گرفته است و نتایج زیادی در خصوص زمان احتراق ابر ذرات در دسترس نیست. یکی از روابط مورد استفاده در محاسبه زمان احتراق رابطه (2) می‌باشد.

$$t = KD^n \quad (2)$$

در این رابطه  $K$  عدد ثابت،  $D$  قطر ذره است و  $n$  توان قطر ذره، نشان دهنده مکانیزم حاکم بر احتراق ذره می‌باشد. مقدار  $n$  در محدوده 1 الی 2 می‌باشد [8]. عدد یک برای حالتی است که احتراق کاملاً تحت مکانیزم سینتیک رخ می‌دهد و 2 برای حالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که احتراق به حالت دیفیوژن صورت گیرد. برای بقیه حالات که تلفیقی از دو حالت سینتیک و دیفیوژن است عددی در محدوده 1 تا 2 مناسب است. با توجه به مطالب ذکر شده به کمک محاسبه زمان احتراق می‌توان به مطالعه مکانیزم حاکم بر احتراق پرداخت.

در این تحقیق برای محاسبه زمان احتراق ذرات آلومینیوم ابتدا به کمک محاسبه فاصله خاموشی، پارامتر ضخامت شعله را بدست آورده و سپس با استفاده از محاسبه سرعت انتشار شعله، سرعت سوزش بدست می‌آید و در نهایت با استفاده از رابطه (3) زمان احتراق محاسبه می‌شود:

$$t = \frac{\delta}{S_b} \quad (3)$$

که در آن  $\delta$ : ضخامت شعله و  $S_b$ : سرعت سوزش است.

زمان احتراق تابع پارامترهایی نظیر قطر ذرات، درصد اکسیژن، دمای اولیه، غلظت ذرات، نوع گاز بستر و تغییر نوع اکسیدایزر می‌باشد.

در این مقاله به بررسی اثر تغییر پارامترهای قطر ذرات، غلظت ذرات و درصد اکسیژن در گاز بستر پرداخته و ملاحظه شد زمان احتراق با قطر ذره نسبت مستقیم داشته یعنی با کاهش قطر ذرات، زمان احتراق ابر ذرات کاهش می‌یابد. علت این مساله آنست که با کاهش قطر ذره سطح موثر واکنشی ذره (نسبت سطح به حجم ذره) افزایش یافته، که این افزایش سطح واکنش باعث افزایش تعداد واکنش‌ها گردیده و این موضوع سبب کاهش زمان احتراق می‌گردد. همچنین مشاهده گردید که افزایش درصد اکسیژن در گاز بستر سبب افزایش تعداد مولکول‌های اکسیژن و در نتیجه افزایش تعداد واکنش‌های صورت گرفته می‌شود این مطلب سبب افزایش سرعت سوزش و کاهش زمان احتراق خواهد شد. غلظت ذرات در دو ناحیه غنی و رقیق اثرات متفاوتی بر سرعت سوزش و زمان احتراق خواهد داشت، بدین صورت که در ناحیه غنی افزایش غلظت ذرات باعث تغییر زیادی در این دو پارامترهای احتراقی نمی‌شود اما در ناحیه رقیق افزایش غلظت ذرات سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در زمان احتراق و افزایش سرعت سوزش می‌شود.

در ادامه دستگاه آزمایش، ارائه نتایج حاصل از آزمایش و بحث و بررسی نتایج ارائه گردیده است.

## 2- دستگاه آزمایش

اجزای اصلی دستگاهی که جهت انجام آزمایش‌های این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته عبارتند از: سیستم پخش کننده ذرات، سیستم اندازه گیری غلظت ذرات، سیستم جرقه و سیستم جمع کننده ذرات.

### 1-2 سیستم پخش کننده ذرات

سیستم پخش کننده ذرات شامل دو قسمت تغذیه کننده ذرات و پخش کننده ذرات می‌باشد. ذرات سوخت به کمک مجموعه سیلندر و پیستون که سیلندر دارای قطر داخلی 25 میلیمتر و طول 161 میلیمتر است، به کمک یک جک الکترومکانیکی به سمت بالا حرکت داده شده و بوسیله تغییر سرعت پیستون می‌توان میزان ذرات را کنترل کرد. ذرات

آلومینیوم در قسمت بالایی سیلندر با جت هوا برخورد می‌کند و در اثر این برخورد، با اکسیدایزر مخلوط شده و وارد لوله شیشه‌ای که محل انجام این واکنش بوده می‌شود. دبی اکسیدایزر به کمک شیر برقی کنترل می‌شود. لوله شیشه‌ای محفظه احتراق دارای طول 150 سانتی متر و 46 میلی‌متر قطر است.

## 2-2 سیستم اندازه گیری غلظت ذرات

برای اندازه‌گیری غلظت ذرات از یک دستگاه لیزر هلیوم - نئون مدل IR2000 ساخت مرکز تحقیقات لیزر و یک کارت A/D و یک کامپیوتر استفاده می‌شود. پرتو تابشی لیزر پس از عبور از چند عدسی و برخورد با غبار ذرات خروجی از لوله شیشه‌ای در یک Detector جمع شده و به کمک کارت تبدیل آنالوگ به دیجیتال تبدیل به نمودار و عدد می‌شود و سپس با استفاده از نمودار کالیبراسیون غلظت ذرات مشخص می‌شود.

## 2-3 سیستم جرقه

در این سیستم به کمک یک اتو ترانس متغیر، جریانی را به دو طرف سیمی نازک از جنس تنگستن اعمال کرده تا به کمک حرارت تولیدی آن احتراق در بالای لوله شیشه‌ای ایجاد شود.

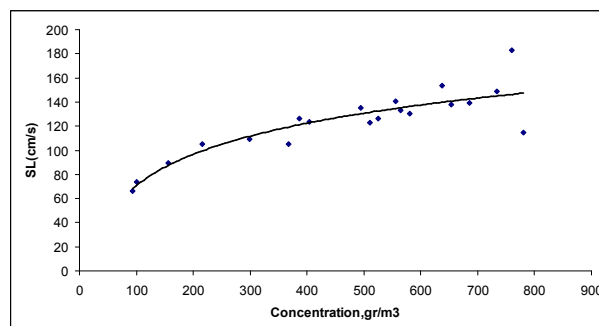
## 3- انجام آزمایش و ارائه نتایج

### 3-1 انجام آزمایش

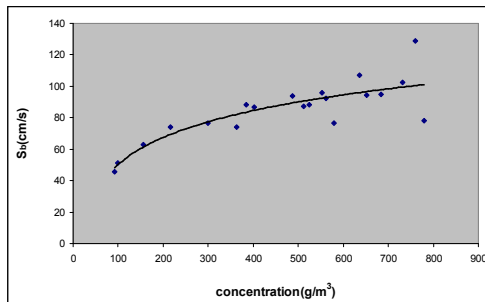
آزمایشات با ذرات 18 میکرونی آلومینیوم که قبل از آغاز آزمایش در دستگاه خشک کن، خشک شده بود در مخلوط گازی 25٪ اکسیژن و 75٪ نیتروژن و برای غلظتهایی در محدوده 80 تا 800 گرم بر متر مکعب انجام گردید. (لازم به ذکر است که به دلیل مشکلات پراکنش ذرات در غلظت‌های بالا در اثر انباشتگی و به هم چسبیدگی ذرات، خطای آزمایشات در غلظت 800 گرم بر متر مکعب بیشتر بوده و انجام آزمایش موفق در این غلظت‌ها با مشکل مواجه است) پس از تشکیل شعله، تزریق جریان دو فاز گاز- جامد قطع شده تا شعله در درون لوله شیشه‌ای منتشر شود. در حین عبور شعله در درون لوله شیشه‌ای با انتخاب نقاط خاصی بر روی لوله و اندازه‌گیری زمان عبور شعله در بین دو نقطه خاص و استفاده از رابطه:

$$S_L = \frac{y}{t} \quad (4)$$

(که در آن  $y$  ارتفاع بر حسب  $cm$ ،  $t$  زمان بر حسب  $s$  و  $S_L$  سرعت انتشار شعله بر حسب  $cm/s$  بوده، سرعت انتشار شعله محاسبه گردید، و سپس نمودار سرعت سوزش با استفاده از رابطه (1) بدست آمد. شکل (1) نشان دهنده سرعت انتشار شعله و شکل (2) بیانگر سرعت سوزش حاصل از آزمایشات صورت گرفته در این تحقیق در طیف وسیعی از غلظت‌ها می‌باشد.



شکل 1- سرعت انتشار شعله ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم در مخلوط گازی (25٪ اکسیژن و 75٪ نیتروژن)



شکل 2- سرعت سوزش ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم در مخلوط گازی (25٪ اکسیژن و 75٪ نیتروژن)

### 3-2 ضخامت شعله

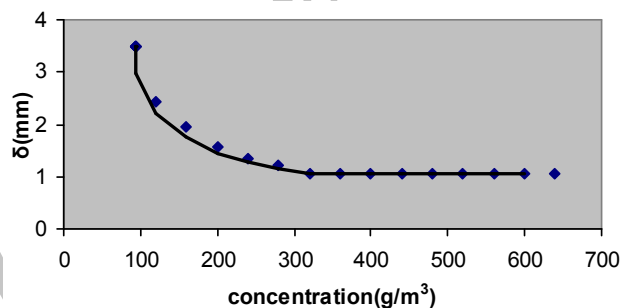
از میان روشهای چندی که برای محاسبه ضخامت شعله وجود دارد، در این مقاله ضخامت شعله به دو روش به کمک فاصله خاموشی و همچنین با استفاده از تصویر حاصل از شعله مورد بررسی قرار گرفته و محاسبه می‌شود.

### 3-2-1 محاسبه ضخامت شعله به کمک فاصله خاموشی

رابطه (5) ارتباط بین فاصله خاموشی و ضخامت شعله را نشان می‌دهد [10].

$$\frac{d_q}{\delta} = \frac{\sqrt{2Nu/\eta}}{2/\kappa + |Z|\kappa} \quad (5)$$

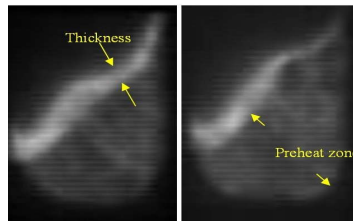
تحقیقات نشان می‌دهد که فاصله خاموشی دو برابر ضخامت شعله است [10]. نمودار ضخامت شعله حاصل از احتراق ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم در مخلوط گازی (25٪ اکسیژن و 75٪ نیتروژن) به صورت شکل (2) بدست می‌آید.



شکل 3- ضخامت شعله ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم در مخلوط گازی (25٪ اکسیژن و 75٪ نیتروژن)

### 3-2-2 محاسبه ضخامت شعله به کمک تصویر برداری از شعله

به کمک تصویر برداری مناسب از شعله در حال انتشار و فیلتراسیون مناسب نورهای زاید، می‌توان به تصویر مناسبی از شعله دست یافته و توسط آن ضخامت شعله را مورد محاسبه قرار داد. باید توجه داشت این عمل در تمامی غلظت‌ها با دقت مناسبی صورت نمی‌پذیرد، در نتیجه روش دچار خطا می‌شود. در شکل (3) نمایی از شعله در آزمایشات صورت گرفته که به صورت مناسبی فیلتر شده قابل مشاهده است.

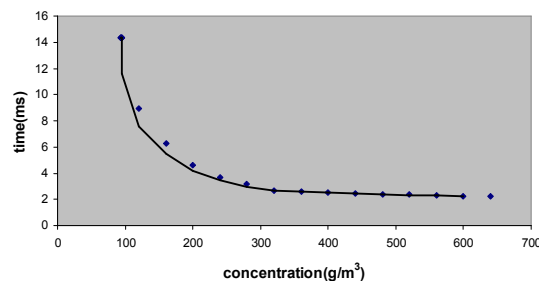


شکل 4- نواحی مختلف شعله (سمت راست ناحیه پیش گرم، سمت چپ ضخامت شعله)

ضخامت شعله از این طریق 2 میلی متر محاسبه شده است که با نتایج حاصل از روش قبل به میزان مناسبی همخوانی دارد.

### 3-3 زمان احتراق

با استفاده از نتایج حاصل برای سرعت سوزش و ضخامت شعله و همچنین رابطه شماره (2) نمودار زمان احتراق ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم بر حسب غلظت ذرات به صورت زیر به دست می آید.



شکل 5- زمان احتراق ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم در مخلوط گازی (25٪ اکسیژن و 75٪ نیتروژن)

## 4. بحث و بررسی

### 4-1 اثر غلظت بر سرعت سوزش

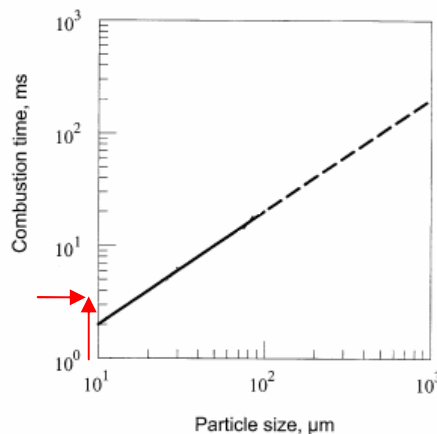
نمودار شکل (2) نمایانگر میزان وابستگی سرعت سوزش به غلظت ذرات می باشد. مشاهده می شود که با افزایش غلظت در ناحیه رقیق، سرعت سوزش افزایش می یابد. این مورد به علت افزایش نرخ نفوذ اکسیژن به داخل ناحیه احتراق ذرات می باشد که در نتیجه آن اکسیژن کافی جهت احتراق در اختیار ذرات قرار می گیرد. اما با توجه به روند رو به افول افزایش سرعت در غلظت های بالا می توان نتیجه گرفت که در مخلوط های غنی، سرعت سوزش وابستگی کمتری به غلظت ذرات دارد. در واقع چون در غلظت های بالا نسبت ذرات به اکسیدایزر به شدت افزایش می یابد، لذا اکسیژن کافی جهت احتراق کامل در اختیار ذرات قرار نمی گیرد و در نتیجه با افزایش غلظت، سرعت سوزش ذرات رشد قبلی را نخواهد داشت.

### 4-2 اثر غلظت بر زمان احتراق

با توجه به نمودار شکل (5) مشاهده می شود که در ناحیه غنی ( $\phi > 1$ ) افزایش غلظت اثر چندانی بر زمان احتراق ندارد. در ناحیه غنی، افزایش تعداد ذرات آلومینیوم به دلیل آنکه اکسیژن کافی برای واکنش با آنها وجود ندارد باعث افزایش تعداد واکنش ها نشده در نتیجه تغییر محسوسی در زمان احتراق ابر ذرات مشاهده نمی شود. در ناحیه رقیق به دلیل آنکه اکسیژن کافی برای انجام واکنش با آلومینیوم وجود دارد افزایش غلظت سبب کاهش زمان احتراق می شود. توجه به نمودار و مطالب ذکر شده در بالا مشخص می کند که اثر تغییر غلظت در غلظت های کمتر ذرات بیشتر است. و با نزدیک شدن به غلظت استوکیومتریکی اثر تغییر غلظت کمتر می شود.

### 4-3 اثر قطر بر زمان احتراق

با توجه به مطالب ارائه شده در مقدمه و رابطه شماره (2)، زمان احتراق با قطر ذرات دارای نسبت مستقیم است. با کاهش قطر ذرات، مکانیزم حاکم بر احتراق ذرات هرچه بیشتر به سمت مکانیزم سینتیک میل کرده در نتیجه فرایند احتراق کمتر از قبل نیازمند تبخیر ذرات می‌باشد و همچنین به دلیل آنکه کاهش قطر ذرات افزایش سطح موثر واکنشی آنها را در پی خواهد داشت زمان احتراق آنها کاهش می‌یابد. نمودار شکل (6) نشان دهنده زمان احتراق تک ذره آلومینیوم بر حسب قطر ذره می‌باشد.

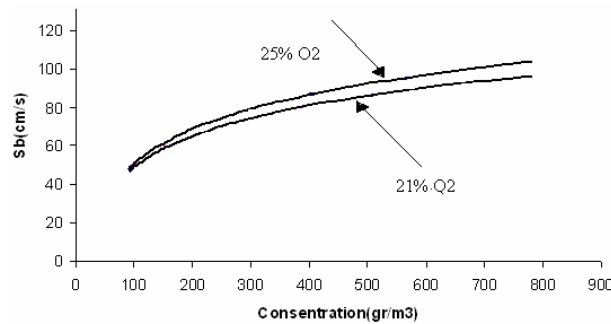


شکل 6- زمان احتراق ذره آلومینیوم در هوا بر حسب قطر [11]

با توجه به این نکته که احتراق ذرات، تابعی از احتراق تک ذره و اندرکنشهای موجود میان ذرات است و این اندرکنشها در ناحیه رقیق کم است می‌توان نتایج حاصل از احتراق تک ذره آلومینیوم را با نتایج حاصل در ناحیه رقیق احتراق ابر ذرات مقایسه کرد. در مرجع [11] زمان احتراق در طیف وسیعی از قطر ذره بدست آمده است که تا حد مناسبی با نتایج حاصل از آزمایشات این پژوهش مطابقت دارد. به عبارتی همانطور که در شکل (6) با توجه به تحقیقات انجام شده در مرجع [11] نشان داده شده که زمان احتراق ذره 18 میکرونی آلومینیوم برابر 2.5 میلی ثانیه بدست آمده است که با میانگین حاصل از آزمایشات این تحقیق تطابق مناسبی دارد.

### 4-4 اثر تغییر درصد اکسیژن در مخلوط گازی بر سرعت سوزش

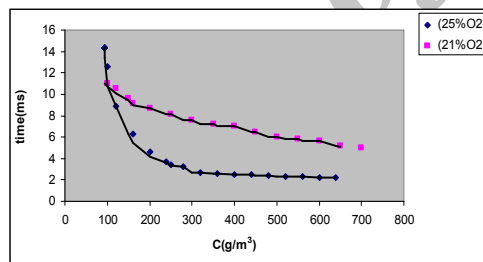
در نمودار شکل (7) تاثیر افزایش اکسیژن در مخلوط گازی بر سرعت سوزش ذرات 18 میکرونی آلومینیوم در مخلوطهای گازی (21٪ اکسیژن-79٪ نیتروژن) و (25٪ اکسیژن-75٪ نیتروژن) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد اکسیژن از 21٪ به 25٪، بر سرعت سوزش افزوده می‌گردد. شیب نمودار در غلظت‌های بالا کمی شدیدتر است که نشان دهنده تاثیر بیشتر افزایش اکسیدایزر بر سرعت سوزش در غلظت‌های بالاست. شاید بتوان گفت که در غلظت‌های پایین ذرات به دلیل متعادل بودن نسبت ذرات به اکسیژن، نیاز شدیدی به اکسیژن احساس نمی‌شود. اما در غلظت‌های بالا به دلیل زیاد بودن نسبت غلظت ذرات به میزان اکسیژن، کمبود اکسیژن احساس می‌شود و بنابر این با افزودن اکسیژن، سرعت سوزش با شدت بیشتری افزایش می‌یابد.



شکل 7- مقایسه سرعت سوزش ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم در مخلوط‌های گازی (25٪ اکسیژن و 75٪ نیتروژن و 21٪ اکسیژن و 79٪ نیتروژن) [7]

#### 4-5 اثر تغییر درصد اکسیژن در مخلوط گازی بر زمان احتراق

افزایش درصد اکسیژن سبب افزایش تعداد مولکول‌های اکسیژن و در نتیجه افزایش تعداد برخوردهای موثر واکنشی شده که در نهایت افزایش تعداد واکنشها و کاهش زمان احتراق را در پی دارد. در نمودار شکل (8) زمان احتراق آزمایشات حاضر با زمان احتراق آزمایشات ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم در مخلوط گازی (21٪ اکسیژن و 79٪ نیتروژن) که قبلاً توسط همین تیم تحقیقاتی انجام شده مقایسه گردیده است [7]. با توجه به نمودار مشخص است که زمان احتراق در 25٪ اکسیژن به دلایل ذکر شده در بالا کمتر از زمان احتراق در 21٪ اکسیژن است. علت تفاوت مشاهده شده در فرم دو نمودار آنست که در حالت احتراق با هوا ضخامت شعله مستقیماً از طریق تصویر برداری بدست آمده و ثابت در نظر گرفته شده است.

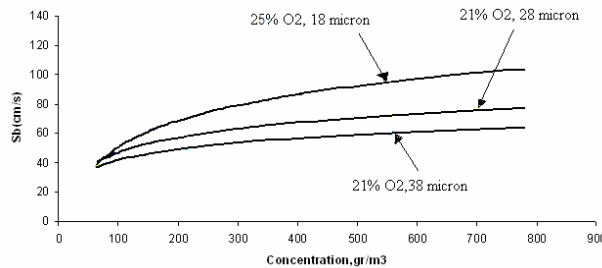


شکل 8- مقایسه زمان احتراق ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم در مخلوط‌های گازی (25٪ اکسیژن و 75٪ نیتروژن و 21٪ اکسیژن و 79٪ نیتروژن) [11]

#### 4-13 اثر توامان تغییر قطر ذرات و درصد اکسیژن در مخلوط گازی بر سرعت سوزش

در یک غلظت معین، با کاهش قطر ذره، سرعت سوزش افزایش می‌یابد. این نکته را می‌توان به پراکندگی یکنواخت‌تر ذرات کوچکتر و افزایش نسبت سطح به حجم آنها نسبت داد. این مساله سبب افزایش نرخ نفوذ اکسیدایزر به سطح ذره و در نتیجه افزایش سرعت سوزش ذره می‌گردد. در نمودار شکل (9) نتایج حاصل از آزمایشات حاضر با نتایج قبلی همین تیم تحقیقاتی برای ذرات 28 و 38 میکرونی در مخلوط گازی (21٪ اکسیژن - 79٪ نیتروژن) مقایسه شده است [7]. مشاهده می‌شود که هر دو اثر کاهش قطر و افزایش درصد اکسیژن در مخلوط گازی به همراه هم سبب افزایش سرعت سوزش شده است که مطابق مطالب گفته شده در قسمت‌های قبلی می‌باشد.

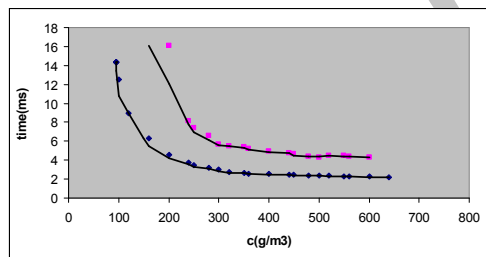




شکل 9- مقایسه سرعت سوزش ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم در مخلوط گازی (25٪ اکسیژن و 75٪ نیتروژن) و ابر ذرات 28 و 38 میکرونی در مخلوط گازی (21٪ اکسیژن و 79٪ نیتروژن)

#### 4-4 اثر توامان تغییر قطر ذرات و درصد اکسیژن در مخلوط گازی بر زمان احتراق

در این قسمت به کمک مقایسه بین نمودار حاصل از آزمایشات حاضر با نمودار شکل (10) [10] زمان بدست آمده از احتراق ابر ذرات 5/6 میکرونی آلومینیوم با هوا مشخص می‌شود که اثر کاهش قطر با کاهش درصد اکسیژن جبران شده است به همین دلیل زمان احتراق ابر ذرات 5/6 میکرونی آلومینیوم بیشتر بدست آمده است. دلیل دیگر برای مشاهده این روند آنست که شکل ذرات در دو آزمایش با یکدیگر متفاوت می‌باشند. اما نکته مهم آن است که فرم دو نمودار به یکدیگر شبیه بوده و مقادیر بدست آمده در یک محدوده بوده که دلیلی دیگر برای صحت نتایج می‌باشد.



شکل 10- زمان احتراق ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم و زمان احتراق ابر ذرات 5/6 میکرونی آلومینیوم در هوا [10]

#### 5- نتیجه گیری

در این تحقیق زمان احتراق ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم در مخلوط گازی (25٪ اکسیژن و 75٪ نیتروژن) مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل شده است:  
زمان احتراق در طیف وسیعی از غلظت‌ها مورد محاسبه قرار گرفته است. زمان احتراق محاسبه شده نشان می‌دهد که زمان احتراق در محدوده میلی ثانیه می‌باشد. این مقدار در ناحیه غنی ( $\phi > 1$ ) در محدوده 2 الی 2/5 میلی ثانیه بدست آمده است.

با بررسی نتایج حاصل از آزمایشات ملاحظه گردید که احتراق ابر ذرات 18 میکرونی آلومینیوم همزمان تحت دو مکانیزم دیفیوژن و سینتیک رخ می‌دهد.

در ناحیه غنی به سبب وجود ذرات آلومینیوم کافی افزایش تعداد ذرات باعث تغییر محسوسی در زمان احتراق و سرعت سوزش نمی‌شود. اما در ناحیه رقیق به سبب کمبود ذرات آلومینیوم در دسترس برای واکنش افزایش تعداد ذرات آلومینیوم سبب افزایش تعداد واکنشها شده و در نتیجه سرعت سوزش افزایش یافته و زمان احتراق دچار کاهش می‌شود.  
با افزایش درصد اکسیژن در مخلوط گازی زمان احتراق کاهش یافته و سرعت سوزش افزایش می‌یابد علت آنست که افزایش درصد اکسیژن سبب می‌شود تعداد برخوردهای موثر واکنشی بین مولکول‌های اکسیژن و ذرات آلومینیوم بیشتر شده

که در نهایت کاهش زمان احتراق و افزایش سرعت سوزش را در پی خواهد داشت. این مطلب در نمودار شکل (8) مشخص است.

افزایش قطر ذره باعث می شود سطح موثر واکنشی ذرات کاهش یابد این مساله افزایش زمان احتراق و کاهش سرعت سوزش را در پی خواهد داشت.

همانطور که بیان شد کاهش قطر ذرات، کاهش زمان احتراق را در پی خواهد داشت و کاهش درصد اکسیژن در مخلوط گازی برعکس افزایش زمان احتراق را به دنبال دارد. در حالتیکه هر دو این تغییرات یعنی کاهش قطر ذرات و درصد اکسیژن را به صورت همزمان به وجود بیاید اثر کاهش درصد اکسیژن غالب بوده و زمان احتراق افزایش می یابد این مساله در نمودار شکل (10) به وضوح قابل مشاهده است.

## مراجع

- [1] Grant A. Risha, Brian J. Evans, And Eric Boyer, Department Of Mechanical And Nuclear Engineering The Pennsylvania State University "Potential Usage Energetic Nano-Sized Powders For Combustion And Rocket Propulsion" Materials Research Society Vol800, 2004
- [2] Grant A. Risha \*, Ying Huang†, Richard A. Yetter‡, And Vigor Yang § The Pennsylvania State University" Experimental Investigation Of Aluminum Particle Dust Cloud Combustion" 43rd Aerospace Sciences Meeting And Exhibit, January 10-13, 2005, Reno Hilton, Reno, Nevada
- [3] Grant A. Risha\*, Ying Huang†, Richard A. Yetter‡, And Vigor Yang § "Analysis of Nano-Aluminum Particle Dust Cloud Combustion in Different Oxidizer Environments" 43rd Aerospace Sciences Meeting And Exhibit, January 10-13, 2005, Reno Hilton, Reno, Nevada
- [4] E.L. Dreizin" Experimental Study of Aluminum Particle Flame Evolution in Normal and Micro-Gravity AeroChem Research Laboratory, Titan Research and Technology, Titan Corporation, Princeton, New Jersey USA
- [5]- Kuan, K., Kuo, Y., "Principles of Combustion", John Wiley & sons, 1986
- [6]- Dreizin, E.L., "Experimental Study of Stages in Aluminum Partiele Combustion in Air", Combustion and Flame, Vol.105, 541-556, 1996.
- [7] M. Bidabadi, M. Sedighi, M. Hashemi, "Flame Behavior in quenching distance of aluminum dust flame," The second international and fifth national conference of Iranian Aerospace (2004)
- [8] E.L. Dreizin "Phase changes in metal combustion" Progress in Energy and Combustion Science 26 (2000) 57-78
- [9] Grant A. Risha\*, Ying Huang†, Richard A. Yetter‡, And Vigor Yang § "Flame Propagation in Bimodal Nano/Micro-Sized Aluminum Particles/Air Mixtures" 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Reno, Nevada, January 09-12, 2006
- [10]. S. Goroshin, M. Bidabaid., and J.H.S. Lee, "Quenching Distance of Laminar Flame in Aluminum Dust Clouds," Combustion and Flame, Vol. 105, pp. 147-160, 1996.
- [11] Y. Shoshin, E. Dreizin "Particle combustion rates in premixed flames of polydisperse metal—air aerosols" Combustion and Flame 133 (2003) 275-287
- [12] P. BUCHER, R. A. YETTER, F. L. DRYER,\* AND E. P. VICENZI "Condensed-phase Species Distributions about Al Particles Reacting in Various Oxidizers" Princeton University, Princeton, NJ 08544-5263, USA(2003)