

بررسی تجربی رفتار احتراقی ابر ذرات آلومینیوم

مهدی بیدآبادی^۱، محمد صدیقی^۲، الیاس نعمتی^۳

تهران، میدان رسالت، خیابان هنگام، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک

آزمایشگاه تحقیقاتی احتراق

nemati@mecheng.iust.ac.ir

چکیده

احتراق ذرات کرووی آلومینیوم در شرایط فشار ثابت با تشکیل شعله پایدار انجام شده و رژیمهای سینتیک-دیفیوژن در احتراق آلومینیوم مشاهده گردید. افزایش درصد اکسیژن باعث افزایش سرعت سوزش ذرات و کاهش حجم حفره‌های احتراق نیافته گردیده و تعویض گاز بستر نیتروژن با آرگون، نرخ احتراق ذرات را افزایش می‌دهد. کاهش قطر ذرات شدت احتراق را افزایش داده و باعث انجام احتراق در فاز گاز می‌گردد. ضمن بررسی و تحلیل تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار احتراق ابر ذرات آلومینیوم، رابطه سرعت سوزش بر حسب غلظت ذرات بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی: ابر ذرات آلومینیوم- حفره‌های احتراق نیافته- رژیم سینتیک- رژیم دیفیوژن- سرعت سوزش.

۱- مقدمه

در موشکهای سوخت جامد، ناپایداری احتراق از مسائل حائز اهمیت بوده و تحقیقات فراوانی در جهت کاهش و رفع ناپایداری در محفظه احتراق اینگونه موشکها صورت پذیرفته است. افزودن ذرات آلومینیوم به ترکیب سوخت جامد، باعث غلبه بر ناپایداری احتراق موشک میگردد. در احتراق سوخت جامد، ذرات آلومینیوم مشتعل از سطح سوخت جدا شده و ضمن حرکت در گازهای حاصله از احتراق مواد هیدروکربنی، احتراق آنها ادامه می‌یابد. وجود ذرات آلومینیوم با توزیع قطری متفاوت و عمدتاً بصورت تجمع یافته در گازهای حاصل از احتراق در محفظه باعث جذب انرژی‌های ناشی از مدهای ناپایداری گردیده و بدین ترتیب ناپایداری احتراق کاهش می‌یابد. بنابراین شناخت رفتار احتراقی ذرات آلومینیوم با نسبت و توزیع قطری متفاوت از اهمیت بسزایی برخوردار است. به این منظور می‌توان با ایجاد احتراق در ابر ذرات آلومینیوم، به بررسی رفتار ذرات تجمع یافته پرداخت.

ذرات جامد مختلف هنگام احتراق رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در حالت کلی می‌توان گفت احتراق ذرات فلزی نسبت به سوخته‌های هیدروکربنی گرمای بیشتری آزاد کرده و نتیجه آن افزایش دمای شعله و ضربه ویژه سوخت می‌باشد. در احتراق ذرات جامد، دو رژیم احتراقی دیفیوژن و سینتیک قابل تعریف می‌باشد. در رژیم دیفیوژن، احتراق ذره بر اساس نفوذ اکسیژن یا اکسیدایزر به درون ذره یا به فضای اطراف آن در نزدیک سطح ذره انجام می‌گیرد ولی در رژیم سینتیک، احتراق بر روی سطح ذره صورت می‌پذیرد. مثلاً ذره‌ای مانند آلومینیوم ابتدا تبخیر شده و در فاصله‌ای نزدیک به سطح ذره، بخار اطراف آن می‌سوزد و معمولاً عمل اکسایش از طرفی که عمل تبخیر زودتر انجام می‌گیرد، شروع می‌شود [۱].

۱- استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران

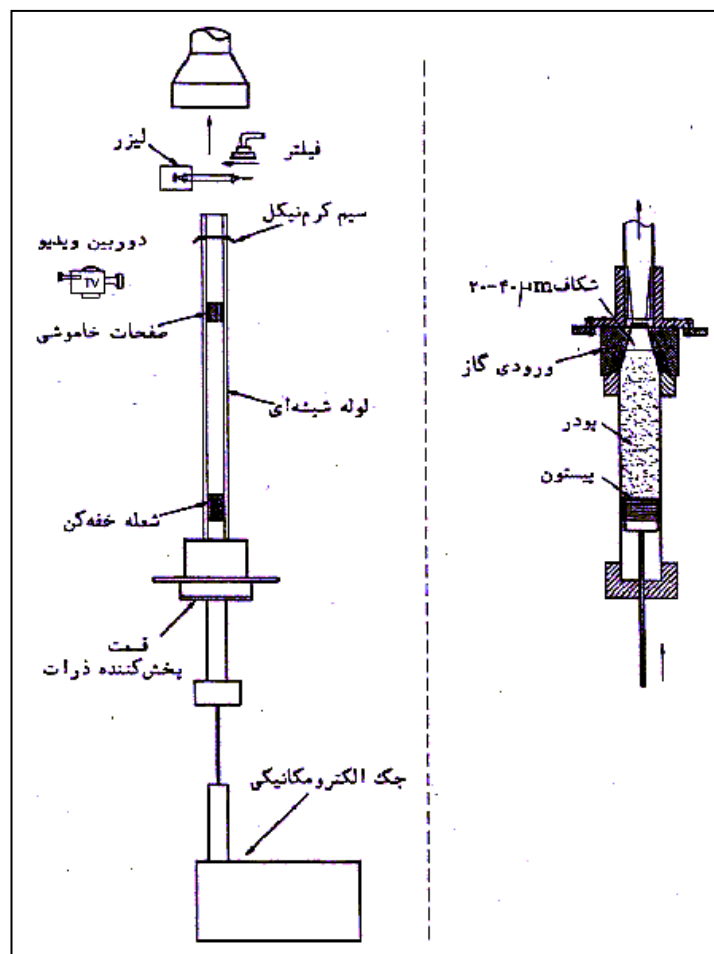
۲- عضو هیئت علمی دانشگاه هوایی

۳- محقق ارشد آزمایشگاه و مدرس دانشگاه هوایی

پارامترهای دینامیکی احتراق ابر ذرات آلومینیوم توسط بیدآبادی و همکاران اندازه‌گیری شده است [۲]. این مقاله به رفتارشناسی فرآیند احتراق ابر ذرات آلومینیوم و تاثیر پارامترهای مختلف بر آن پرداخته است.

۲- دستگاه آزمایش

برای بررسی احتراق ذرات ریز جامد در شرایط فشار ثابت، با تشکیل شعله آرام ابر ذرات آلومینیوم، از دستگاه احتراق ذرات، مطابق طرحواره‌ای که در شکل ۱ نشان داده شده است، استفاده نموده‌ایم. در سمت چپ شکل، قسمت‌های کلی دستگاه و در سمت راست آن، قسمت تزریق و پخش‌کننده ذرات با بزرگنمایی و وضوح بیشتری نشان داده شده است.

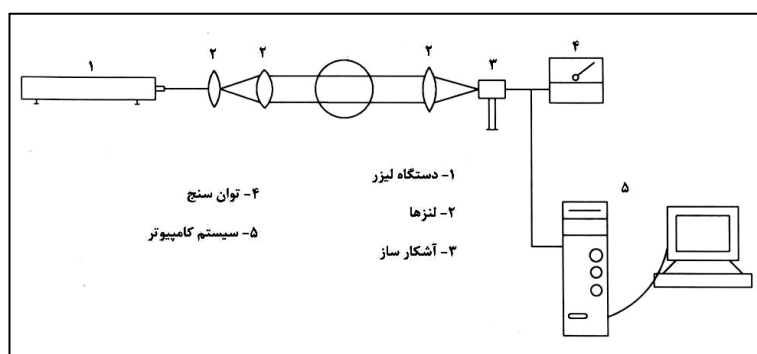


شکل ۱- طرحواره دستگاه آزمایش

ذرات سوخت بوسیله مجموعه سیلندر و پیستون که قطر داخلی سیلندر $2/5$ سانتیمتر و حداکثر طول کورس آن 16 سانتیمتر می‌باشد، به سمت بالا حرکت داده شده و توسط قسمت پخش‌کننده به داخل برنز شیشه‌ای تزریق می‌شوند. نسبت وزنی ذرات آلومینیوم به اکسیدایزر با تغییر سرعت پیستون به کمک جک الکترومکانیکی کنترل می‌شود. ذرات سوخت در پایین قسمت مخروطی تزریق‌کننده با برخورد جت هوای ورودی، با شدت جریان حدود 30 الی 90 لیتر بر دقیقه بصورت یکنواخت به داخل برنز پخش می‌شوند. برنز با قطر داخلی $4/6$ سانتیمتر، طول 150 سانتیمتر و از جنس شیشه پیرکس بوده و به قسمت بالای محفظه پخش‌کنندگی که دارای یک پخش‌کننده مخروطی 8 درجه می‌باشد، متصل است. وظیفه پخش‌کننده ذرات، انبساط مخلوط و ایجاد جریان یکنواخت لایه‌ای است. برای انجام آزمایش ذرات کروی شکل آلومینیوم با

اکسیدایزر و گاز بستر مورد نظر مخلوط شده و با عبور از داخل برنر، در قسمت بالایی برنر بوسیله سیستم ایجاد جرقه (سیم تنگستن) مشتعل می‌شوند. هنگام عبور مخلوط سوخت و اکسیدایزر از داخل برنر، تعدادی از ذرات به بدنه برنر می‌چسبند و در نتیجه غلظت مخلوط ورودی نسبت به غلظت مخلوط خروجی بیشتر است. به این دلیل نخست باید چند ثانیه برای ایجاد شرایط پایدار مخلوط را از داخل برنر عبور داد و آنگاه اقدام به تشکیل شعله نمود.

جهت اندازه‌گیری غلظت ذرات از پرتو لیزر هلیوم - نئون استفاده شده است. قطر پرتو تولیدی ۸ میلی‌متر بوده و در امتداد قطر لوله حاوی ذرات تابیده می‌شود. دستگاه لیزر در بالای لوله برنر قرار گرفته و ذرات بعد از خروج از لوله به پرتو لیزر برخورد می‌نمایند. قسمتی از پرتو توسط ذرات جذب یا متفرق شده و بقیه پرتو در سمت دیگر لوله وارد آشکارساز (Detector) می‌گردد. خروجی آشکارساز یک سیگنال آنالوگ بوده و توسط یک برد A/D، به سیگنال دیجیتال تبدیل می‌شود [۲]. توسط نرم‌افزاری به نام Genie خروجی کارت A/D در کامپیوتر خوانده می‌شود. طرح سیستم اندازه‌گیری غلظت در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- سیستم اندازه‌گیری غلظت ذرات

یکی از روشهای ایجاد شعله پایدار در بالای لوله، استفاده از سیم تنگستن می‌باشد. این سیم از میان دو قطعه سرامیک نسوز گذشته و به یک اتوترانس متصل می‌گردد. با تنظیم جریان اتوترانس در حدود ۱۰ آمپر، سیم تنگستن ملتهب شده و موجب شعله‌وری مخلوط می‌گردد.

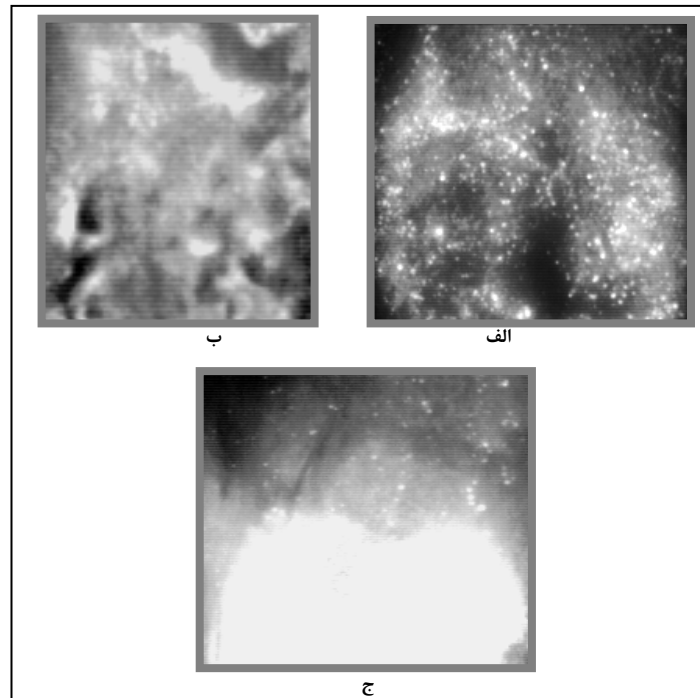
در دهانه خروجی برنر، هود سیستم تهویه قرار گرفته است. این هود با یک لوله انعطاف پذیر آلومینیومی به فیلتر کننده محصولات احتراق متصل شده که در بین آنها یک شعله خفه‌کن قرار دارد. پس از شعله خفه‌کن، فن سانتریفوژ جهت مکش محصولات احتراق تعبیه شده است. محصولات احتراق پس از گذشتن از فن فیلتر می‌شوند.

در آزمایشهای انجام شده از دوربین تصویربرداری سرعت بالا با قابلیت ثبت ۸۰۰۰ فریم در ثانیه استفاده گردیده است. دوربین یاد شده این امکان را به ما می‌دهد که بتوانیم رفتار احتراقی ذرات و مکانیزم احتراق را بدقت بررسی نموده و از روی ردیابی ذرات در تصاویر، زمان و سرعت سوزش ذرات، مکانیزم احتراق، پدیده تجمع (Agglomeration) و شدت احتراق را اندازه‌گیری و بررسی نمائیم.

۳- شرح آزمایش

در آزمایشهای انجام شده، از پودر کروی آلومینیوم به قطرهای ۲ و ۱۸ میکرون استفاده شده است. از دو گاز نیتروژن و آرگون بعنوان گاز بستر استفاده نموده و گازهای بکار رفته در آزمایشها شامل $(\text{N}_2, 70\%)$ ، $(\text{O}_2, 30\%)$ ، $(\text{N}_2, 83\%)$ ، $(\text{O}_2, 17\%)$ و $(\text{Ar}, 79\%)$ ، $(\text{O}_2, 21\%)$ می‌باشند. احتراق ذرات جامد با رژیم سینتیک کامل را که در آن ذرات جدا از هم گداخته شده و می‌سوزند، سوختن فاز جامد و احتراق ذرات جامد با رژیم دیفیوژن کامل را که در آن ذرات بصورت ممتد می‌سوزند و مشابه گازها شعله‌ور می‌شوند، سوختن فاز گاز نامگذاری می‌کنیم. نتایج نشانگر این است که مکانیزم احتراق

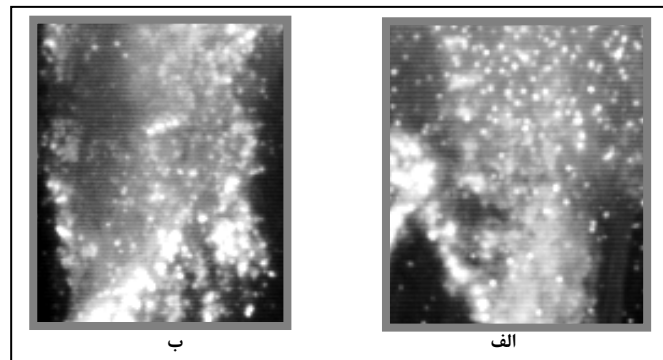
آلومینیوم نه دیفیوژن کامل و نه سینتیک کامل، بلکه در محدوده بین آن دو متغیر بوده و آن را سینتیک-دیفیوژن می‌نامیم. حالت‌های سینتیک، سینتیک-دیفیوژن و دیفیوژن برای ذرات کروی آلومینیوم در شکل ۳ نشان داده شده است. سوختن فاز جامد و فاز گاز ابر ذرات آلومینیوم در شکل‌های ۳ - الف و ۳ - ج دیده می‌شوند. در شکل ۳ - ب دیده می‌شود که بخشی از ذرات در فاز جامد و برخی دیگر در فاز گاز می‌سوزند. پس در نتیجه می‌توانیم احتراق ابر ذرات آلومینیوم در این شکل را سوختن فاز جامد-گاز نامید. قسمت‌های غیر شعله‌ور از شکل ۳ - الف و ۳ - ب را که تصاویر به رنگ تیره بوده و کنتراست زیادی با قسمت‌های شعله‌ور دارند، حفره‌های احتراق نیافته (Unburn Holes) نامگذاری می‌کنیم.



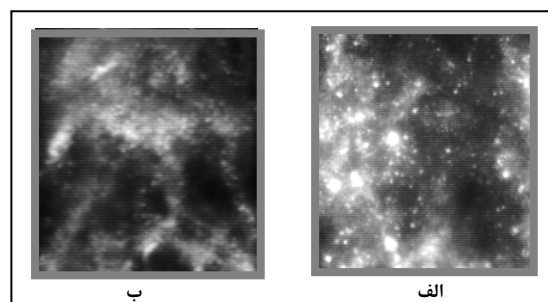
شکل ۳- رژیم‌های مختلف احتراق ذرات آلومینیوم با گاز بستر نیتروژن: الف) رژیم سینتیک، فاز جامد، قطر $2 \mu m$ و 21 درصد اکسیژن، ب) رژیم سینتیک-دیفیوژن، فاز جامد-گاز، قطر $18 \mu m$ و 21 درصد اکسیژن، ج) رژیم دیفیوژن، فاز گاز، قطر $18 \mu m$ و 30 درصد اکسیژن

با اینکه پودر آلومینیوم قبلاً بحد کافی در کوره خشک شده است، در اثر وزن ذرات انباشته شده بر روی هم، قرار گرفتن ذرات کوچک در بین ذرات بزرگتر و پر کردن فضای بین آنها و افزایش سطح اصطکاک، تاثیر گاز بستر و تاثیر غلظت ذرات، پدیده تجمع بوجود می‌آید [۳]. با اذعان به این مطلب که نمی‌توان تجمع را کاملاً از بین برد، به بررسی تاثیر عوامل مختلف بر روی پدیده تجمع می‌پردازیم.

غلظت ذرات یکی از پارامترهای مهم در تعیین نوع مکانیزم احتراق می‌باشد. دو نمونه آزمایش با غلظت ذرات آلومینیوم متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده است. با مقایسه آنها در شکل‌های ۴- الف و ۴- ب نتیجه می‌گیریم که افزایش غلظت، سرعت سوزش و شدت احتراق را افزایش می‌دهد. تجمع ذرات نیز با افزایش غلظت بیشتر شده ولی حفره‌های احتراق نیافته کوچکتر می‌گردند. همچنین با حرکت به سمت ناحیه غلیظ احتراق، شعله احتراق، فاز گاز مناسبتری را نشان می‌دهد. قطرهای مختلف ذرات که سایر پارامترهای مشابه دارند، با انجام دو آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. مقایسه شکل‌های ۵- الف و ۵- ب نشان می‌دهند که افزایش قطر ذرات آلومینیوم نسبت معکوس با سرعت سوزش و شدت احتراق داشته و باعث ایجاد تجمع‌های بزرگتر گشته و تقریباً شعله به سمت فاز گاز متمایل می‌شود.

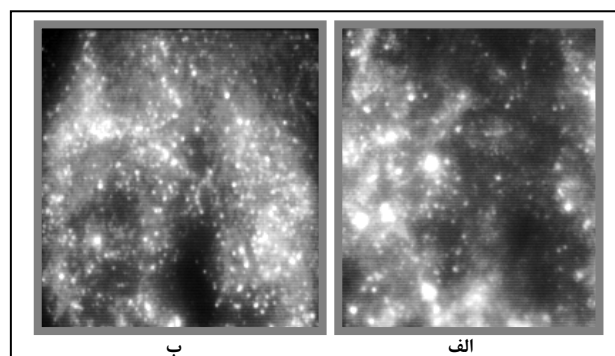


شکل ۴- تاثیر غلظت بر رفتار احتراق ذرات آلومینیوم: الف) غلظت 262 gr/cm^3 ، ب) غلظت 1108 gr/cm^3



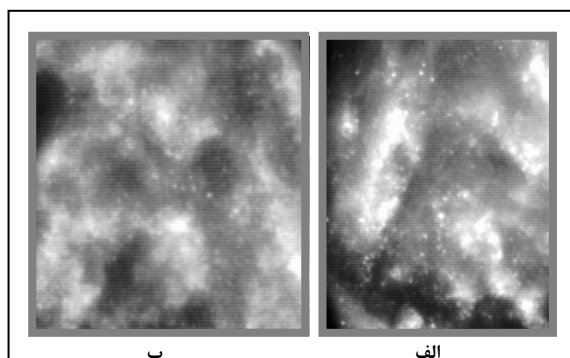
شکل ۵- تاثیر اندازه قطر بر رفتار احتراق ذرات آلومینیوم: الف) قطر $2 \mu\text{m}$ ، ب) قطر $18 \mu\text{m}$

تاثیر گازهای بستر نیتروژن و آرگون در شکل ۶ نشان داده شده است. مقایسه شکلهای ۶ - الف و ۶ - ب نشانگر آن است که افزایش گاز نیتروژن، شدت احتراق و سرعت سوزش را افزایش داده و تجمع ذرات کمتری را تشکیل می‌دهد. همچنین با تشکیل حفره‌های احتراق نیافته بزرگتر، شعله را بسمت فاز گاز هدایت می‌نماید. به دلیل شرکت گاز نیتروژن در واکنش احتراق، میزان تاثیر آن از گاز آرگون بیشتر است.



شکل ۶- تاثیر نوع گاز بستر بر رفتار احتراقی ذرات آلومینیوم: الف) گاز نیتروژن، ب) گاز آرگون

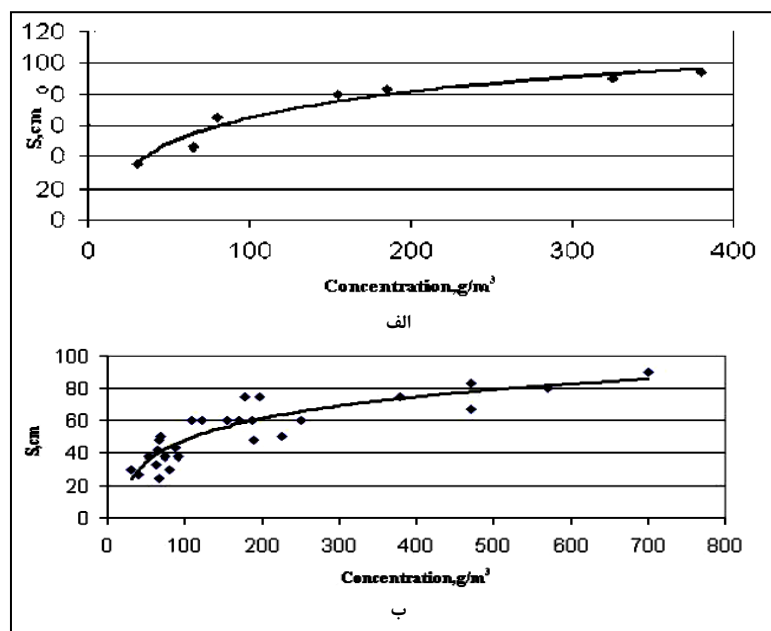
میزان اکسیدایزر در پروسه احتراق تاثیرگذار بوده و درصد اکسیژن مشخصی برای احتراق ذرات مورد نیاز است. افزایش درصد اکسیژن با توجه به شکل ۷ ، تاثیر مستقیم بر شدت احتراق و سرعت سوزش داشته و با کوچکتر شدن حفره‌های احتراقی، تجمع ذرات کمتر شده و شعله به سمت فاز گاز حرکت می‌کند.



شکل ۷- تاثیر میزان اکسیژن بر رفتار احتراق ذرات آلومینیوم: الف) ۳۰ درصد اکسیژن، ب) ۱۷ درصد اکسیژن

از ویژگیهای مهم پودر فلزی، افزایش سرعت سوزش سوخته‌های جامد می‌باشد [۴]. پودرهای فلزی این ویژگی را از دو جهت بالا می‌برند. از طرفی نفوذ حرارت را با انتقال حرارت بالایشان، سریعتر انجام داده و دمای سوخته‌های باقی مانده را در زمان کوتاه‌تری به حد درجه حرارت احتراق می‌رسانند [۵]. از طرف دیگر سوختن فلزات، حرارت زیادی ایجاد نموده و با بالا رفتن حرارت محفظه احتراق، سرعت سوزش نیز افزایش می‌یابد [۶].

برای اندازه‌گیری سرعت انتشار شعله در برنر (لوله شیشه‌ای)، لوله را به فواصل مساوی تقسیم نموده و علامت‌گذاری کرد، تا هنگام عبور شعله از پشت این نشانه‌ها بتوان زمان طی شدن فاصله بین دو نشانه را یاد داشت کرده و با دانستن فاصله بین دو نشانه سرعت انتشار شعله در آن ناحیه را بدست آورد. برای بدست آوردن سرعت سوزش شعله آرام، باید اعداد به دست آمده از آزمایشات سرعت انتشار شعله را بر عدد ۱/۵ که نسبت مساحت سطح شعله بر مساحت سطح مقطع لوله است تقسیم کرده و با استفاده از اعداد حاصل، نمودار سرعت سوزش تجربی شعله آرام را برای غلظت‌های مختلف رسم کرد. نمودار شکل ۸ بیانگر سرعت سوزش تجربی شعله آرام بر حسب غلظت‌های مختلف می‌باشد.



شکل ۸- نمودار سرعت سوزش ذرات آلومینیوم بر حسب غلظت ذرات برای قطرهای: الف) ۵ میکرون ب) ۱۸ میکرون

۴- نتیجه گیری

رفتار احتراقی ابر ذرات آلومینیوم و تاثیر عوامل مختلف بر آن بررسی گردید. مقایسه نتایج حاصله نشانگر این است که غلظت ذرات در احتراق ابر ذرات آلومینیوم، باعث افزایش سرعت سوزش و شدت احتراق گردیده و افزایش قطر ذرات، باعث کاهش آن می شود. این امر به دلیل این است که کاهش قطر ذرات، سطح موثر تماس ذرات با اکسیدایزر را افزایش می دهد و افزایش سطح تماس موثر سوخت با اکسیژن، باعث افزایش نرخ واکنش و کاهش زمان احتراق ذرات می گردد. همچنین افزایش غلظت ذرات، باعث بزرگتر شدن تجمع های ذرات گشته و تعداد حفره های احتراق نیافته را کاهش می دهد. کاهش قطر، تعداد حفره های احتراق نیافته را افزایش داده و باعث به وجود آمدن تجمع های ذرات بزرگتر می گردد.

حفره های احتراق نیافته در غلظت پایین ذرات و درصد پایین اکسیژن ایجاد می شوند. مکانیزم های سینتیک - دیفیوژن مشاهده شده در آزمایشها، نشان می دهد که احتراق ابر ذرات آلومینیوم در فازهای مختلف جامد - گاز انجام می گیرد.

مراجع

- 1- E.L, Dreizin, "On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion ", Combustion and Flame, vol. 117, pp. 841-850, 1999
- 2- Bidabadi, M., Seddighi, M., Hashemi, A., "Flame behavior in quenching distance of aluminum dust flames", The Second International and The Fifth National Conference of Iranian Aerospace Society, Esfahan, pp. 1-9, 2003
- 3- Dreizin, E.L., Shoshin, Y.L., Murdy, R.S., Hoffmann, V.K., "Constant pressure flames of aluminum and aluminum-magnesium mechanical alloy aerosols in microgravity" Combustion and Flame, vol. 130, pp. 381-385, 2002
- 4- Shoshin, Y.L., and Dreizin, E.L., "Production of well-controlled laminar aerosol jets and their application for studying aerosol combustion processes" Aerosol Science and Technology, vol. 36, pp 953-962, 2002.
- 5- Ermoline, A., Schoenitz, M., Dreizin, E., and Yao, N., "Production of carbon-coated aluminium nanopowders in pulsed microarc discharge" Nanotechnology, vol.13, pp 638-643, 2002
- 6- Shoshin, Y., and Dreizin, E., "Particle combustion rates in premixed flames of polydisperse metal-air aerosols" Combustion and Flame, vol. 133, pp.275-287, 2003