

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک

عنوان:

# مطالعه و بررسی احتراق ذرات فلزی

توسط:

محمد رضا حبیب زاده

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد  
در رشته مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

اساتید راهنما:

دکتر محمد حسن کیهانی

دکتر مهدی بیدآبادی (دانشگاه علم و صنعت ایران)

استاد مشاور:

مهندس محمد صدیقی (دانشگاه علم و صنعت ایران)

بهمن ۱۳۸۲

تقدیم به

پدر و مادرم

به پاس زحمات بی دریغشان

الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي لَا يَذُرُّكَ بَعْدَ الْهَمِّمْ وَلَا يَنَالُهُ غَوْصُ الْفِطْنِ.

سپاس خدای را که همتهای دورپرواز آدمیان از درک و احاطه به مقام شامخس نارسا، و حوزه اعلاى ربوبیش از نفوذ هشیاری هشیاران به دور است.

نهج البلاغه - خطبه ۱

### تقدیر و تشکر:

وظیفه خود می دانم که از زحمات و مساعدتهای ارزشمند اساتید محترم راهنما جناب آقای دکتر محمد حسن کیهانی و جناب آقای دکتر مهدی بیدآبادی تشکر و قدردانی نمایم. توفیق روزافزون ایشان را از درگاه خداوند متعال خواستارم.

همچنین از جناب آقای مهندس صدیقی که همواره با خلق نیکو پذیرایم بودند و از هیچ کمکی دریغ نورزیدند به پاس راهنماییهای بی دریغشان تشکر و قدردانی می نمایم.

از همکاری دوستان ارجمندم در آزمایشگاه تحقیقاتی احتراق آقایان هاشمی، خسروی، سنایی، فیصل، کشتی آراست و نعمتی کمال تشکر را دارم. همچنین از دوستان عزیزم آقایان اسکویی و زمان که در این راه مرا یاری رساندند قدردانی می نمایم. از درگاه ایزد منان، توفیق و سلامتی ایشان را خواستارم.

محمدرضا حبیب زاده

بهمن ۱۳۸۲

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول : کلیات
۲	۱-۱- مقدمه ای بر احتراق ذرات
۴	۲-۱- تاریخچه احتراق
۵	۳-۱- مروری بر ادبیات احتراق
۵	۱-۳-۱- انواع شعله های اساسی
۶	۱-۳-۲- دمای آدیباتیک شعله و شعله آدیباتیک
۶	۳-۳-۱- احتراق ابر ذرات
۸	۴-۳-۱- احتراق تک ذره
۸	۵-۳-۱- شعله آرام
۱۰	۶-۳-۱- شعله آشفته
۱۰	۷-۳-۱- سرعت انتشار شعله
۱۱	۸-۳-۱- سرعت سوزش
۱۲	۹-۳-۱- ضخامت شعله
۱۳	۱۰-۳-۱- فاصله خاموشی شعله
۱۳	۱۱-۳-۱- خاموشی شعله
۱۶	۱۲-۳-۱- حداقل انرژی جرقه

۱۶ ..... ۱-۳-۱۳- حدود اشتعال

### فصل دوم : بررسی رفتار احتراقی ذرات ریز فلزی

۱۹ ..... ۱-۲-۱- مقدمه

۲۰ ..... ۲-۲-۲- مقایسه انتشار شعله در ابر ذرات بُر، آلومینیوم، منیزیم، زیرکونیم و آهن

۲۵ ..... ۳-۲-۳- شعله‌های آرام پیش‌آمیخته در ابر ذرات بُر

۳۰ ..... ۴-۲-۴- سرعت سوزش در ابر ذرات غنی آلومینیوم

۳۸ ..... ۵-۲-۵- خاموشی شعله ذرات هوا

۴۴ ..... ۶-۲-۶- مطالعه میکروسکوپی احتراق ذرات آلومینیوم

۴۴ ..... ۱-۶-۲- پدیده‌های سطحی در احتراق آلومینیوم

۴۹ ..... ۲-۶-۲- بررسی مکانیزم احتراق نامتقارن ذره آلومینیوم

### فصل سوم : اندازه‌گیری تجربی سرعت سوزش در ابر ذرات آلومینیوم

۵۶ ..... ۱-۳-۱- مقدمه

۵۸ ..... ۲-۳-۲- شرح دستگاه

۵۸ ..... ۱-۲-۳-۱- ذرات سوخت

۵۹ ..... ۲-۳-۲- سیستم تزریق ذرات

۶۱ ..... ۳-۲-۳- قسمت اندازه‌گیری غلظت ذرات

صفحه	عنوان
۶۲	۳-۲-۴- سیستم جرقه
۶۳	۳-۲-۵- سیستم تهویه
۶۴	۳-۳- روش انجام آزمایش
۶۷	۳-۴- نحوه کالیبراسیون
۶۹	۳-۵- نتایج آزمایش
۶۹	۳-۵-۱- بررسی رفتار انتشار شعله
۷۵	۳-۵-۲- آزمایش سرعت سوزش ذرات آلومینیوم با قطر ۱۸ میکرون
۷۷	۳-۵-۳- آزمایش سرعت سوزش ذرات آلومینیوم با قطر ۲۸ میکرون
۷۹	۳-۵-۴- آزمایش سرعت سوزش ذرات آلومینیوم با قطر ۳۸ میکرون
۸۰	۳-۵-۵- آزمایش سرعت سوزش ذرات آلومینیوم با قطر ۵ میکرون
۸۲	۳-۵-۶- آزمایش سرعت سوزش ذرات آلومینیوم با قطر ۲ میکرون
۸۴	۳-۶- بحث و نتیجه گیری

#### فصل چهارم : بررسی تجربی فاصله خاموشی در ابر ذرات آلومینیوم

۸۹	۴-۱- مقدمه
۹۱	۴-۱-۱- روش صفحات خاموشی
۹۲	۴-۱-۲- نحوه عملکرد صفحات خاموشی
۹۳	۴-۱-۳- دیدگاه کاربردی صفحات خاموشی

صفحه	عنوان
۹۳	۲-۴- روش انجام آزمایش
۹۳	۳-۴- نتایج آزمایش
۹۴	۱-۳-۴- رفتار شعله آرام در صفحات خاموشی
۹۶	۲-۳-۴- آزمایش فاصله خاموشی ذرات آلومینیوم با قطر ۱۸ میکرون
۱۰۰	۴-۴- بحث و مقایسه در نتایج
۱۰۳	۵-۴- نتیجه‌گیری
۱۰۴	ضمیمه
۱۱۷	منابع و مراجع



## فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- نمای از یک شعله پیش آمیخته ذرات آلومینیوم در مخلوطی از اکسیژن - نیتروژن	۵
شکل ۲-۱- تصاویری از احتراق ابر ذرات آلومینیوم که توسط یک دوربین سرعت بالا با قابلیت تصویربرداری ۸۰۰۰ فریم در ثانیه بدست آمده است	۷
شکل ۳-۱- مسیر حرکت تک ذره در حال سوزش	۸
شکل ۴-۱- نمایی از احتراق تک ذره آلومینیوم	۸
شکل ۵-۱- شعله آرام با پیشانی سهمی شکل	۹
شکل ۶-۱- تصویری از یک شعله آشفته به همراه ورتکس هایی در پیشانی شعله	۱۰
شکل ۷-۱- نمودار تغییرات سرعت انتشار در ناحیه آرام به صورت تابعی از غلظت ذرات	۱۱
شکل ۸-۱- نمودار تغییرات سرعت سوزش در ناحیه آرام به صورت تابعی از غلظت ذرات	۱۲
شکل ۹-۱- اثر فشار بر فاصله خاموشی برای مخلوطهای پروپان	۱۵
شکل ۱۰-۱- فاصله خاموشی برای یک شکاف با عرض $d_{11}$ در برابر نسبت تعادلی F پروپان - هوا در دماهای مختلف شرکت کننده ها	۱۵
شکل ۱۱-۱- نمودار سرعت سوزش ذرات با قطر ۵ میکرون در ناحیه آرام بر حسب غلظت	۱۷
شکل ۱-۲- انتشار شعله در مخلوط آلومینیوم - هوا	۲۱
شکل ۲-۲- اثر غلظت ذرات بر سرعت سوزش	۲۲

## عنوان

## صفحه

- شکل ۳-۲- پیشانی شعله در ابر ذرات بُر ..... ۲۳
- شکل ۴-۲- طرحواره ای از دستگاه آزمایش بخش ۲-۳. (الف) قسمت اشتعال ذرات و (ب) نازل  
خنک کننده به همراه نگهدارنده شعله ..... ۲۵
- شکل ۵-۲- توزیع اندازه غبار ذرات بُر ..... ۲۷
- شکل ۶-۲- اثر غلظت بُر بر سرعت سوزش ..... ۲۸
- شکل ۷-۲- اثر ترکیب مخلوط گازی (نسبت  $He/O_2$ ) بر (۱) سرعت سوزش (۲) دمای شعله  
آدیاباتیک (۳) سرعت محاسبه شده با استفاده از فرمول (۱-۲) ..... ۲۸
- شکل ۸-۲- طرحواره ای از دستگاه سوزاننده ذرات بخش (۲-۴) ..... ۳۲
- شکل ۹-۲- تصویری از شعله بنسن ابر ذرات آلومینیوم در مخلوطی از اکسیژن - نیتروژن ... ۳۳
- شکل ۱۰-۲- وابستگی سرعت سوزش به غلظت ذرات در مخلوطهایی از  $Al-O_2-N_2$  با درصد  
اکسیژن مختلف ..... ۳۳
- شکل ۱۱-۲- نتایج آزمایشگاهی سرعت سوزش در مخلوطهای اکسیژن - هلیم و اکسیژن -  
آرگون به صورت تابعی از غلظت ذرات ..... ۳۵
- شکل ۱۲-۲- وابستگی دمای شعله آدیاباتیک در مخلوط  $Al-O_2-Ar$  به غلظت اکسیژن .... ۳۶
- شکل ۱۳-۲- پیش بینی رابطه تئوری در خصوص سرعت سوزش بر حسب غلظت ذرات در  
مخلوط  $Al-O_2-N_2$  با درصد اکسیژن مختلف ..... ۳۷
- شکل ۱۴-۲- دستگاه آزمایش جهت بررسی انتشار شعله مربوط به بخش (۲-۵) ..... ۴۰
- شکل ۱۵-۲- فاصله خاموشی شعله متان - هوا ..... ۴۱

عنوان	صفحه
شکل ۲-۱۶- نمودار فاصله خاموشی به عنوان تابعی از غلظت	۴۱
شکل ۲-۱۷- نتایج آزمایشهای فاصله خاموشی ذرات آلومینیوم مربوط به بخش (۲-۵)	۴۲
شکل ۲-۱۸- فاصله خاموشی به صورت تابعی از غلظت ذرات زغالسنگ با قطر کمتر از	
۲/۷ میکرون	۴۳
شکل ۲-۱۹- مسیر سقوط آزاد ذره آلومینیوم در حال سوزش	۴۶
شکل ۲-۲۰- نمایی از ذره آلومینیوم که در زمانهای مختلف احتراق در هوا سرد	
شده است	۴۷
شکل ۲-۲۱- نمودار دمای روشنایی ذرات آلومینیوم که در هوا محترق و در هلیوم در	
زمانهای مختلف سرد شده است	۴۸
شکل ۲-۲۲- طرحواره ای از اجزای دستگاه آزمایشگاهی GEMMED جهت بررسی	
احتراق تک ذره	۴۹
شکل ۲-۲۳- ردیابی ذره در حال سوزش با قطر اولیه ۲۵۰ میکرون در مخلوطی از	
اکسیژن/آرگون	۵۰
شکل ۲-۲۴- تصویر یک ذره آلومینیوم با قطر اولیه ۲۵۰ میکرون پس از گذشت	
۴۸ ms از سوختن در مخلوط هلیوم/اکسیژن که توسط یک میکروسکوپ	
الکترونی گرفته شده است	۵۱
شکل ۲-۲۵- تصویری از یک ذره آلومینیوم سرد شده با قطر اولیه ۲۵۰ میکرون که	
پس از گذشت ۷۲ ms از احتراق در مخلوط آرگون/اکسیژن بدست	
آمده است	۵۲

## عنوان

## صفحه

- شکل ۳-۱- تصویر میکروسکوپی ذرات آلومینیوم با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر ..... ۵۹
- شکل ۳-۲- نمایی از دستگاه آزمایش آزمایشگاه احتراق دانشگاه علم و صنعت ایران ..... ۶۰
- شکل ۳-۳- سیستم جرقه با استفاده از سیم کرم - نیکل ..... ۶۳
- شکل ۳-۴- نمایی از سیستم تهویه و متعلقات آن ..... ۶۴
- شکل ۳-۵- تصویری از شعله پایدار ذرات آلومینیوم ..... ۶۵
- شکل ۳-۶- نمایی از تقسیم بندی محفظه احتراق ..... ۶۶
- شکل ۳-۷- نمودار کالیبراسیون ذرات آلومینیوم با قطر ۱۸ میکرون ..... ۶۸
- شکل ۳-۸- تصاویری از شعله آرام ذرات آلومینیوم با پیشانی تخت ..... ۷۰
- شکل ۳-۹- تصاویری از شعله آرام با پیشانی سهمی شکل ..... ۷۰
- شکل ۳-۱۰- اعوجاجهای مشاهده شده در ناحیه آرام ..... ۷۱
- شکل ۳-۱۱- شعله آشفته با چین خوردگیهایی در پیشانی شعله ..... ۷۳
- شکل ۳-۱۲- کشیدگی در پیشانی شعله آشفته ..... ۷۳
- شکل ۳-۱۳- پیشروی ناحیه پیشگرم در داخل شعله ..... ۷۳
- شکل ۳-۱۴- چند تکه شدن شعله آشفته ..... ۷۴
- شکل ۳-۱۵- وجود ورتکسها در شعله آشفته ..... ۷۴
- شکل ۳-۱۶- نمای نزدیک شعله آشفته ..... ۷۴
- شکل ۳-۱۷- نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش بر حسب غلظت، قطر ذره ۱۸ میکرون ..... ۷۶
- شکل ۳-۱۸- نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش بر حسب غلظت، قطر ذره ۲۸ میکرون ..... ۷۸

عنوان	صفحه
شکل ۳-۱۹- نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش شعله آرام بر حسب غلظت، قطر ذره	
۳۸ میکرون .....	۸۰
شکل ۳-۲۰- نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش بر حسب غلظت، قطر ذره ۵ میکرون .....	۸۱
شکل ۳-۲۱- نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش بر حسب غلظت، قطر ذرات ۲ میکرون .....	۸۳
شکل ۳-۲۲- مقایسه سرعتهای سوزش شعله آرام برای ذرات با قطرهای ۲ و ۵ و	
۳۸ و ۲۸ و ۱۸ میکرون .....	۸۶
شکل ۳-۲۳- مقایسه سرعتهای سوزش شعله آشفته برای ذرات با قطرهای ۲ و ۵ و	
۲۸ و ۱۸ میکرون .....	۸۶
شکل ۴-۱- طرحواره عملکرد صفحات خاموشی .....	۹۱
شکل ۴-۲- صفحات خاموشی مورد استفاده در آزمایشگاه تحقیقاتی احتراق (دانشگاه	
علم و صنعت ایران) .....	۹۱
شکل ۴-۳- تصویر شعله در هنگام برخورد با صفحات خاموشی .....	۹۴
شکل ۴-۴- رفتار شعله در صفحات خاموشی .....	۹۵
شکل ۴-۵- فاصله خاموشی بر حسب تغییرات غلظت برای ذرات با قطر ۱۸ میکرون	
در مخلوط گازی ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن .....	۹۷
شکل ۴-۶- فاصله خاموشی بر حسب تغییرات غلظت برای ذرات با قطر ۱۸ میکرون	
در مخلوط گازی ۳۰٪ اکسیژن و ۷۰٪ نیتروژن .....	۹۸

صفحه	عنوان
۹۹	شکل ۷-۴- فاصله خاموشی بر حسب تغییرات غلظت برای ذرات با قطر ۱۸ میکرون در مخلوط گازی ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ آرگون
۱۰۰	شکل ۸-۴- نتایج تجربی فاصله خاموشی بر حسب غلظت ذرات آلومینیوم با قطر ۱۸ میکرون در مخلوط گازی ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن (بر اساس نتایج صدیقی [۳۰])
۱۰۱	شکل ۹-۴- مقایسه نتایج تجربی فاصله خاموشی ذرات ۱۸ میکرون در مخلوطهای گازی (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) و (۳۰٪ اکسیژن و ۷۰٪ نیتروژن)
۱۰۲	شکل ۱۰-۴- مقایسه نتایج تجربی فاصله خاموشی ذرات ۱۸ میکرون در مخلوطهای گازی (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) و (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ آرگون)

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
	جدول الف-۱- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۱۸ میکرون جهت اندازه گیری
۱۰۵	سرعت سوزش
	جدول الف-۲- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۲۸ میکرون جهت اندازه گیری
۱۰۶	سرعت سوزش
	جدول الف-۳- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۳۸ میکرون جهت اندازه گیری
۱۰۷	سرعت سوزش
	جدول الف-۴- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۵ میکرون جهت اندازه گیری
۱۰۸	سرعت سوزش
	جدول الف-۵- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۲ میکرون جهت اندازه گیری
۱۰۹	سرعت سوزش
	جدول الف-۶- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۱۸ میکرون در مخلوط گازی
۱۱۰	(۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) جهت بررسی فاصله خاموشی
	جدول الف-۷- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۱۸ میکرون در مخلوط گازی
۱۱۲	(۳۰٪ اکسیژن و ۷۰٪ نیتروژن) جهت بررسی فاصله خاموشی
	جدول الف-۸- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۱۸ میکرون در مخلوط گازی
۱۱۴	(۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ آرگون) جهت بررسی فاصله خاموشی

## چکیده:

امروزه جهت شناخت رفتار احتراقی ابر ذرات جامد، مطالعات گسترده‌ای توسط محققین انجام می‌گیرد. در واقع کاربردهای متعدد انرژی فراوان حاصل از احتراق این ذرات به همراه موضوع ایمن سازی صنایع درگیر با انفجار ذرات جامد لزوم انجام تحقیقات در این زمینه را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در این راستا شناخت مکانیزم انتشار شعله ذرات ریز جامد به همراه بررسی پارامترهایی نظیر سرعت سوزش و فاصله خاموشی هدف مطالعاتی بسیاری از محققین در این زمینه می‌باشد. آزمایشگاه تحقیقاتی احتراق دانشگاه علم و صنعت ایران نیز با توجه به مناسب بودن دستگاه و امکانات آزمایشگاهی موجود، گامهای مؤثری را در این زمینه برمی‌دارد. در این پروژه سعی شده است با به کارگیری امکانات آزمایشگاهی فوق، رفتار احتراقی ابر ذرات آلومینیوم به همراه پارامترهای سرعت سوزش و فاصله خاموشی مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور از یک محفظه احتراق فشار ثابت که شعله در داخل آن در مخلوطی از گازهای مختلف و ذرات آلومینیوم در جهت شتاب ثقل منتشر می‌شود استفاده شده است. سری اول آزمایشات با هدف بررسی تغییرات سرعت سوزش شعله آرام و آشفته بر حسب غلظت ذرات در مخلوطی از هوا و ذراتی به قطر ۳۸،۲۸،۱۸،۵،۲ میکرون انجام شده است. سری دوم آزمایشات نیز با هدف بررسی فاصله خاموشی در ابری از ذرات آلومینیوم با قطر ۱۸ میکرون در سه مخلوط گازی متفاوت انجام شده است. همچنین با استفاده از مشاهدات آزمایشات سری اول، رفتار شعله در داخل محفظه احتراق مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.



## ۱-۱- مقدمه ای بر احتراق ذرات [۲۰۱]

مواد جامد بسیاری وجود دارند که قابلیت احتراق داشته و در صورتیکه شرایط محیطی جهت اشتعال آن فراهم شود، شروع به سوختن می نمایند. این شرایط که در نهایت منجر به ایجاد یک جرقه می گردد تا حدود زیادی به طبیعت و ابعاد ذره جامد بستگی دارد. معمولاً قابلیت احتراق ذرات جامد با کاهش اندازه آنها به شدت افزایش می یابد به خصوص اگر ذرات جامد به شکل پودر و یا غبار درآیند که در این صورت شرایط جهت احتراق به مراتب مساعدتر می گردد و در این حالت نه تنها سریع تر محترق گشته بلکه سرعت سوزش آنها نیز افزایش می یابد. دلیل این امر به میزان اکسیژن نفوذ کرده به داخل توده ذرات بر می گردد. در واقع در حالت فوق الذکر هوا یا اکسیژن راحت تر به درون توده ذرات نفوذ کرده و افت حرارتی سطح سوزش کمتر می تواند به داخل جسم رخنه کند.

هنگامی که فاصله بین ذرات زیاد می شود، زمینه مناسب جهت سوختن سریع مهیا می گردد، چرا که هوای کافی جهت احتراق، بین ذرات قرار می گیرد. حال اگر این پتانسیل بالا که در احتراق ذرات ریز جامد وجود دارد خارج از کنترل به فعلیت در آید می تواند باعث خطرات فاجعه آمیز و آسیب دیدگی شود. چرا که نرخ سریع سوزش ذرات بر روی تغییرات فشار اثر گذاشته و باعث گسترده‌گی شعله می گردد.

ذراتی که در اکثر صنایع وجود دارد، قابل احتراق می باشند. این ذرات ممکن است مستقیماً تولید گردند و یا در اثر سایر تولیدات صنایع بوجود آیند. بعنوان مثال می توان از ذره آرد، شکر، ذرت، پلاستیک ها و فلزات، زغالسنگ و مواد دارویی که مستقیماً در صنایع تولید می شوند نام برد.

از جمله ذراتی که به صورت ناخواسته و در هنگام تولیدات صنعتی بوجود می‌آیند، براده های چوب، کرک و منسوجات و انواع دیگر براده ها می باشد. در هر صورت همگی این ذرات قابلیت احتراق داشته و در صورت فراهم شدن شرایط اشتعال و یا انفجار بسیار خطرناک می باشند. این انفجارها معمولاً زمانی رخ می دهد که ذرات در هوا پراکنده می گردند و منبع جهت ایجاد جرقه وجود داشته باشد، در حالیکه آتش سوزی ذرات در حالات توده ای، لایه ای و غیره می تواند رخ دهد. ذکر این نکته ضروری است که سرعت انتشار انفجار ناشی از ذرات به قدری زیاد است که می توان گفت اگر انفجار رخ دهد تلاش در جهت خنثی کردن اثرات زیانبار آن بیهوده است.

به طور کلی مجموع مباحث موجود در احتراق ذرات ریز جامد را می توان در دو بحث عمده «تکنولوژی مدرن احتراق» و «پیشگیری و ایمنی» خلاصه نمود. امروزه احتراق ذرات ریز جامد به لحاظ تکنولوژی مدرن احتراق در صنایع نظامی و صنایع هوا فضا کاربردهای متنوع و متعددی دارد که از آن جمله می توان به استفاده از ذرات فلزی در سوخت موشکهای جامد سوز به منظور افزایش پایداری احتراق و افزایش راندمان احتراق اشاره نمود. در واقع ارزش سوخت جامد که تولید انرژی فراوان مشخصه بارز آن بوده زمانی نمایانتر می گردد که محدودیت حجمی و وزنی وجود داشته باشد.

از طرفی وجود غبار ذرات در صنایع باعث ایجاد مشکلات عدیده ای می گردد که پیشتر تشریح شد. مطالب ذکر شده مبین این مطلب بوده که جهت جلوگیری از انفجارهای ناخواسته غبار ذرات در صنایع و استفاده بهینه از ذرات فلزی در موشکها، نیاز به فعالیتهای تحقیقاتی مناسب می باشد. در این راستا شناخت مکانیزم انتشار شعله ذرات ریز جامد در ابری از ذرات، هدف مطالعاتی بسیاری

از محققین در این زمینه می‌باشد. برای شناخت این مکانیزم عمدتاً پارامترهایی نظیر سرعت سوزش و فاصله خاموشی مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد.

ضمناً ذکر این نکته ضروری است که در مبحث اشتعال و ذرات تعریف واحدی در خصوص عبارت ذره وجود نداشته و در عمل عبارت ذره و پودر بدون هیچ فرقی استفاده می‌گردند. برای اهداف موجود در این پایان نامه هر دو عبارت قابل استفاده بوده ولی در بیشتر موارد از عبارت ذره استفاده گردیده است. البته این نامگذاری را می‌توان براساس قطر انجام داد. بر طبق استاندارد انگلیسی، ذرات با قطر کمتر از یک میکرون را دود یا غبار و ذرات بزرگتر از یک میکرون را ذره و ذرات با ماکزیمم ابعاد کمتر از هزار میکرون را پودر می‌نامند.

## ۱-۲- تاریخچه احتراق

بیش از صد سال قبل، انفجار در معادن زغال سنگ تنها بواسطه وجود ذرات، پذیرفته شده بود. هنگامی قضیه احتراق ذرات از اهمیت بیشتری برخوردار شد که در سده اخیر انفجاراتی در صنایع بیشمار دیگری که با ذرات سر و کار داشتند به وقوع پیوست و خطرات انفجار ذرات و نیاز به توجهات کافی در مورد آنها یادآور شد. انفجارات مهم به ثبت رسیده در ایالات متحده و کانادا از سال ۱۸۶۰ میلادی شامل معادن زغال سنگ نشانگر خرابیهای فراوان به بار آمده در کارخانه ها و بناها می‌باشد. در انگلستان آماری از تعداد انفجارها و تلفات ناشی از آن ارائه نگردیده است. ولی تعداد میانگین انفجار ذرات در این کشور در سالهای اخیر ۲ تا ۳ مورد در ماه گزارش گردیده است.

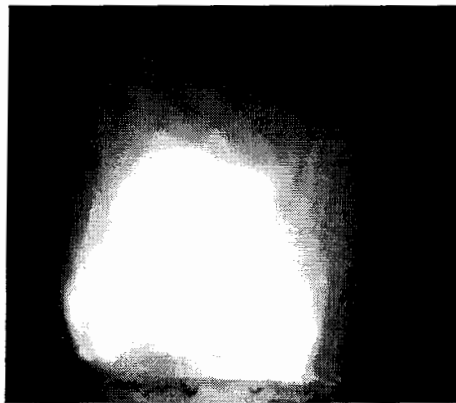
### ۱-۳- مروری بر ادبیات احتراق

جهت شناخت و بررسی رفتار احتراقی ذرات ریز جامد لازم است مفاهیم اولیه و پارامترهای احتراقی ذرات جامد نظیر انواع شعله ها، دمای آدیاباتیک شعله، سرعت انتشار، سرعت سوزش، شعله آرام، شعله آشفته و... مورد مطالعه قرار گیرد. در این بخش به ذکر مفاهیم و تعاریف موارد فوق الذکر می پردازیم.

#### ۱-۳-۱- انواع شعله های اساسی [۳]

در فرایندهای احتراق، سوخت و اکسید کننده مخلوط شده و می سوزند. احتراق را بر اساس زمان مخلوط شدن سوخت و اکسید کننده به دو دسته پیش آمیخته<sup>۱</sup> و غیر پیش آمیخته<sup>۲</sup> تقسیم می کنند. به آن دسته از شعله هایی که در آن سوخت و اکسید کننده پیش از احتراق مخلوط می شوند شعله پیش آمیخته و به آن دسته از شعله هایی که در آن فرایند احتراق و مخلوط شدن سوخت و اکسیدایزر به صورت همزمان رخ می دهد شعله غیر پیش آمیخته گفته می شود.

شکل (۱-۱) نمایی از یک شعله پیش آمیخته را نشان می دهد که در آزمایشگاه احتراق توسط



شکل ۱-۱- نمایی از یک  
شعله پیش آمیخته ذرات  
آلومینیوم در مخلوطی از  
اکسیژن - نیتروژن

<sup>۱</sup> Premixed

<sup>۲</sup> Non Premixed

یک دوربین سرعت بالا بدست آمده است.

### ۱-۳-۲- دمای آدیاباتیک شعله و شعله آدیاباتیک

در یک فرایند احتراقی که به صورت آدیاباتیک انجام شده باشد، درجه حرارت محصولات احتراق را دمای آدیاباتیک شعله می نامند. در واقع دمای آدیاباتیک شعله با فرض اینکه تغییری در انرژی جنبشی و پتانسیل رخ ندهد و کاری انجام نشود، حداکثر دمایی است که مواد اولیه پس از احتراق به آن می رسند، چون هیچ انتقال حرارتی انجام نمی گیرد و هیچ احتراق ناقصی باعث کاهش دمای محصولات نمی شود. البته واقعیت این است که تمام شعله ها حرارت خود را به محیط اطراف منتقل می کنند. ولی اغلب در بررسیهای تئوریک شعله، آن را آدیاباتیک فرض می کنند. برای نزدیک شدن به طرح آدیاباتیک شعله، می توان شعله را در یک لوله و یا چراغی که با محیط اطراف خود تبادل حرارتی کم و خیلی سریع داشته، در نظر گرفت.

در انتشار شعله در یک کانال باریک، از آنجا که قطر کانال کوچک تر از طول آزاد انتشار تشعشع در مخلوط ذرات ساکن می باشد، بنابراین تشعشع حاصل از پیشانی شعله و ناحیه محصولات احتراق در عبور از کانالها، به طور کامل بوسیله دیوارهای کانال جذب می شود.

### ۱-۳-۳- احتراق ابر ذرات [۴]

احتراق ابر ذرات مدلی برای بررسی پارامترهای شعله و رفتار احتراقی ذرات ریز جامد می باشد. در این مدل از گسترش شعله در میان ابری از ذرات به عنوان بحث پایه جهت تحلیل پارامترهای احتراقی استفاده می گردد. ابر ذرات شامل مجموعه نسبتاً یکنواختی از ذرات می باشد که دارای

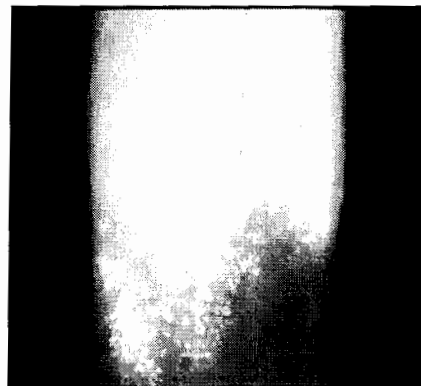
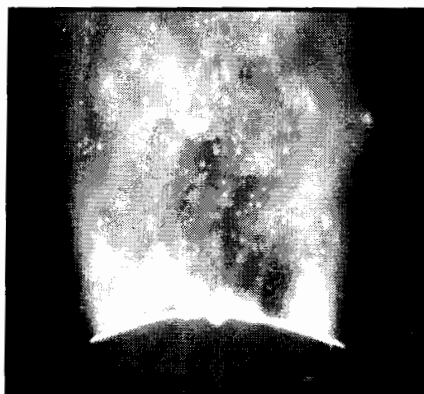
قطر متوسط پایین هستند. در احتراق ابر ذرات که ایجاد ابر ذرات یکنواخت از جمله الزامات آن است، نوع سیستم پراکنش مهم می‌باشد.

همچنین اندازه قطر ذرات در احتراق ابر ذرات نقشی به سزا دارد. به طوریکه هرچه اندازه قطر ذرات کم شود، احتراق در ابر ذرات می‌تواند خیلی سریعتر انجام شده و حتی انفجارهای جدی و خطرناکی را بوجود آورد. به این ترتیب با توجه به مطالعات تجربی، ذرات با قطر کمتر از ۱۰۰ میکرون می‌توانند خصوصیات ابر ذرات یکنواخت جهت احتراق ابر ذرات را داشته باشند.

بعلاوه ابر ذرات فلزی که نقطه جوش آنها بیشتر از دمای شعله می‌باشد جهت انجام مطالعات پایه مناسبترین می‌باشد. احتراق ابر ذرات فلزی به سبب خصوصیات بارز آن در تولید انرژی،

مدرتهاست که هدف مطالعات محققین در این زمینه می‌باشد. شکل (۱-۲) تصاویری از احتراق

ابر ذرات می‌باشد که توسط دوربین سرعت بالا در آزمایشگاه تحقیقاتی احتراق دانشکده مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران بدست آمده است.

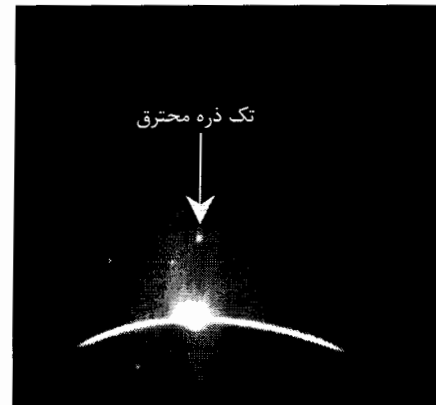
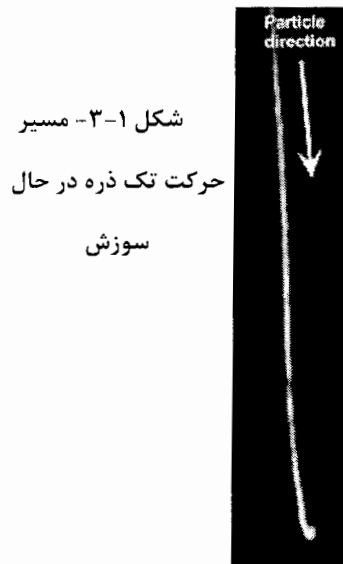


شکل ۱-۲- تصاویری از احتراق ابر ذرات آلومینیوم که توسط یک دوربین سرعت

بالا با قابلیت تصویربرداری ۸۰۰۰ فریم درثانیه بدست آمده است.

### ۱-۳-۴- احتراق تک ذره

احتراق تک ذره مدلی است که در آن یک ذره ریز جهت شناسایی رفتار احتراقی محترق می‌گردد. در واقع احتراق تک ذره یک نوع مطالعه در ابعاد میکروسکوپی می‌باشد. در این زمینه می‌توان به کارهای Edward L. Dreizin اشاره نمود. وی با محترق نمودن یک ذره آلومینیوم در محفظه‌ای خاص، ویژگیهای احتراق آلومینیوم نظیر نوارهای روشنایی، تغییرات سرعت ذرات در حال احتراق، زمان احتراق، تأثیر اکسیدایزر بر احتراق، انفجارهای کوچک در پایان احتراق و احتراق غیر متقارن را مورد بررسی قرار داده است [۶۵]. اشکال (۱-۳) و (۱-۴) احتراق یک تک ذره را نشان می‌دهند. در خصوص احتراق تک ذره در بخش بعد به طور مفصل بحث خواهد شد.

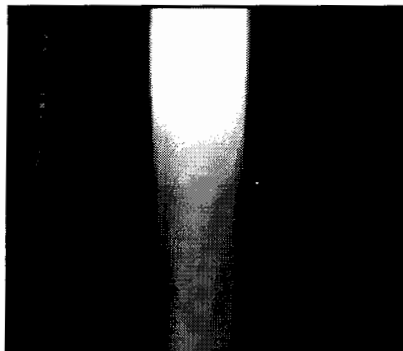


### ۱-۳-۵- شعله آرام

شعله آرام عبارتست از یک لایه نازک و بدون اعوجاج و صاف که دو ناحیه مخلوط سوخته نشده و محصولات احتراق را از یکدیگر جدا می‌کند. برای ایجاد یک شعله آرام، یکی از مشکلات حضور نیروی جاذبه است. در محیطهای غیر همگن، مانند مخلوط ذرات ریز جامد و هوا، ذرات تحت تاثیر

نیروی جاذبه به مرور ته نشین می‌شوند و همین امر باعث افزایش غلظت سوخت و پیرو آن ایجاد شعله آشفته می‌گردد. با توجه به اهمیت نیروی جاذبه در بروز مشکلات آزمایشگاهی، روشها و مکانیزمهای متفاوتی برای توزیع ذرات پیشنهاد شده است که هر کدام به نوعی سعی در حذف و یا کاهش اثر جاذبه در جریان آزمایشات دارند که از آن جمله می‌توان به روش جاذبه ناچیز<sup>۱</sup>[۷]، روش جاذبه صفر<sup>۲</sup>[۸]، تعلیق ذرات به روش الکتروستاتیکی<sup>۳</sup>[۹]، تعلیق استاتیکی به روش الکتروستاتیکی<sup>۳</sup>[۹]، روش تعلیق ناگهانی<sup>۴</sup>[۱۰] و روش بستر سیالی شده<sup>۵</sup>[۱۱] اشاره نمود. روش مورد استفاده در آزمایشگاه تحقیقاتی احتراق دانشگاه علم و صنعت ایران روش بستر سیالی شده است که شرح آن به طور کامل در فصل سوم آمده است.

در ناحیه‌ای که شعله آرام تشکیل می‌شود، شعله با سرعت ثابت منتشر می‌گردد. پیشانی شعله آرام، بدون اعوجاج و تقریباً تخت و یا سهمی شکل می‌باشد. شکل (۱-۵) تصویری از شعله آرام ابر ذرات آلومینیوم را در مخلوطی از اکسیژن- نیتروژن نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵- شعله آرام  
با پیشانی سهمی شکل

<sup>1</sup> Microgravity

<sup>2</sup> Electrostatic Particulate Suspension

<sup>3</sup> Electrostatic Particulate Static Suspension

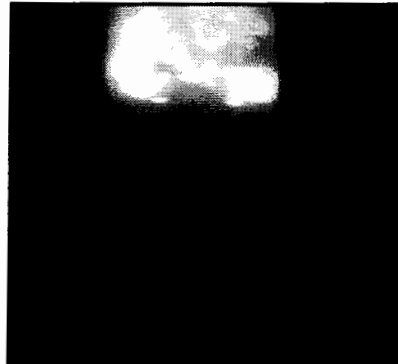
<sup>4</sup> Impulse Method

<sup>5</sup> Fluidized bed



### ۱-۳-۶- شعله آشفته

از مشخصه های کلی احتراق ابر ذرات، وجود اغتشاش قابل ملاحظه در مخلوط نسوخته قبل از عبور شعله می باشد. در این حالت در صورتیکه غلظت ذرات جهت ایجاد شعله آشفته مناسب باشد، شعله آشفته تشکیل می گردد. در یک شعله آشفته، شعله به یک ناحیه واکنش توزیع شده تبدیل نمی شود. بلکه به نواحی واکنش متنوع تقسیم می گردد [۱۲]. در ناحیه ای که شعله آشفته تشکیل می گردد، سرعت شعله با شتاب زیادی افزایش می یابد. پیشانی شعله آشفته دارای اعوجاجهای نامنظم و اشکال مختلف می باشد که از آن جمله می توان به چین خوردگیهای نامنظم، وجود ورتکسها در پیشانی و ... اشاره نمود. شکل (۱-۶) تصویری از یک شعله آشفته را نشان می دهد.



شکل ۱-۶- تصویری از یک شعله آشفته به همراه ورتکس هایی در پیشانی شعله

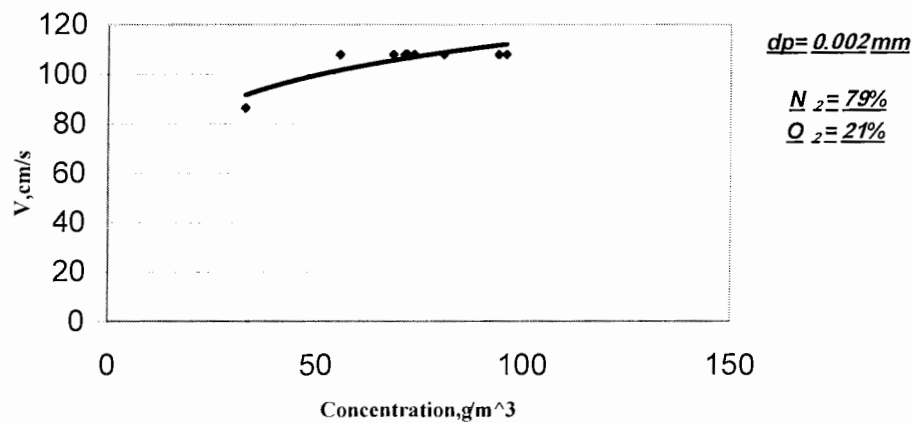
### ۱-۳-۷- سرعت انتشار شعله

در محیط ذرات ریز جامد با ایجاد جرقه مناسب، شعله ای ایجاد گردیده و در صورتی که بستر سیال محتوی ذرات جهت انتشار شعله مناسب باشد، شعله با سرعت خاصی که بستگی به غلظت

ذرات و نوع گاز ترکیبی با ذرات دارد، شروع به حرکت می‌نماید. سرعت انتشار شعله یکی از پارامترهای دینامیکی شعله بوده و معیار مهمی در جهت شناخت آن می‌باشد.

سرعت شعله تابعی از غلظت ذرات ریز جامد می‌باشد و با تغییر غلظت ذرات سرعت انتشار شعله در محیط ذرات ریز جامد تغییر می‌نماید. جهت اندازه‌گیری سرعت شعله می‌توان از روشهای تصویر برداری و یا سنسورهای مناسب استفاده کرد.

شکل (۷-۱) نشان دهنده تغییرات سرعت انتشار شعله به صورت تابعی از غلظت ذرات می‌باشد.



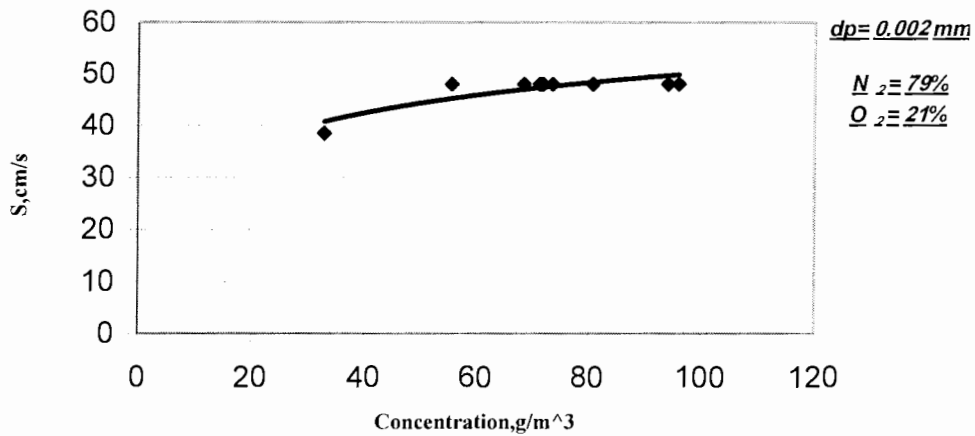
شکل ۷-۱- نمودار تغییرات سرعت انتشار در ناحیه آرام به صورت تابعی از غلظت ذرات

### ۱-۳-۸- سرعت سوزش<sup>۱</sup>

سرعت سوزش نرخ تبدیل ناحیه سوخته نشده به ناحیه سوخته شده می‌باشد. سرعت سوزش ذرات یکی از مهمترین کمیت‌های مورد نظر ما بوده که اندازه‌گیری آن به طور مستقیم امکان پذیر نمی‌باشد. برای بدست آوردن سرعت سوزش باید ابتدا مقدار سرعت انتشار شعله را بدست آورد و

<sup>۱</sup> Burning Velocity

سپس بر نسبت سطح شعله به سطح مقطع لوله آزمایش احتراق ذرات که برای تمام غلظت‌ها تقریباً برابر ۱/۵ الی ۲ می باشد تقسیم نمود. شکل (۸-۱) نشان دهنده سرعت سوزش برحسب غلظت ذرات می باشد.



شکل ۸-۱- نمودار تغییرات سرعت سوزش در ناحیه آرام به صورت تابعی از غلظت ذرات

### ۱-۳-۹- ضخامت شعله<sup>۱</sup>

ضخامت شعله که با نماد  $\delta$  نشان داده می شود، عبارت از یک لایه بسیار نازک بوده که دو ناحیه سوخته نشده و سوخته شده را از هم جدا می نماید. اندازه گیری ضخامت شعله ذرات ریز جامد به دلیل پیچیدگیهایی که دارد و بدلیل تأثیر غلظت ذرات بر آن کار بسیار مشکلی می باشد. از برابر قرار دادن نرخ حرارت تولید شده در شعله با نرخ حرارت تلف شده از ناحیه شعله در جدار لوله، ضخامت شعله برحسب فاصله خاموشی بدست می آید.

<sup>۱</sup> Flame Thickness

### ۱-۳-۱۰- فاصله خاموشی شعله<sup>۱</sup>

فاصله ایست که شعله در بین صفحاتی که در مسیر حرکتش قرار می گیرد خاموش می گردد. این فاصله معمولاً بین ۳-۷ میلی متر می باشد. فاصله خاموشی که با نماد  $d_q$  نشان داده می شود، یکی از بنیادی ترین پارامترهای دینامیکی شعله می باشد.

### ۱-۳-۱۱- خاموشی شعله<sup>۲</sup> [۱۳]

مسئله اصلی در خاموشی شعله تعیین حداکثر اندازه گذرگاههایی از قبیل قطر لوله، اندازه مجرا یا فاصله بین صفحاتی است که شعله از میان آنها نتواند عبور کند. اگر شعله بخواهد منتشر شود، آزاد شدن انرژی در اثر واکنش شیمیایی باید بتواند درجه حرارت ناحیه واکنش را به اندازه کافی بالا ببرد تا واکنش سریع، تقویت گردد. اگر انتقال حرارت به سطوح اطراف به اندازه کافی زیاد باشد، دما افت پیدا خواهد کرد و واکنش کند می گردد. همانطور که واکنش کند می گردد، نرخ آزاد شدن انرژی پایین آمده و درجه حرارت به زیر دمای اشتعال نزول پیدا خواهد کرد و شعله خاموش می شود. همین پدیده نیز در محفظه‌های احتراق در جاییکه دمای لایه مرزی نزدیک سطوح فلزی، به پایین تر از دمای اشتعال می رسد مشاهده می شود.

برای یک مخلوط مشخص، چندین اندازه لوله ( $d_0$ ) وجود دارد که شعله دیگر نمی‌تواند منتشر گردد؛ اندازه لوله تا جاییکه هیچ شعله‌ای در آن نتواند منتشر شود، کم می گردد. ممکن است لوله با صفحات موازی (شکافهای مستطیلی) یا با یک شکل مخروطی جایگزین گردد. در حالت مخروطی

<sup>۱</sup> Quenching Distance

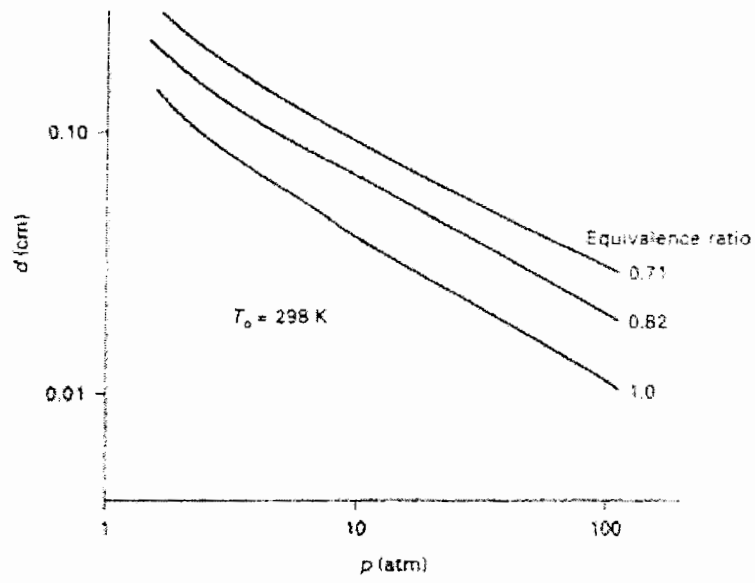
<sup>۲</sup> Flame Quenching

شکل، شعله در طرف بزرگ مخروط شروع شده و در موقعیتی که شعله خاموش می شود، قطر خاموشی تعیین می گردد.

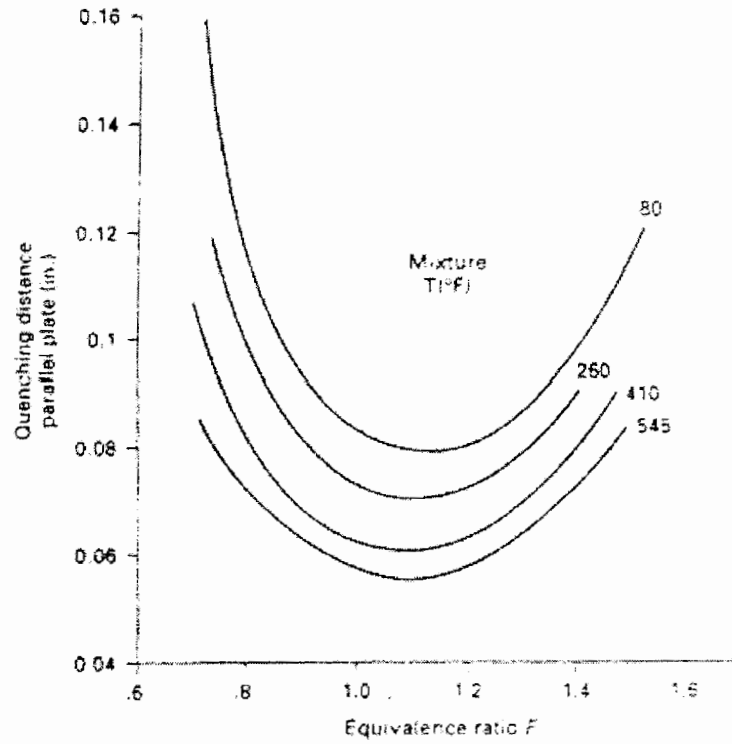
فاصله خاموشی  $d_0$  به شکل دیواره ها، نوع سوخت، استوکیومتری، فشار، درجه حرارت شرکت کننده ها و آشفته‌گی بستگی دارد. نمودارهای فاصله خاموشی در برابر نسبت تعادلی به صورت یک سهمی با یک مینیمم در قسمت غلیظ نسبت استوکیومتریک می باشند. در طرف رقیق، فاصله خاموشی با عکس سرعت سوزش متناسب می باشد. با افزایش وزن مولکولی سوخت در قسمت غلیظ، فاصله خاموشی به طور جزئی کاهش می یابد. شکل‌های (۱-۹) و (۱-۱۰) داده های فاصله خاموشی موازی را برای مخلوط پروپان - هوا نشان می دهند. فاصله خاموشی تقریباً با عکس فشار متناسب می باشد. برای نسبت استوکیومتریک پروپان- هوا،  $d_0$  با  $p^{-0.88}$  متناسب بوده ولی برای هیدروژن - هوا  $d_0$  با  $p^{-1.14}$  متناسب می باشد. بعنوان یک تقریب اگر سرعت سوزش با توان  $S$  فشار متناسب باشد آنگاه برای فشارهای پایین،  $d_0$  با  $p^{-(1+S)}$  متناسب خواهد شد. اثر درجه حرارت شرکت کننده  $T_0$  روی فاصله خاموشی توسط فرمول تقریبی  $d_0 V_1 / T_0 = cte$  بدست می آید.

اثر آشفته‌گی کمتر محسوس بوده اما با افزایش آشفته‌گی، انتقال حرارت افزایش یافته، بنابراین فاصله خاموشی نیز افزایش خواهد یافت. اثرات هیدرودینامیکی دیگر از قبیل شناوری روی فاصله خاموشی نیز مشهود است. برای شعله های رقیق در لوله ها، فاصله خاموشی در پایین دست نسبت به بالا دست جریان، ۱۰ درصد بیشتر است. برای شعله های غلیظ ممکن است ناپایداری اتفاق بیفتد و پدیده خاموشی خیلی پیچیده تر می شود.

به طور کلی اثرات دیواره به علت انتقال حرارت بوده نه در اثر نفوذ اجزاء که به نظر نمی رسد روکش دار کردن دیواره ها بر روی خاموشی اثر جزئی داشته باشد.



شکل ۹-۱- اثر فشار بر فاصله خاموشی برای مخلوطهای پروپان



شکل ۱۰-۱- فاصله خاموشی برای یک شکاف با عرض  $d_{11}$  در برابر نسبت تعادلی  $F$  پروپان - هوا در دماهای مختلف

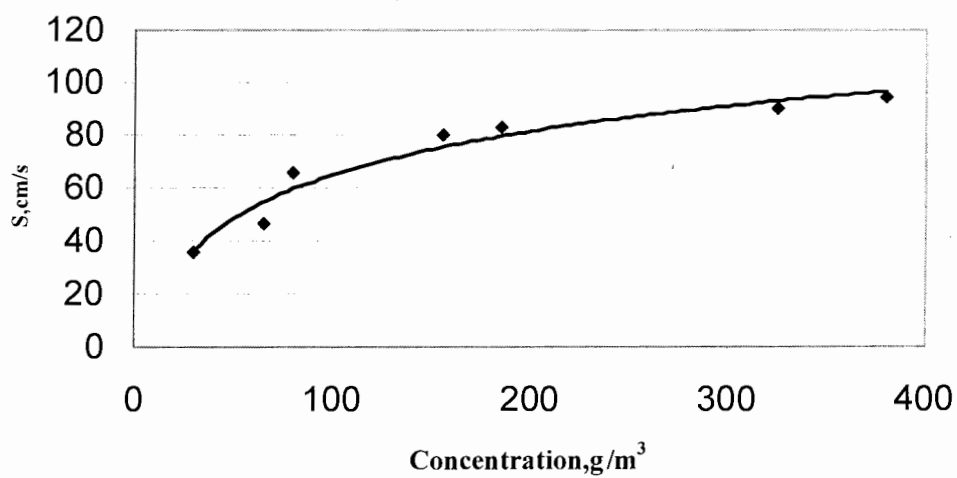
شرکت کننده ها

### ۱-۳-۱۲- حداقل انرژی جرقه

منظور از حداقل انرژی جرقه که با نماد  $E_{min}$  نشان داده می شود، مقدار انرژی است که باید توسط منبع جرقه به کار گرفته شود تا احتراق شروع شود. بنابراین در انرژیهای بیشتر نیز می توان جرقه و در نتیجه احتراق داشت ولی نکته حائز اهمیت در حداقل انرژی جرقه، بحث بهینه سازی است.

### ۱-۳-۱۳- حدود اشتعال

منظور از حدود اشتعال این است که بدانیم حد ایجاد اشتعال کجا بوده و در چه ناحیه‌ای از غلظت، شعله نداریم. علاوه بر این از شعله اضافی یعنی بالاتر از حد اشتعال جلوگیری کرده، چرا که اگر مثلاً مقدار ذرات قابل احتراق کارخانه ای در فضای پایین تر از حد اشتعال باشد ایمن می باشد. شکل (۱-۱۱) حدود اشتعال را در احتراق ذرات آلومینیوم در مخلوطی از اکسیژن- نیتروژن نشان می دهد.



شکل ۱-۱۱- نمودار سرعت سوزش ذرات با قطر ۵ میکرون در ناحیه آرام بر حسب غلظت.  
 در این نمودار حد اشتعال رقیق ۳۰ و حد اشتعال غنی نیز در حدود ۳۸۰ گرم بر مترمکعب می باشد.



فصل دوم؛

# بررسی رفتار احتراقی ذرات ریز فلزی

## ۲-۱- مقدمه

به طور کلی مطالعات تجربی در زمینه احتراق ذرات ریز جامد با هدف شناخت رفتار احتراقی ذرات و دست یابی به مکانیزم پایه ای احتراق صورت می گیرد. در این میان بررسی پارامترهای بنیادینی نظیر سرعت سوزش و فاصله خاموشی اجتناب ناپذیر می نماید. به همین علت بخش عمده ای از مطالعات تجربی محققین در زمینه احتراق ذرات به این دو مبحث اختصاص یافته است.

در این فصل قصد داریم با مروری بر مطالعات تجربی انجام شده در زمینه احتراق ذرات ریز جامد در جهت شناسایی رفتار احتراقی این ذرات گام برداریم. این مطالعات شامل هر دو مدل احتراق ابر ذرات و احتراق تک ذره می باشد. بنابراین در ابتدا به چند کار تجربی که با استفاده از مدل ابر ذرات انجام شده می پردازیم و سپس دو کار ارزشمند از Edward L. Dreizin که مبتنی بر مدل احتراق تک ذره می باشد مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت..

قبل از پرداختن به موارد فوق به ذکر مختصری در خصوص سوخته‌های جامد می پردازیم.

در میان سوخته‌های جامد، دو دسته سوخت قابل تمیز هستند. دسته اول گروهی هستند که در فاز جامد با اکسیژن نفوذی (دیفیوژنی) واکنش می دهند. به عبارت دیگر در این نوع سوخته‌ها واکنش در سطح ذره رخ می دهد. تیتانیوم ، بُر ، سیلیکون و کربن در این گروه قرار دارند. نقطه جوش این مواد کمی بالاتر از نقطه جوش اکسیژن می باشد و بنابراین در این نقطه دارای حد بالای شعله هستند.

در دسته دوم که فلزاتی نظیر آلومینیوم و منیزیم در آن قرار دارند ذرات فلزی در دمایی پایین تر از دمای اکسیدشان بخار می شوند و لذا احتراق این ذرات به همراه اکسیژن در فاز بخار انجام می گردد.

دمای بالای شعله این فلزات، دارای مقدار زیادی دمای نهان تبخیر اکسیژن می باشد [۱۴].

## ۲-۲- مقایسه انتشار شعله در ابر ذرات بُر، آلومینیوم، منیزیم، زیرکونیم و

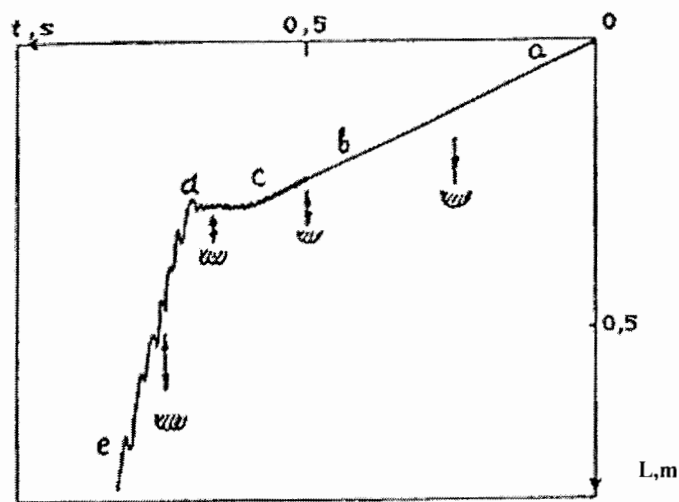
### آهن [۱۵]

کاری که توسط آقایان Kostyshin و Goroshin, Boychuk, Shevchuk در دانشگاه ایالتی ادسا انجام شده، در زمینه انتشار شعله در ابر ذرات فلزی مختلف با اندازه‌های مشابه می باشد. در این آزمایشات دو مسئله بررسی شرایط لازم جهت انتشار شعله در ابر ذرات و مقایسه سرعت شعله فلزات مختلف در شرایط یکسان حائز اهمیت می باشد.

این مقایسات باید بر مبنای سرعت سوزش انجام شود چرا که ابر ذرات مختلف نه تنها ممکن است دارای سرعت انتشاری متفاوت باشند بلکه ممکن است شکل سطحی متفاوتی نیز داشته باشند. لذا در این کار تأثیر غلظت بر سرعت سوزش در مخلوطهایی از هوا و  $Zr$ ,  $Al$ ,  $Mg$  و  $Fe$  و  $B$  مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایشات در لوله های شیشه‌ای عمودی با قطر  $0.35m$  و طول  $1$  متر انجام شده است به طوریکه سوخت از پایین لوله که محصور شده است به سمت بالا حرکت می کند و در بالای لوله که باز می باشد مشتعل می گردد. جرقه اولیه جهت ایجاد اشتعال توسط یک جرقه زن الکتریکی با توان  $27$  وات ایجاد می گردد.

در مخلوطهایی از  $Zr$ ,  $Al$ ,  $Mg$  و هوا ویژگیهای فرایند احتراق بسیار پیچیده و ناپایدار می باشد. یک Photoregistrogram از حرکت شعله در مخلوط آلومینیوم- هوا در شکل (۱-۲) به همراه بخشهایی از سطح شعله در مقاطع متناظر نشان داده شده است. شکل (۱-۲) را در مقاطع گذار از یک حالت به حالت دیگر مورد بررسی قرار می دهیم:

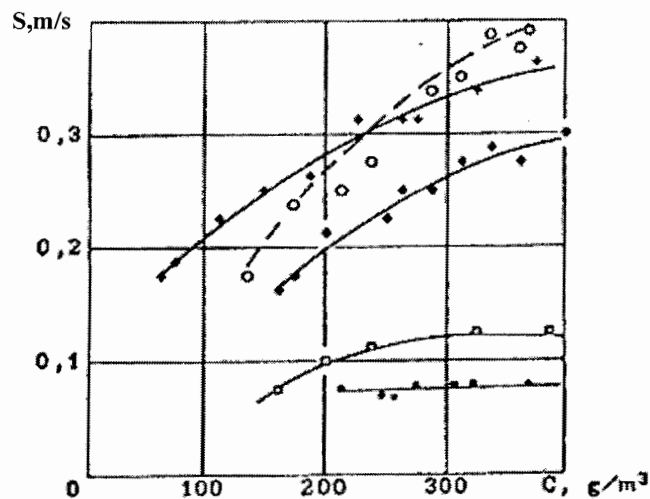
در ابتدا یک شعله آرام که شکل سطح آن شبیه یک منحنی سهمی می باشد به طور مستقیم در داخل مخلوط نسوخته پیش می رود (بخش a-b در شکل (۱-۲))، سپس یک شعله مرتعش با شکل ثابت (نوع اول) و با فرکانس ارتعاش  $v_1 \cong 10HZ$  (b-c)، در ادامه یک شعله مرتعش با شکل موج دار روی سطح (نوع دوم، c-b) و در نهایت یک شعله آشفته با ویژگیهای توسعه یافته (d-e) مشاهده می شود.



شکل ۱-۲- انتشار شعله در مخلوط آلومینیوم - هوا

شکل (۲-۲) وابستگی سرعت سوزش نسبت به غلظت سوخت را نشان می دهد.

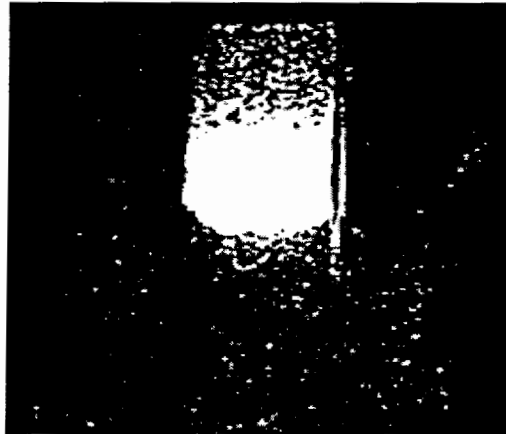
در سوزش کند مخلوط هوا و ذرات آهن، تنها رژیمهای آرام و مرتعش نوع اول وجود دارد. در مخلوطهای هوا - بُر ( $d = 6\mu m$ )، از آنجا که ذرات بُر سوخته شده در شعله جرقه زن به سمت بالای لوله خارج می شوند آغاز فرآیند انتشار با موفقیت همراه نشد.



شکل ۲-۲- اثر غلظت ذرات بر سرعت سوزش:  $Mg$  (۷ میکرون)،  $ZrO$  (۳/۸ میکرون)،

$Al$  (۶ میکرون)  $\blacklozenge$ ،  $Fe$  (۴/۹ میکرون)  $\square$ ،  $B$  (۶ میکرون)  $\bullet$

در همه مخلوطهای  $Zr, Al, Mg$  با اکسیژن که در آن  $m_{O_2}$  بیشتر از  $0.4$  می باشد یک رژیم نوسانی شدید احتراقی و بلافاصله به دنبال آن گذار به رژیم آشفته دیده می شود. در مخلوطهای اکسیژن-بُر که در آن  $0.7$  یا  $m_{O_2} = 0.4$  می باشد، انتشار پایدار شعله محقق نشد. تنها تکه های جداگانه ای از شعله سعی در انتشار داشتند که خاموش شدند. اما در  $m_{O_2} > 0.7$  فرآیند احتراق دارای ویژگیهای یک شعله آرام (Laminar) بوده که در آن شعله دارای سرعت انتشار ثابت و پیشانی تقریباً تخت همانند شکل (۲-۳) می باشد. تنها بی ثباتی مشهود در فرآیند انتشار شعله در مخلوط  $B+O_2$  بی ثباتی در جابجایی شعله است که به صورت تغییرات متناوب در انحراف سطح شعله به سمت دیواره های لوله ظاهر می گردد. مورد مشابه این اثر در مخلوطهای هوا و آهن نیز دیده می شود.



شکل ۲-۳- پیشانی شعله در ابر ذرات بُر

همچنین ورتکسهایی در ناحیه محصولات احتراق بوجود می آید. در واقع شرط لازم جهت تشکیل ورتکسها در ناحیه محصولات احتراق در نزدیکی ناحیه احتراق،  $Fr < 0.04$  می باشد (  $Fr = \frac{S^2}{gD}$ ، که در آن  $g$  شتاب جاذبه و  $D$  قطر لوله می باشد) [Abrukov, Samonov, 1958]. این رابطه تنها برای بُر و آهن صادق است و برای دیگر سوختها صادق نمی باشد. بیشترین تلفات احتمالی در لوله هایی که محدوده انتشار شعله در آن کم می باشد مربوط به میزان جابجایی شعله در مخلوطهای بُر است. به همین علت، در همه موارد، انتشار شعله در مخلوطهای بُر تقریباً در اواسط لوله توسط صفحات خاموشی خاتمه می یابد. مورد مشابه این موضوع در مخلوطهای هوا و آهن نیز وجود دارد.

در مخلوطهای منیزیم، آلومینیوم، روی و آهن (برای آهن در غلظتهای کم)، سرعت سوزش شعله آرام با افزایش غلظت سوخت به اندازه  $\sqrt{C}$  افزایش می یابد. در مخلوطهای  $B+O_2$  سرعت سوزش

در محدوده غلظت مورد نظر، به غلظت بستگی نداشته و در حدود  $8\text{cm/sec}$  می باشد. این نتیجه غیر منتظره‌ای است و در حال حاضر هیچ پیش زمینه تئوریک در مورد آن وجود ندارد.

ضمناً توجه کنید که در ابر ذرات مخلوط  $B+O_2$  با حجم ۵ لیتر، سرعت سوزش در غلظت سوخت  $350\text{g/m}^3$  برابر  $10\text{cm/s}$  بدست آمد. با تعویض بخشی از اکسیژن مخلوط با هلیم سرعت سوزش افزایش یافت به طوریکه در مخلوط  $B + 60\%O_2 + 40\%He$  سرعت سوزش در غلظت یاد شده  $13/6\text{cm/s}$  بدست آمد.

بعنوان نتیجه بحث می توان نکات زیر را بیان نمود.

۱- شعله آرام ساکن در مخلوطهای بُر حاوی اکسیژن زیاد ( $m_{O_2} > 0.7$ ) می تواند شکل بگیرد که علت آن مقدار کم سرعت سوزش و تأثیر جابجایی طبیعی می باشد (انتشار شعله در لوله ها در راستای بردار  $\vec{g}$ ).

۲- در مخلوطهای اکسیژن- بُر، سرعت سوزش اساساً به میزان غلظت سوخت بستگی ندارد، که این قضیه احتمالاً دلیلی بر ضعیف بودن مکانیزم فعال سازی اشتعال بُر می باشد.

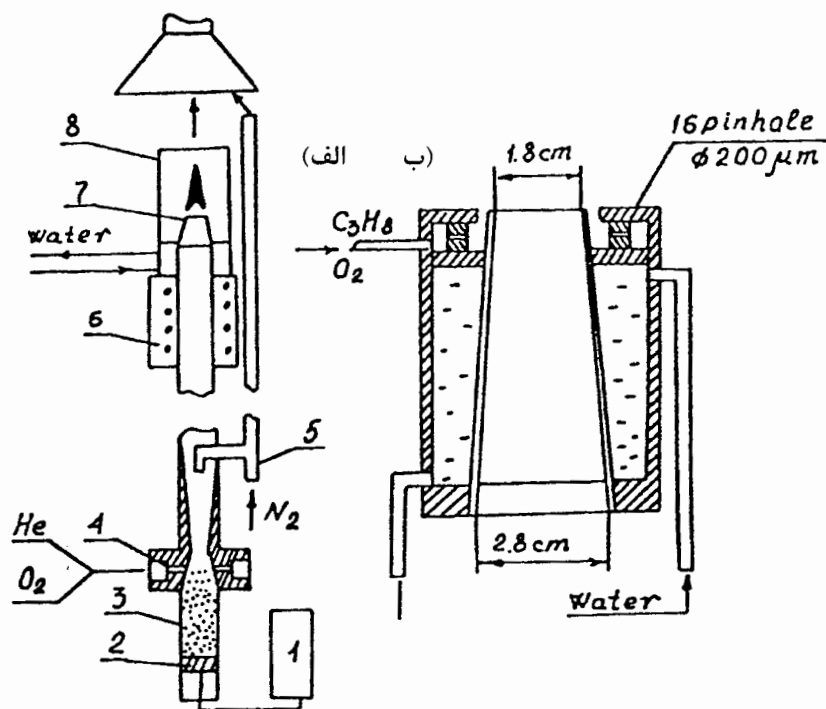
۳- براساس مقادیر بدست آمده، سوخته‌های آزمایش شده به لحاظ مرتبه فعال سازی (activity) می توانند به ترتیب  $Mg, Zr, Al, Fe$  و  $B$  قرار گیرند. همین ترتیب در ارتباط با پایداری رژیم سوزش آرام وجود دارد.

### ۳-۲- شعله‌های آرام پیش‌آمیخته در ابر ذرات بُر [۱۶]

در این بخش کار آقایان Goroshin، Ageyev، Shoshin و Shevchuk که در بخش فیزیک دانشگاه ایالتی ادسا انجام شده مورد توجه قرار گرفته است. ایشان با آزمایشات متعدد اثر غلظت جرمی بُر و نوع ترکیب مخلوط گاز را بر سرعت سوزش مورد بررسی قرار داده‌اند.

برای تحقیق در خصوص احتراق ابر ذرات بُر از شعله پایدار ذرات پیش‌آمیخته نوع بنسن (Bunsen)

استفاده شده است. شکل (۲-۴) شماتیکی از دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴- طرحواره ای از دستگاه آزمایش (الف) قسمت اشتعال ذرات و (ب) نازل خنک کننده به همراه نگهدارنده شعله: ۱- سیستم الکترومکانیکی ۲- پیستون ۳- پودر ۴- شکاف ۵- تزریق کننده ۶- اتصال الکتریکی ۷- نازل ۸- لوله شیشه ای



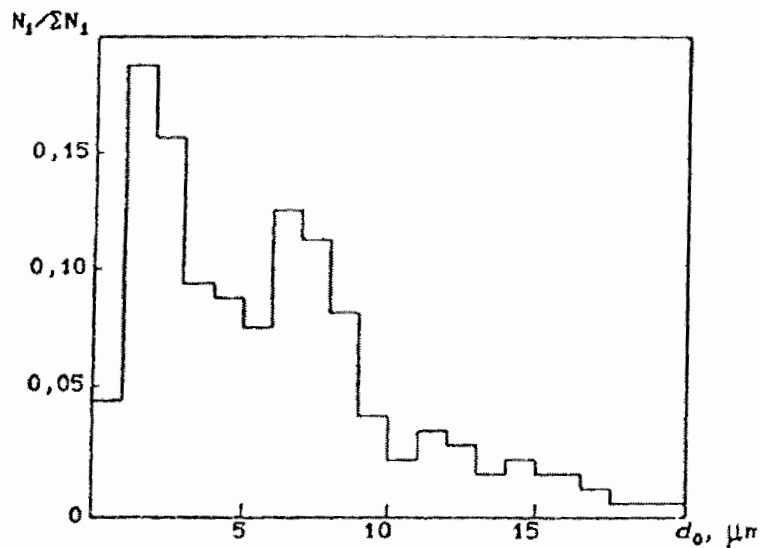
شکل (۴- الف) ترکیبی از یک پیستون تغذیه کننده و یک شکاف برای پخش ذرات را نشان می‌دهد. ذرات قبلاً توسط یک نوسانگر<sup>۱</sup> در سیلندر تغذیه کننده فشرده شده‌اند. حرکت خطی پیستون در محدوده سرعت  $0.5 - 2 \text{ cm/s}$  تنظیم شده است. میزان حجم گاز در شیپار دایروی (ارتفاع شیپار ۳۰ میکرون می‌باشد) ثابت و برابر با  $300 \text{ cm}^3/\text{s}$  می‌باشد. تنظیم جریان ذرات در طول یک نازل مخروطی که توسط آب خنک می‌شود با استفاده از یک تزریق کننده (ejector) انجام می‌شود. در صورت نیاز جریان ذرات با کمک یک گرمکن الکتریکی حلقوی پیش گرم می‌شود. جهت پایدار نگه داشتن شعله غبار ذرات بُر از نوع بنسن از یک نگهدارنده شعله پروپان - اکسیژن استفاده شده است (شکل ۲-۴). تمام جریان مخلوط پروپان - اکسیژن از ۱۰٪ جریان ذرات که از نازل خارج می‌شود تجاوز نمی‌کند. جدیدترین آزمایشات شعله غبار ذرات بر این نکته تأکید دارند که استفاده از نگهدارنده شعله<sup>۲</sup> در عمل هیچ تأثیری بر سرعت شعله ندارد. میزان غلظت غبار ذرات با جمع‌آوری تمام ذرات خارج شده از فیلتر در مدت ۵ تا ۱۰ ثانیه و توزین آنها اندازه‌گیری می‌شود.

سرعت سوزش با تقسیم میزان جریان خارج شده از نازل بر سطح مخروطی شعله داخلی محاسبه می‌شود. از خصوصیات شعله ذرات بُر، روشنایی بیش از حد آن می‌باشد. به همین علت عکسبرداری با فیلتر انجام شده است. درجه خلوص غبار ذرات بُر در این آزمایشات ۹۷٪ می‌باشد.

شکل ذرات بُر بی قاعده و نا منظم و عموم ذرات دارای دو قطر متفاوت می‌باشند قطر میانگین ذرات  $6 \mu\text{m}$  می‌باشد توزیع قطر ذرات در شکل (۲-۵) قابل مشاهده می‌باشد.

<sup>۱</sup> - Vibrator

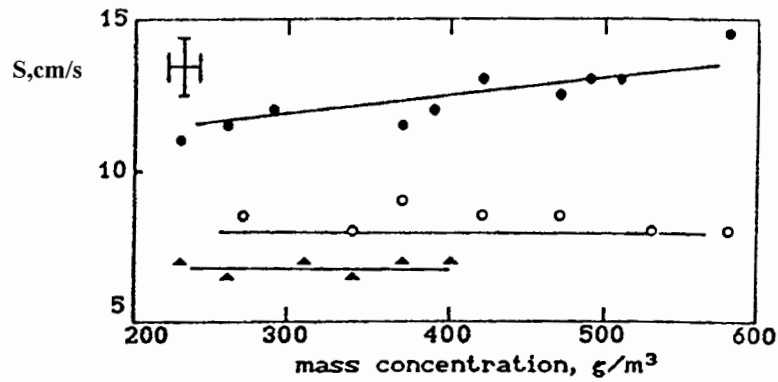
<sup>۲</sup> -Flame Holder



شکل ۲-۵- توزیع اندازه غبار ذرات بُر

زمانی که سرعت شعله بینهایت کم است، مثلاً در سوسپانسیونهای غبار ذرات بُر در اکسیژن خالص حتی زمانیکه توان پایدار کننده دو برابر شد موفق به پایدار نمودن شعله بنسن نشده‌اند. در این حالت با انتشار شعله در یک لوله عمودی سرعت شعله بدست آمده است.

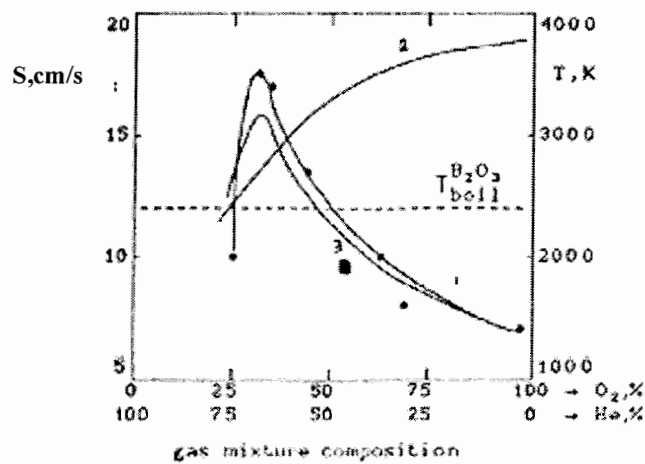
نتایج تجربی اثر غلظت جرمی بُر بر سرعت سوزش در مخلوطهای گازی با ترکیبات مختلف در شکل (۲-۶) ارائه شده است. حد بالایی غلظت سوخت در آزمایشات را ویژگیهای سیستم ایجاد جریان ذرات تعیین می‌کند. همچنین حد پایین غلظت سوخت ( تقریباً  $200 \text{ g/m}^3$ ) با عدم امکان ایجاد شعله پایدار تعیین می‌گردد.



شکل ۲-۶- اثر غلظت بر سرعت سوزش: ● ۱۰۰٪ اکسیژن ، ○ ۷۱٪ اکسیژن+۲۹٪ هلیوم ،  
▲ ۴۲٪ اکسیژن+۵۸٪ هلیوم.

در این شکل واضح است که تغییر غلظت سوخت عملاً تأثیری در سرعت سوزش ندارد.

شکل (۲-۷) اثر ترکیب مخلوط گاز هلیوم / اکسیژن بر سرعت سوزش شعله را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۷- اثر ترکیب مخلوط گازی (نسبت  $\text{He}/\text{O}_2$ ) بر (۱) سرعت سوزش (۲) دمای شعله

آدیاباتیک (۳) سرعت محاسبه شده با استفاده از فرمول (۲-۱).

این شکل بیانگر این مطلب است که اثر ترکیب مخلوط گاز هلیوم / اکسیژن بر سرعت سوزش بسیار قوی می‌باشد. که بیشترین مقدار آن مربوط به مخلوط گاز  $26\%O_2 + 74\%He$  می‌باشد. زمانیکه غلظت اکسیژن کمتر از ۲۴٪ باشد، شعله بُر در مشعل پدیدار نمی‌شود و در لوله نیز منتشر نمی‌گردد.

تخمین سرعت شعله، مادامیکه انتقال حرارت مولکولی روی می‌دهد را می‌توان بوسیله یک موازنه ساده بین جریانهای حرارتی بر روی مرز ناحیه احتراق انجام داد.

$$v(c_g \rho_g + C_B B) \cdot (T_i - T_0) = \lambda(T_\infty - T_i) / V \tau_c \quad (1-2)$$

که  $\rho_g$  و  $C_g$  به ترتیب ظرفیت حرارتی و چگالی گاز،  $C_B$  و  $B$  ظرفیت حرارتی و غلظت جرمی سوخت جامد،  $T_i$  دمای اشتغال ذرات بُر،  $\lambda$  ضریب هدایت حرارتی،  $\tau_c$  زمان مشخصه سوزش ابر ذرات و  $T_\infty$  دمای آدیاباتیک محصولات احتراق می‌باشند.

در واقع در غیاب تشعشع فاز سرد شده در ناحیه پس از شعله و به علت کوچک بودن نسبت قطر مشعل به محل تلاقی فوتونها در ناحیه پیش از شعله، امکان هرگونه تأثیر تشعشع بر سرعت شعله از بین می‌رود. لذا رابطه (۱) در غیاب اثر تشعشع نوشته شده است.

تحقیقات بر روی اشتعال تک ذره بُر توسط King (۱۹۸۵) نشان می‌دهد که در دمای اشتعال اختلاف چندانی به نقطه جوش اکسید بُر (۲۳۵۰ K) ندارد و تابع نسبتاً ضعیفی از دمای ذره و دمای محیط می‌باشد.

امروزه این نکته عموماً پذیرفته شده است که احتراق ذرات میکرونیزه بُر بوسیله سرعت واکنشهای همگن موجود در سطح ذره کنترل می‌گردد.

با استفاده از نتایج یک آزمایش در مورد سرعت شعله که در یک مخلوط سه‌گانه (  $20\% \text{N}_2 + 40\% \text{O}_2 + 39\% \text{He}$  ) انجام شد مشخص شد که سرعت شعله وابستگی ضعیفی به غلظت اکسیژن دارد.

## ۲-۴- سرعت سوزش در ابر ذرات غنی آلومینیوم [۱۷]

کاری که توسط آقایان «گروشین»، «فومنکو» و «لی» انجام شده در زمینه سرعت‌های سوزش در غبار ذرات آلومینیوم با غلظت بالا می‌باشد.

در این کار از یک دستگاه آزمایشگاهی استفاده شده که می‌تواند یک شعله موازنه شده ذرات ریز جامد پیش آمیخته از نوع «Bunsen» روی یک حلقه یا رینگ که توسط آب خنک می‌شود را تولید نماید.

سرعت سوزش در توده ذرات آلومینیوم با غلظت بالا و با اندازه ذره  $5.4 \mu\text{m}$  با تعیین مساحت سطح درونی شعله که به شکل مخروطی است و همچنین نرخ جریان حجمی کل تعیین گردیده است. مشخص گردیده است که در مخلوط‌های  $\text{Al}-\text{O}_2-\text{N}_2$  با غلظت بالا، سرعت سوزش تابعی ضعیف از غلظت ذرات می‌باشد. همچنین وابستگی سرعت سوزش با درصد اکسیژن زیاد در خصوص مخلوط‌های با غلظت بالا، نسبت به کارهای انجام شده در زمینه توده ذرات آلومینیوم با غلظت پایین مورد توجه است.

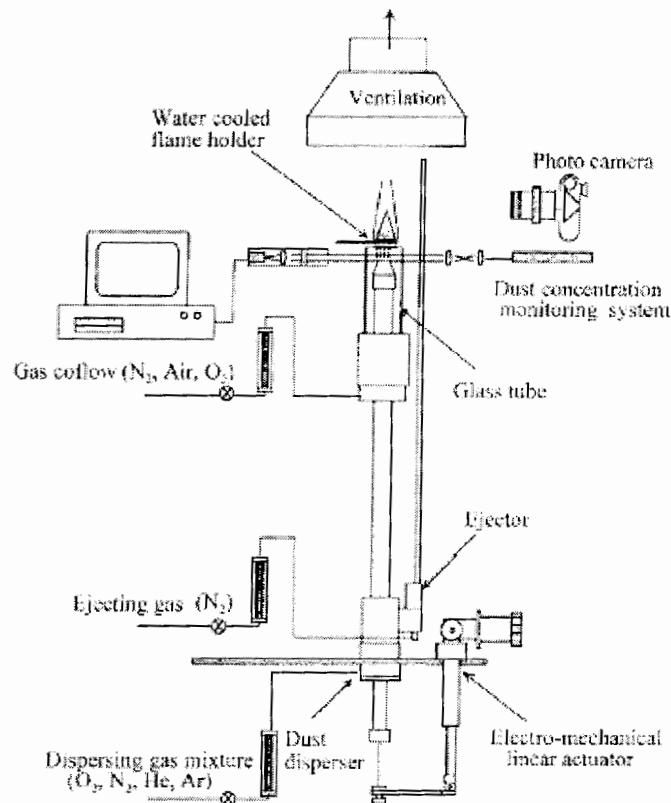
هنگامیکه حجم اکسیژن در مخلوط از ۱۱ تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد سرعت سوزش از  $12-13 \text{cm/s}$  تا حدود  $32 \text{cm/s}$  تغییر می‌کند. همچنین سرعت سوزش تابعی قوی از خواص انتقالی مولکول‌های گاز حامل می‌باشد. به همین علت، با تعویض گاز آرگون مخلوط

با هلیوم سرعت سوزش از  $20 \text{ cm/s}$  به  $65 \text{ cm/s}$  افزایش یافت. محدودیت اکسیژن برای انتشار شعله که بوسیله اندازه گیری کمترین مقدار درصد اکسیژن در گاز حامل ذرات زمانی که فرم داخلی شعله طوری باشد که ذرات در داخل آن پراکنده شده باشند، بدست آمده است در حدود  $(9/5 \pm 0/5)\%$  است.

آنها مدلی را در زمینه احتراق ذرات ریز جامد ارائه نموده اند که نشان می دهد وابستگی ضعیف سرعت شعله به غلظت ذرات، نتیجه مستقیم رابطه ضعیف نرخ سوزش ذرات به دمای شعله در ناحیه پخشی می باشد. بعلاوه این مدل رابطه سرعت سوزش با عدد لوئیس را در مخلوطهای با غلظت بالا بر طبق مشاهدات آزمایشگاهی پیشگویی می نماید.

نتایج بدست آمده با استفاده از دستگاه بنسن  $25\%$  خطا دارد و علت آن وجود انحنا در نوک شعله و اتلاف گرما در پایه شعله می باشد. این خطای  $25\%$  را Bradley و Andrew برای شعله گازهای هموزن بدست آورده بودند که پایه این عدد براساس کار آنها است. شکل (۲-۸) نمایی از دستگاه سوزاننده ذرات می باشد.

یک لوله از جنس فولاد ضد زنگ (Stainless-Steel) بلند، به طول  $70 \text{ cm}$  و قطر داخلی  $25 \text{ mm}$  به یک محفظه پراکندگی مخروطی شکل با زاویه کم وصل شده است. این لوله یک جریان ذرات آرام را که در ابتدا آشفته بوده است، تولید می نماید. جریان سیال از لوله وصل شده به نازل مخروطی شکل خارج می شود. یک حلقه نازک که آب سرد از آن عبور می کند، به عنوان نگهدارنده شعله به کار می رود که حدوداً یک سانتیمتر بالاتر از خروجی نازل قرار دارد. غلظت ذرات با به کارگیری یک خط لیزر که از میان جریان سیال عبور می کند، محاسبه می شود.

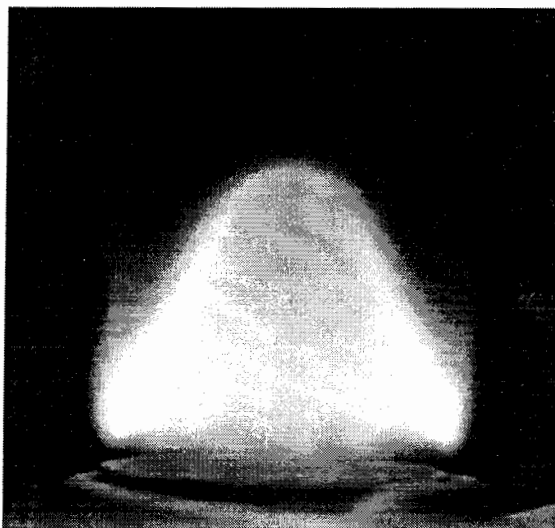


شکل ۲-۸- طرحواره ای از دستگاه سوزاننده ذرات

پودر ذرات، ۲۴ ساعت قبل از آزمایش جهت بهبود بخشیدن به انتشار آن در دمای ۱۲۰ تا ۱۴۰ درجه سانتیگراد خشک می شود. جرقه توسط مشعل پروپان زده می شود. پس از به تعادل رسیدن شعله، تصاویر ثبت می گردد. شکل (۲-۹) نمایی از این شعله پایدار را نشان می دهد.

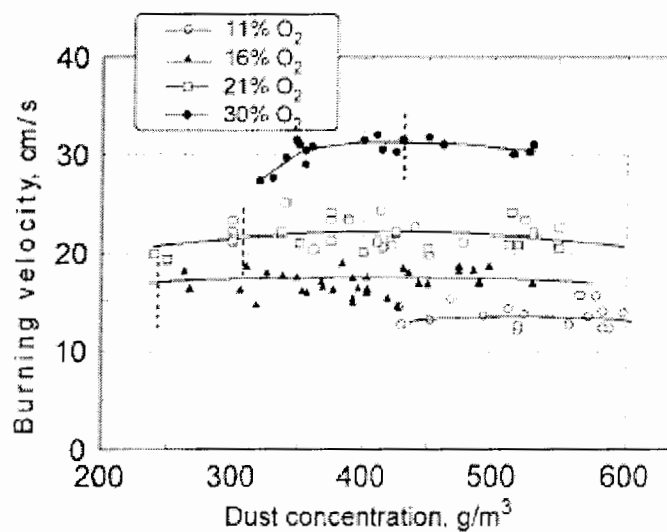
در شعله‌های غنی همانطور که از شکل مشخص است، نوک شعله باز می باشد. در شکل (۲-۱۰) سرعت سوزش به صورت تابعی از مخلوطهای نیتروژن با درصدهای مختلف اکسیژن نشان داده شده

است. در این شکل پیداست که حداقل غلظت ذرات با کاهش درصد اکسیژن در مخلوط افزایش می یابد. همچنین پیداست که افزایش غلظت تأثیر چندانی بر میزان سرعت سوزش ندارد.



شکل ۲-۹- تصویری از شعله بنسن ابر ذرات آلومینیوم در مخلوطی از اکسیژن - نیتروژن.

مقدار اکسیژن ۱۶٪ و غلظت ذرات  $410 \text{ g/m}^3$



شکل ۲-۱۰- وابستگی سرعت سوزش به غلظت ذرات در مخلوطهایی از  $\text{Al-O}_2\text{-N}_2$  با درصد

اکسیژن مختلف



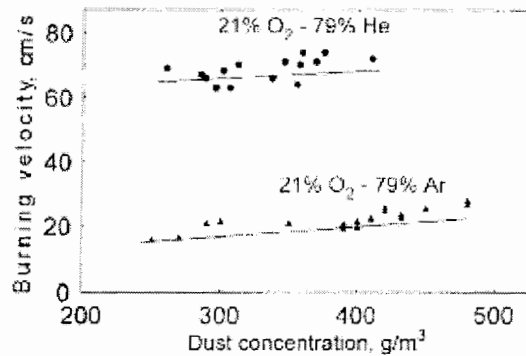
در حالیکه در مخلوطهای رقیق سرعت سوزش تابعی قوی از غلظت می‌باشد. تعویض نیتروژن با آرگون یا هلیوم جهت تحقیق در خصوص خواص انتقالی مولکولی گاز حامل انجام شد. ساختار شعله مشاهده شده و همچنین سرعتهای شعله در مخلوط ذرات اکسیژن - آرگون - آلومینیوم بسیار نزدیک به شعله ذرات مشاهده شده در مخلوط ذرات آلومینیوم - هوا می‌باشد.

تنها تفاوت در این است که شعله ذرات با آرگون درخشان‌تر از شعله ذرات با هوا می‌باشد. همچنین با جانشین کردن آرگون و یا هلیوم به جای هوا، دمای شعله بالاتر می‌رود و از حدود ۳۴۵۰ به ۳۶۵۰ درجه کلوین می‌رسد. سرعتهای شعله در مخلوط آرگون - اکسیژن و مخلوط هوا شیبه هستند و سرعتهای شعله هلیوم - اکسیژن ۳ مرتبه سریعتر از شعله هوا - آلومینیوم یا آلومینیوم - اکسیژن - آرگون می‌باشد. در این شعله‌ها مکانیزم انتشار بوسیله انتقال حرارت مولکولی است و سرعت سوزش تابعی از ضریب هدایت حرارتی و زمان مشخصه واکنش شیمیایی می‌باشد  $S_b \sim \sqrt{\frac{a}{T_c}}$ . به هر حال احتراق ذرات توسط فرایند پخش اکسیژن انجام می‌گیرد. زمان

مشخصه احتراق با پخش اکسیژن رابطه عکس دارد یعنی  $T_c \sim \frac{1}{D}$  و بنابراین :

$$\frac{(S_b)_{He}}{(S_b)_{Ar}} = \sqrt{\frac{(a.D)_{He}}{(a.D)_{Ar}}} \quad (2-2)$$

سرعت شعله در مخلوطی که هلیوم در آن به کاررفته طبق رابطه بالا حدود ۳/۹ برابر حالتی است که آرگون به کار رفته است، در حالیکه آزمایشات عدد فوق را در حدود ۳/۲ نشان می‌دهند. به شکل (۲-۱۱) دقت کنید. این اختلاف نتیجه وابستگی ساختمان شعله و بنابراین سرعت شعله به عدد لوئیس بوده است، که به همین علت در مخلوط یعنی  $O_2 - He, O_2 - Ar$  تفاوت وجود دارد.

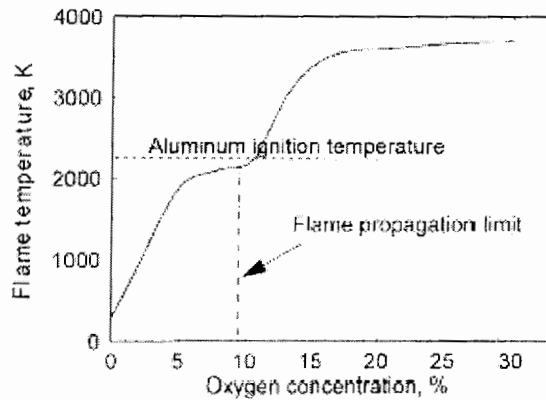


شکل ۲-۱۱- نتایج آزمایشگاهی سرعت سوزش در مخلوطهای اکسیژن-هلیوم و اکسیژن-آرگون به صورت تابعی از غلظت ذرات

همچنین از آزمایشات بدست آمد که شعله پیش آمیخته در غلظت اکسیژن  $(10 \pm 0.5)\%$  وجود می‌آید و در غلظت اکسیژن  $(8/5 \pm 0/5)\%$  ناپدید می‌گردد. بعلاوه باید دانست که این غلظتهای بحرانی به طور واقعی به غلظت ذرات بستگی ندارد. مقدار متوسط غلظت بحرانی اکسیژن  $9/5\%$  است که به نقطه‌ای در وابستگی دمای شعله آدیاباتیک به غلظت اکسیژن (شکل ۲-۱۲) که به مقدار  $2300$  کلوین (که نقطه ذوب اکسید آلومینیوم است) می‌رسد، و عموماً به دمای جرقه ذرات آلومینیوم با اندازه میکرونی اطلاق می‌شود، نزدیک است.

نرخ سوزش ذره بوسیله نفوذ اکسیژن به سطح ذره و یا توسط مقدار شعله‌ای که هر ذره در اطراف سطحش دارد، کنترل می‌گردد. همچنین فرض می‌شود که دمای ذره در لحظه جرقه با نقطه ذوب اکسید آلومینیوم ( $2300\text{ K}$ ) یکی است و بستگی به غلظت محلی اکسیژن دارد. به علت وابستگی ضعیف نفوذ اکسیژن به دمای متوسط گاز محلی در ناحیه احتراق، نرخ سوزش نوک شعله اساساً بوسیله غلظت محلی اکسیژن کنترل می‌گردد و می‌توان نوشت:

$$W \sim KY(X)/Y_u \quad (2-3)$$



شکل ۲-۱۲- وابستگی دمای شعله آدیاباتیک در مخلوط  $Al-O_2-Ar$  به غلظت اکسیژن.

غلظت ذرات  $350 \text{ g/m}^3$

که  $Y_u$  و  $y(x)$  به ترتیب غلظت محلی و اولیه اکسیژن و  $k(\text{s/cm}^2)$  یک ثابت پخشی احتراق در غلظت اولیه مخلوط نسوخته می باشد. با توجه به لحاظ کردن منبع حرارتی و یا برابر قرار دادن حرارت و دبی‌های انرژی روی مرز بین منطقه‌ها، معادله جبری حاکم در مورد سرعت سوزش به صورت زیر خواهد بود:

$$3\mu\phi R = 2(1 + \phi S_b)(\phi S_b + A)A\kappa^2 \quad (4-2)$$

$$A = 1 - \frac{Le}{2} + \sqrt{\frac{Le^2}{4} + \frac{3}{2} \text{Log} \frac{\phi}{\kappa^2} \bar{R}} \quad (5-2)$$

که معادله (۵-۲) مقدار متوسط بی بعد ذره می باشد. همچنین داریم که:

$$\bar{R} = \frac{r_u + r_f}{2r_u} = 0.5 \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{1}{\phi}} \right) \quad (6-2)$$

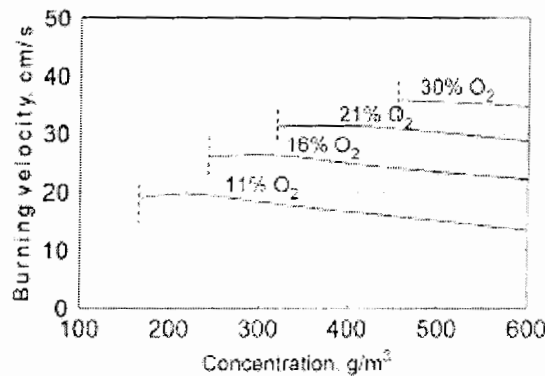
که  $\Gamma_u$  و  $\Gamma_f$  شعاعهای ذره بعد از سوختن و قبل از سوختن می باشد. همچنین داریم:

$$\kappa = \frac{(S_b)_u^2 T_c}{a_u} \quad (\text{مقدار سرعت بی بعد}) \quad (7-2)$$

$$\mu = B_{st} Q / c_g p_g (T_{st} - T_u) \quad (8-2)$$

$C_g$  و  $\rho_g$ ، دانسیته و گرمای ویژه گاز حامل هستند.  $T_{st}$  دمای جرقه ذره و  $T_u$  دمای اولیه ذرات

می‌باشد.  $Le$  عدد لوئیس و  $Q$  گرمای واکنش است. نتایج حل تئوریک در شکل (۲-۱۳) آمده است.



شکل ۲-۱۳- پیش بینی رابطه تئوری در خصوص سرعت سوزش بر حسب غلظت ذرات در مخلوط

Al-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> با درصد اکسیژن مختلف. خطوط نقطه چین حالت استوکیومتری را نشان می‌دهد.

نتایج تجربی و تئوری تنها ۲۵٪ اختلاف دارند. ارتباط سرعت سوزش به عدد لوئیس در نتیجه

نفوذ اکسیژن در نقطه غنی ذرات مربوط به ضخامت شعله حرارتی می‌باشد و اینکه مقدار سرعت

شعله  $\kappa$  رابطه‌ای با عدد لوئیس دارد، یعنی  $\kappa = f(Le)$ . و با افزایش عدد  $Le$  مقدار  $\kappa$  افزایش

می‌یابد.

سرعت ابعادی شعله به خواص انتقالی مولکولهای گاز بستگی دارد به طوری که

$$S_b \sim f(Le)\sqrt{a.D}$$

عدد لوئیس در مخلوط  $Ar-O_2$  برابر ۱ و برای مخلوط  $He-O_2$  حدود ۲ می باشد.

## ۲-۵- خاموشی شعله ذرات هوا

در سال ۱۹۸۰ م. چند نفر بنامهای جاروسینسکی، لی، کنستاتاس و کراولی (Crowley) از بخش مهندسی مکانیک دانشگاه مک گیل مونترال کانادا [۱۸] تحقیقی بر روی خاموشی شعله ذرات ریز جامد انجام دادند که شرح آن بدین قرار است. خاموشی شعله در مخلوطهای پودر ذرات آلومینیوم و ذرات زغالسنگ همراه با هوا در لوله ای عمودی و قائم به قطر داخلی ۰/۱۹ متر و طول ۱/۸ متر که شامل صفحات خاموشی در وسط آن است مطالعه و مشاهده می گردد که حد اشتعال تحت شرایط فشار ثابت چندین برابر بزرگتر از مقدار اندازه گیری شده در حجم ثابت می باشد. فاصله خاموشی برای انتشار رو به بالای شعله از قسمت باز لوله به سمت انتهای بسته لوله اندازه گیری شده است. حداقل فاصله خاموشی برای پودر ذرت ۵/۵ میلی متر، برای آلومینیوم ۱۰/۴ میلی متر، برای زغالسنگ ۲۵ میلی متر ( قطر کمتر از ۵ میکرون ) و حدود ۱۹۰ میلی متر برای زغالسنگ همراه با ذرات درشت ( قطر کمتر از ۷۰ میکرون ) و ۲ میلی متر برای مخلوط استوکیومتریک هوا - متان بدست آمده است. فاصله خاموشی برای پودرهای ذرت و آلومینیوم از لحاظ بزرگی، هم مرتبه می باشند و این بدلیل انتشار شعله های کنترل شده آنهاست، که مشابه یکدیگر می باشد. مقادیر بزرگ فاصله خاموشی برای ذرات زغالسنگ بدلیل بزرگی اندازه ذرات آنها

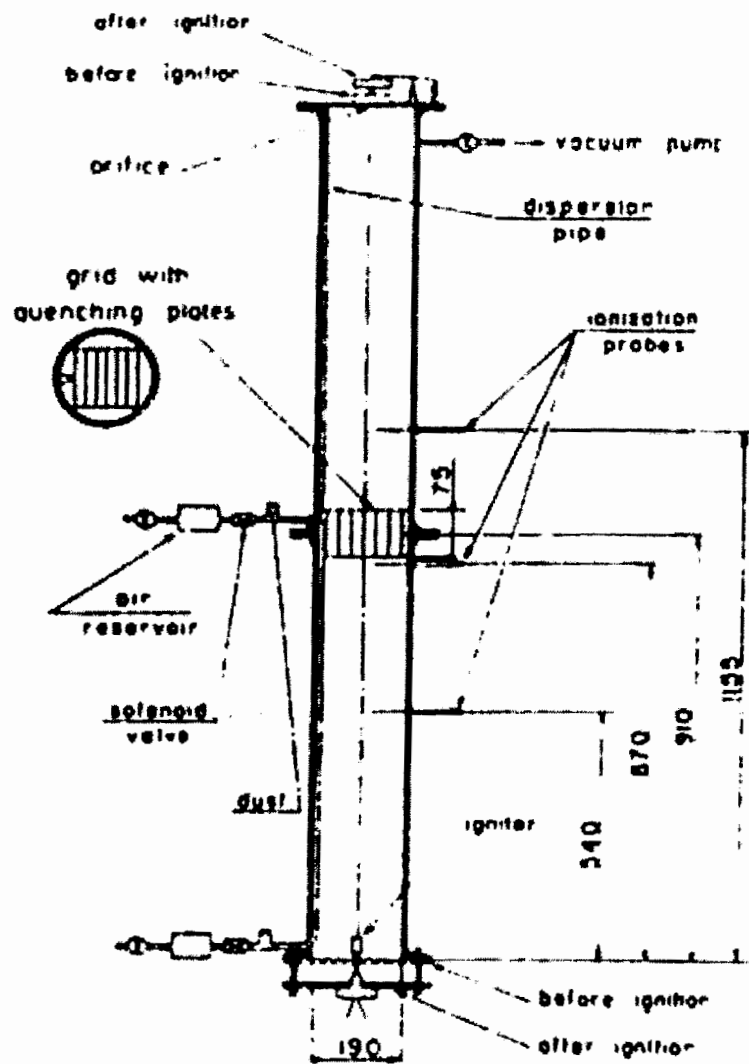
می‌باشد. برخلاف سرعت سوزش و حداقل انرژی جرقه که به دستگاه مورد آزمایش وابسته‌اند، فاصله خاموشی در شرایط حضور در محدوده خاموشی به دستگاه وابسته نمی‌باشد.

شکل (۲-۱۴) دستگاه مورد استفاده را نشان می‌دهد. برای آزمایش فشار ثابت سرپوش بالایی لوله دارای منفذی به اندازه  $28/6$  میلی متر می‌باشد. این منفذ جهت میرا کردن نوسانات حاصل از انتشار رو به جلوی شعله در نظر گرفته شده است. سیستم جرقه بر روی قسمت بسته یا باز انتهایی لوله قرار گرفته است، و انتهای لوله می‌تواند از نوع باز یا بسته باشد. قبل از انجام آزمایش ابتدا محفظه تا فشاری معادل  $150$  تور<sup>۱</sup> و یا زیر فشار اتمسفر تخلیه شده و با شروع آزمایش عمل سولنوید باعث پراکنده سازی ذرات بوسیله جریان هوا از یک مخزن هوا به ظرفیت  $0/23$  لیتر می‌گردد.

عبور هوا از میان ذرات باعث پراکنده سازی ذرات داخل محفظه آزمایش می‌گردد. مدت زمان تزریق ذرات کمتر از  $100$  میلی ثانیه بوده و باعث افزایش فشار می‌گردد. تأخیر زمانی در تزریق توسط یک تایمر مکانیکی کنترل شده و اجازه می‌دهد تا این زمان به  $250$  میلی ثانیه برسد. دو سوئیچ کنترل کننده جهت باز و بسته نمودن شیرهای سولنویدی و یک سوئیچ کنترل کننده جهت کنترل زمان جرقه وجود دارد.

فاصله خاموشی بوسیله تغییر در ترکیب مخلوط هوا سوخت تا رسیدن به حدود غلظتهای مختلف اندازه‌گیری می‌گردد. تست های دستگاه نشان می‌دهد که رفتار خاموشی رو به بالای شعله متان - هوا به شکل U بوده که این مطلب در شکل (۲-۱۵) نشان داده شده است.

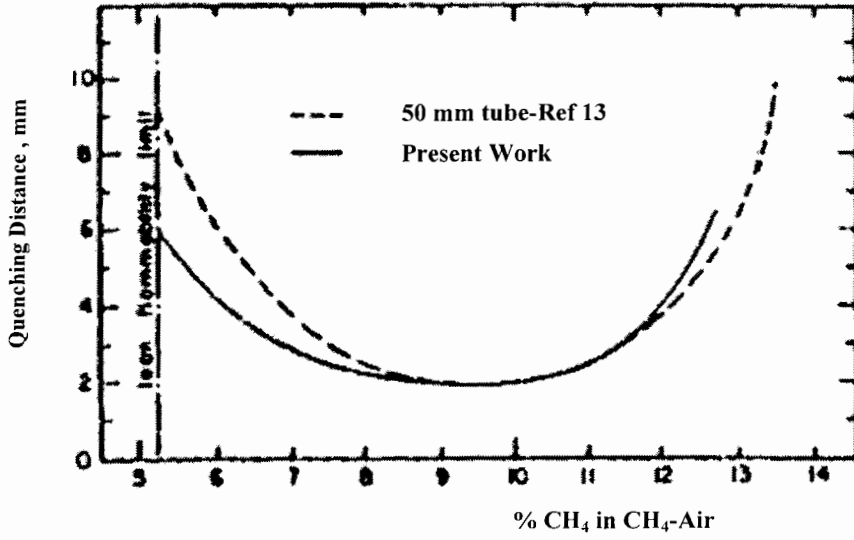
<sup>1</sup> - Toor



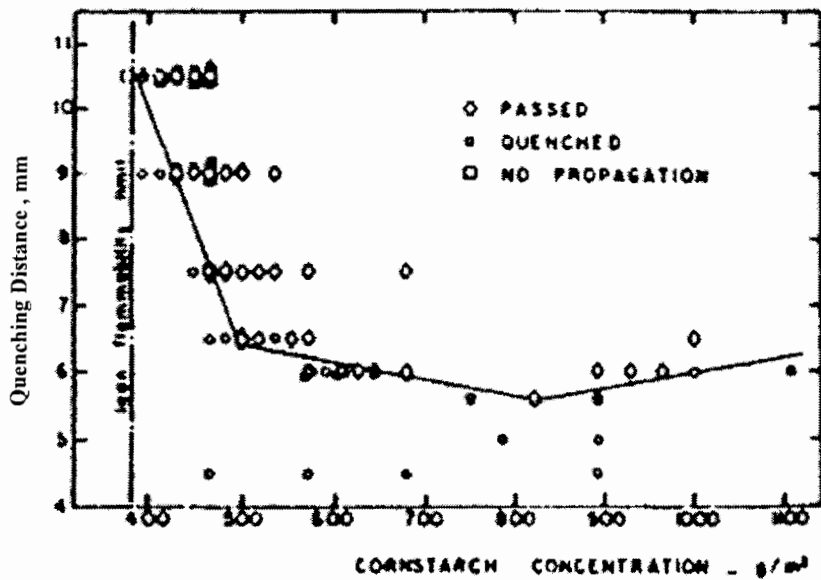
شکل ۲-۱۴- دستگاه آزمایش جهت بررسی انتشار شعله

حداقل فاصله خاموشی برای مخلوط هوا - متان برابر ۲ میلی‌متر می‌باشد. فاصله خاموشی به

عنوان تابعی از غلظت هوا - پودر ذرت در شکل (۲-۱۶) نشان داده شده است.



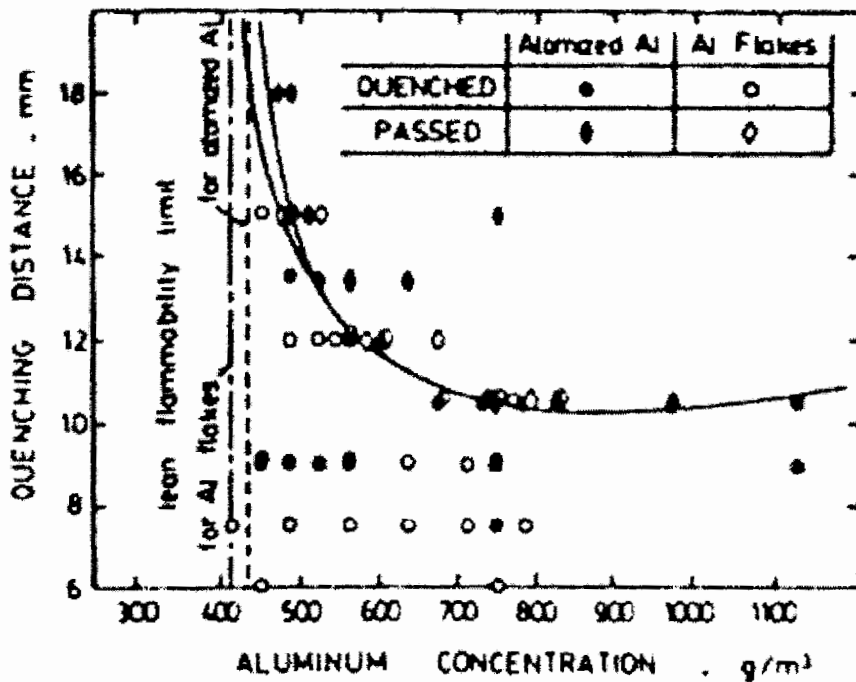
شکل ۲-۱۵- فاصله خاموشی شعله متان - هوا



شکل ۲-۱۶- نمودار فاصله خاموشی به عنوان تابعی از غلظت پودر ذرات



این نمودار بیانگر دو ناحیه مجزا برای حساسیت فاصله خاموشی شعله نسبت به غلظت می باشد. برای غلظتهای کمتر از  $500 \text{ g/m}^3$  تغییری در شیب نمودار بوجود می آید. حداقل فاصله خاموشی برای مخلوط هوا - ذرت برابر  $5/5$  میلی متر بوده که معادل غلظتی به اندازه  $800 \text{ g/m}^3$  که در حدود  $3/4$  برابر حالت تئوری مخلوط استوکیو متریک می باشد. از این نقطه به بعد منحنی مربوط به رفتار شاخه غنی مخلوط می باشد. شکل (۲-۱۷) نشان دهنده نتایج آزمایشهای فاصله خاموشی ذرات آلومینیوم می باشد.

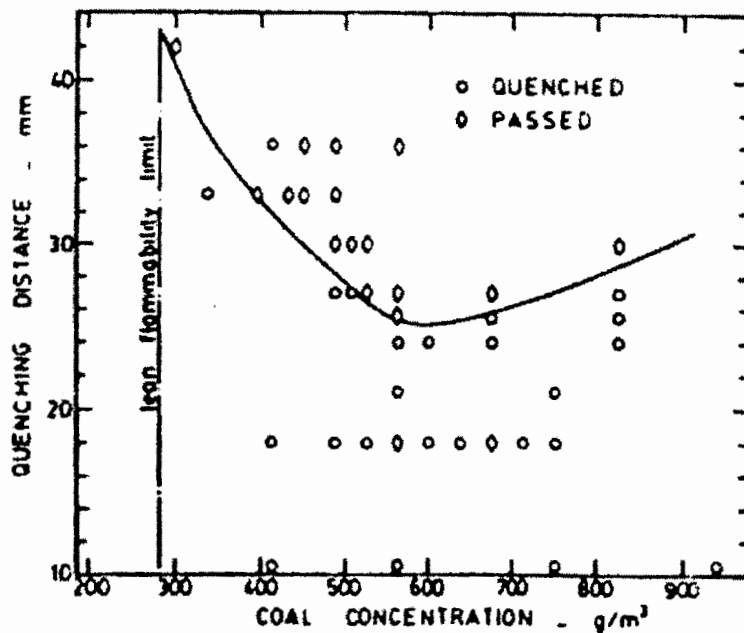


شکل ۲-۱۷- نتایج آزمایشهای فاصله خاموشی ذرات آلومینیوم

حد رقیق اشتعال برای انتشار شعله از میان مخلوط هوا - ذرات آلومینیوم در فرایند فشار ثابت حدود  $415$  الی  $435$  گرم بر متر مکعب می باشد. به طور تقریبی  $3$  برابر حد پایین در آزمایشات

بالال ( Ballal ) و حدود ۱/۴ برابر مخلوط استوکیومتریکی می باشد. فاصله خاموشی این ذرات حدود ۱۰/۴ میلی متر در غلظتی معادل  $850 \text{ g/m}^3$  بوده که ۲/۸ برابر مخلوط تئوری استوکیومتریکی می باشد. نتایج آزمایشهای انجام شده با ذرات ریز زغالسنگ در شکل (۲-۱۸) نشان داده شده است. حد رقیق شعله وری  $280 \text{ g/m}^3$  بوده و حداقل فاصله خاموشی ۲۵ میلی متر که متناظر با غلظت  $590 \text{ g/m}^3$  می باشد. نتایج آزمایشهای صورت گرفته نشان می دهد که فاصله خاموشی مخلوطهای هوا - پودرذرت و هوا - پودر آلومینیوم قابل مقایسه با فاصله خاموشی شعله های گازی می باشد.

افزایش اندازه ذرات، ضخامت شعله را افزایش داده و سرعت سوزش را کاهش می دهد.



شکل ۲-۱۸- فاصله خاموشی به صورت تابعی از غلظت ذرات زغالسنگ با قطر کمتر از ۲/۷ میکرون

## ۲-۶- مطالعه میکروسکوپی احتراق ذرات آلومینیوم

### ۲-۶-۱- پدیده های سطحی در احتراق آلومینیوم [۵]

از جمله افرادی که در مطالعه تجربی و میکروسکوپی احتراق ذرات آلومینیوم در سالهای اخیر کوششی به سزا داشته است Edward L. Dreizin استاد دانشگاه پرینستون ایالت نیوجرسی آمریکا می باشد. وی در مقاله ای که به همراه M. Trunov ارائه نموده پدیده های سطحی در احتراق ذرات آلومینیوم را مورد بررسی قرار داده است که شرح آن به قرار ذیل می باشد.

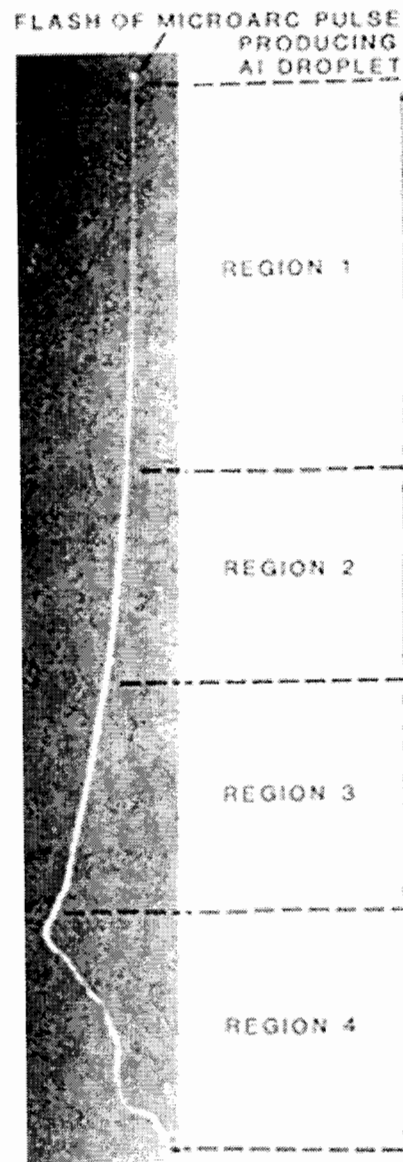
تحقیقات انجام شده بر روی احتراق تک ذره آلومینیوم ، بعضی از ویژگی های آن را آشکار نمود. ولی بعضی از آنها همچنان در پرده ای از ابهام قرار دارد. به عنوان مثال هنگام احتراق به نظر می رسد در سطح ذرات ترکهایی ایجاد می شود که ناشی از انجام اکسید در حین سورش است که برای احتراق سریع و کامل فلزات بسیار سودمند است ، اما مکانیزم آن غیرقابل تصور است. در آزمایش احتراق ذرات آلومینیوم - که به صورت منفرد می باشد- ترکیب شدن اکسیژن در درون ذرات فلزی سوزنده در هوا و جهشهای دمایی که در بعضی مواقع با انفجارهای کوچک همراه می باشد مشاهده شده است.

جهت یکنواخت نمودن ذرات ریز آلومینیوم که به قطر ۱۵۰ میکرون و دمای اولیه ۱۶۰۰ کلوین و سرعت ۳ متر بر ثانیه می باشد ( که در دمای اتاق و فشار اتمسفر در هوا منتشر می شوند) از روش قوس الکتریکی<sup>۱</sup> GEMMED استفاده می شود ذرات ریز سوزنده به طور آزاد رها می شوند و انتشار آنها توسط یک مبدل حرارتی پایش می شود. مبدل توسط یک لامپ تنگستن و یکسری حفره های پین دار کالیبره و تنظیم می شود. در این آزمایش ذرات در هوا می سوزند تا زمانی که

<sup>۱</sup> - Generator of Monodisperse Metal Droplets

احتراق کامل شود و یا گاهی اوقات پس از سوختن در یک گاز خنثی ( آرگون یا هلیم ) سرد می‌شوند. در این آزمایشها وابستگی و ارتباط بین تشعشع روشن ذرات ریز « دمای روشنایی» و « شکل هاله موج دار»، با سرد نمودن ذرات سوزنده بر روی صفحه‌های شیشه‌ای که خارج از میدان دید مبدل قرار داده شده‌اند بوجود آمده است. بنابراین اسیلوسکوپ نگهدارنده زمان سردکردن را ثبت می نماید. اثرهاله اطراف ذره ریز بر روی سطح شیشه‌ای دقیقاً قبل از سرد کردن ذرات با دمای روشنایی سنجیده شده است.

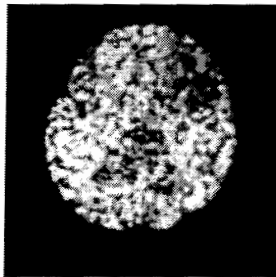
در این آزمایشها مشخصه های شناخته شده احتراق آلومینیوم نظیر نوارهای روشنایی، تغییرات سرعت ذرات سوزنده و انفجارهای کوچک که در پایان احتراق اتفاق می‌افتند مشاهده می شود . با مطالعه بر روی آثار ذرات سرد شده بر روی سطوح شیشه ، انتقال روش احتراق از روش کروی متقارن به غیر متقارن شناسایی می‌شود . در واقع این شناسایی در ناحیه (۱) شکل (۲-۱۹) با ظهور آثار هاله دود ناشی از ذرات سرد شده بر روی شیشه به دست می‌آید. در ناحیه (۱) که در حدود 10~15ms طول می‌کشد هیچگونه نوار روشنایی دیده نمی شود . ناحیه (۲) توسط تارهای قویتری از روشنایی قابل شناسایی می باشد که تقریباً 25~35ms به طول می انجامد . در این ناحیه روشنایی افزایش می‌یابد و بردار سرعت تغییرات کوچکی دارد. شکل هاله‌های دود تغییر می‌کند و فورانه‌های هاله دود که محدود به سطح ذره می‌باشد بوجود می‌آید. دوره تناوب نوارهای مذکور 5~6ms می‌باشد . ناحیه (۳) دارای نوارهای منظم با دوره تناوب بسیار کمتر در حدود 0.8~1ms می باشد. در این ناحیه شکل هاله دود مارپیچی است. در طول این ناحیه روشنایی به تدریج کم می‌شود . بعد از 25~35ms کاهش قابل توجهی در روشنایی ایجاد می‌گردد(ناحیه ۴) .



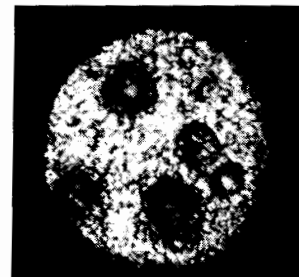
شکل ۲-۱۹- مسیر سقوط آزاد ذره آلومینیوم در حال سوزش

دوره تناوب نوارهای این ناحیه  $1.1 \sim 1.3ms$  می باشد. در این ناحیه تغییرات سریع در سرعت بوجود می آید. سرانجام نوارهای روشنایی مذکور با یک Peak پایان می یابد.

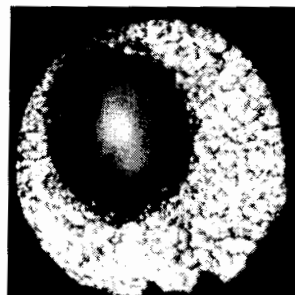
تقریباً پس از گذشت 30 ~ 40ms از اشتعال ذرات در هوا، در داخل ذرات حفره‌هایی ایجاد می‌گردد. حفره‌ها رشد می‌کنند تا اینکه پس از حدود ۷۰ میلی ثانیه از آغاز اشتعال تقریباً تمام ذره را پر می‌کند. به شکل (۲-۲۰) توجه کنید. داده‌های آزمایشی احتمال می‌دهند که تأثیر متقابل و غیر یکنواخت فلز - گاز باعث ایجاد تخلخل در ذرات آلومینیوم می‌گردد.



(الف)



(ب)



(ج)

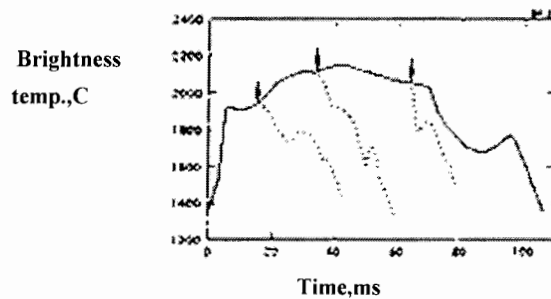
شکل ۲-۲۰- نماهایی از ذره آلومینیوم که در زمانهای مختلف احتراق در هوا سرد شده است.

(الف) ۲۰ ms (ب) ۴۵ ms (ج) ۷۰ ms

از مشاهدات آزمایش نتیجه می‌شود که :

- ۱- اکسید آلومینیوم بر روی ذره آلومینیوم در حال احتراق در طول دوره ابتدایی احتراق تشکیل نمی‌شود.
- ۲- در سوزش ذرات آلومینیوم، یک گاز حل می‌گردد که باعث ایجاد حفره‌های داخلی می‌شود.

با پایش تشعشع ذره آلومینیوم در طی زمان سرد شدن با گاز خنثی ( هلیوم ) می‌توان یک نوع منحنی دمای روشنایی برای احتراق ذره آلومینیوم در هوا بدست آورد. شکل (۲-۲۱) ، سه مورد تشعشع ذره در گاز سرد شده<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد. در هر سه مورد، روشنایی ابتدا کاهش و پس از مدتی افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۲۱- نمودار دمای روشنایی ذرات آلومینیوم که در هوا محترق و در هلیوم در زمانهای مختلف سرد شده است.

کاهش ابتدایی دمای روشنایی به علت سرد شدن ذره در گاز خنثی می‌باشد و افزایش بعدی به علت مقداری اکسیژن محبوس در ذرات زیر سوزان می‌باشد که باعث ایجاد یک اکسید عادی در زمان سرد شدن می‌گردد و این اکسید گرما است.

براساس مشاهدات آزمایشگاهی می‌توان پدیده مشابهی از نفوذ اکسیژن به داخل ذرات فلزی سوزنده همراه با واکنش درونی فلز- اکسیژن را برای Ta, MO, W, Fe, cu نیز در نظر گرفت.

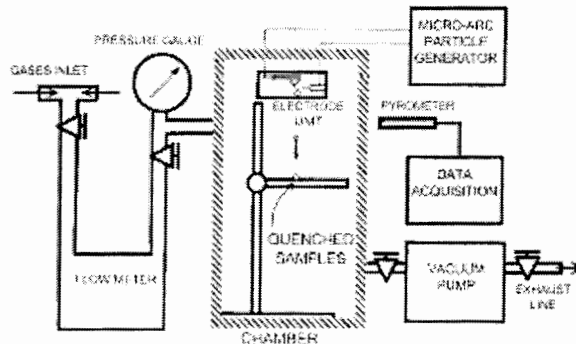
<sup>۱</sup> - Quenching Gas

ضمناً مشاهدات ، تئوری سوزش ذرات آلومینیوم در فاز بخار براساس نقطه جوش و ذوب آلومینیوم و  $Al_2O_3$  را تأیید می کنند.

## ۲-۶-۲- بررسی مکانیزم احتراق نامتقارن ذره آلومینیوم [۶]

در سال ۱۹۹۹ میلادی Dreizin مقاله دیگری ارائه نمود که در آن در خصوص احتراق نامتقارن تک ذره آلومینیوم مطالبی را عنوان نموده بود. ذیلاً به طور خلاصه به دستگاه آزمایش مورد استفاده وی و مطالب ارائه شده اشاراتی خواهیم داشت.

Dreizin در این آزمایشات نیز از دستگاه GEMMED که در شکل (۲-۲۲) نشان داده شده است استفاده نمود.

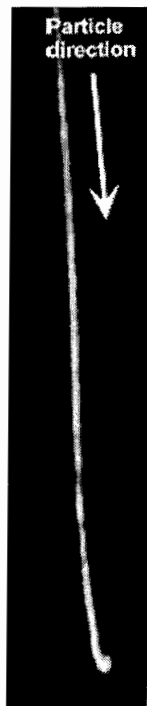


شکل ۲-۲۲- طرحواره ای از اجزای دستگاه آزمایشگاهی GEMMED جهت بررسی احتراق تک ذره



در این آزمایشات ذرات با قطرهای ۲۵۰ میکرون و ۹۰ میکرون تولید شده و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند تقریبی از اعداد بی‌بعد Peclet<sup>۱</sup> در خصوص انتقال حرارت و انتقال جرم نشان می‌دهد که در شرایط آزمایش، انتقال حرارت و انتقال جرم عمدتاً به شیوه هدایت انجام می‌شود. بنابراین اثر جابه‌جایی بر انتقال حرارت و جرم در این آزمایش خاص بسیار کم است.

در آزمایشات مشاهده شد که در مسیر سقوط ذره تغییراتی ایجاد می‌شود. تغییر در مسیر سقوط ذره که در شکل (۲-۲۳) به خوبی نمایان است، خصوصاً در انتهای فرایند احتراق نشان دهنده عدم تقارن در سوزش تک ذره آلومینیوم می‌باشد.



شکل ۲-۲۳- ردیابی ذره در حال  
سوزش با قطر اولیه ۲۵۰ میکرون در  
مخلوطی از اکسیژن/آرگون

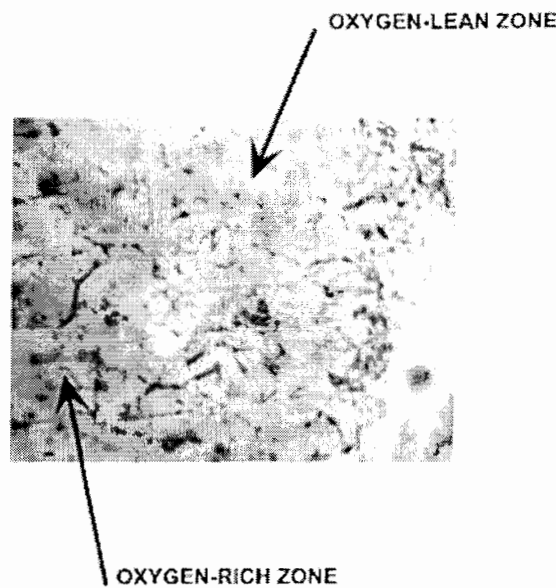
<sup>۱</sup> - عدد Peclet انتقال حرارت به صورت نسبت انتقال حرارت جابه‌جایی به انتقال حرارت هدایتی تعریف می‌شود.

تحلیلهای مربوط به سطح و داخل ذره فقط بر روی ذراتی با قطر ۲۵۰ میکرون انجام می‌شود. این تحلیلهای که توسط میکروسکوپ الکترونی بر روی ذرات محترق شده و خاموش شده صورت گرفته نشان می‌دهند که در محیطهای گازی آزمایش یعنی  $Ar/O_2$ ,  $He/O_2$  بر روی برخی از ذرات لایه اکسیدی تشکیل می‌گردد. به شکل (۲-۲۴) توجه کنید. اندازه لایه اکسیدی شکل گرفته در محیطهای گازی  $Ar/O_2$  و  $He/O_2$  نسبت به اندازه لایه اکسیدی تشکیل شده در هوا به طور محسوسی کوچکتر می‌باشد ( در مقایسه با قطر ذره ) .



شکل ۲-۲۴- این تصویر که توسط یک میکروسکوپ الکترونی گرفته شده یک ذره آلومینیوم با قطر اولیه ۲۵۰ میکرون را پس از گذشت ۴۸ ms از سوختن در مخلوط هلیوم/اکسیژن نشان می‌دهد.

بررسیهای اسپکتروسکوپی نشان می‌دهد که در داخل ذره، اکسیژن وجود دارد که این اکسیژن به طور یکنواخت پخش نمی‌شود. تحلیل‌های BSE<sup>۱</sup> نشان می‌دهد که در فازهایی با محتوای مختلف اکسیژن در داخل ذره وجود دارد. با استفاده از سیگنال‌های بازگشتی BSE دو ناحیه مختلف در درون ذره قابل تشخیص می‌باشد؛ یکی ناحیه حاوی اکسیژن زیاد و دیگری ناحیه حاوی اکسیژن کم (شکل ۲۵).



شکل ۲-۲۵- تصویری از یک ذره آلومینیوم سرد شده با قطر اولیه ۲۵۰ میکرون که پس از گذشت ۷۲ ms از احتراق در مخلوط آرگون/اکسیژن بدست آمده است.

عدم تقارن : عدم تقارن در احتراق تک ذره آلومینیوم قابل مشاهده است و این پدیده در تمام محیط‌های گازی که در آزمایش‌های مختلف به کار رفته‌اند دیده می‌شود. بر اساس مشاهدات صورت

<sup>۱</sup> -Back Scattering Electron

گرفته در احتراق ذره آلومینیوم در حالت‌های حضور جاذبه معمولی و نیز جاذبه بسیار کم می‌توان دریافت که عدم تقارن در شعله آلومینیوم بعد از ایجاد غیر یکنواختی در سطح مایع ذره رخ می‌دهد که این غیر یکنواختی نتیجه یک تغییر فاز می‌باشد. در واقع تقسیم ترکیب‌های اکسیژن / آلومینیوم به دو فاز مختلف اکسیژن غنی و اکسیژن رقیق یک تغییر فاز در سطح ذره محسوب می‌شود.

مطالعات تجربی نشان می‌دهد که عدم یکنواختی در نرخ انتقال اکسیژن به سطح ذره در نهایت در تشکیل لایه اکسیدی اثر می‌گذارد. هر چه پدیده تجزیه و حل اکسیژن در درون ذره شدیدتر باشد، احتراق نامتقارن ذره زودتر شروع شده و تشکیل لایه اکسیدی نیز بیشتر خواهد بود.

عمده‌ترین شکلی که اکسیژن به سطح ذره آلومینیوم در حال احتراق راه می‌یابد از طریق اکسیدهای میانی<sup>۱</sup> آلومینیوم نظیر  $AlO$ ,  $Al_2O$ ,  $Al_2O_2$  می‌باشد. در واقع اکسیژن به فرم مولکولی یا اتمی شانس کمی دارد تا بتواند به سطح ذره برسد چرا که احتمال فراوانی وجود دارد که بین این فرم از اکسیژن و آلومینیوم و نیز اکسیدهای میانی آن واکنش رخ دهد. از طرفی بخار اکسید استوکیومتری ( $Al_2O_3$ ) به سرعت چگالیده شده و در شرایطی که جریان گاز قدرتمندی (جریان استفان) از سطح به سمت خارج آن (در اثر تبخیر ذره) داریم، احتمال اینکه این اکسید آلومینیوم بتواند به سطح ذره برسد خیلی کم خواهد بود.

در آن نواحی از سطح ذره که آلومینیوم کمتر تبخیر می‌شود جریان گاز خروجی کم شده و جریان ورودی به سطح افزایش می‌یابد و در واقع در این نواحی است که یک فاز اکسیژن غنی تشکیل می‌گردد.

<sup>۱</sup> -Suboxide

بنابراین در این نواحی انتقال اکسیژن به سطح زیاد می‌شود که در نتیجه آن ، در اشباع این نواحی به وسیله اکسیژن و تبدیل آن به اکسید استوکیومتری تسریع می‌شود. این تقابل بین جریان استفان و نرخ پخش می‌تواند بیان کند که چرا لایه اکسیدی به صورت متقارن تشکیل نمی‌شود. مکانیزم کیفی فوق که در مورد احتراق نامتقارن آلومینیوم و تشکیل لایه اکسیدی ارائه شده نشان می‌دهد که اگر مخلوط گازی بتواند مولکول اکسید تشکیل دهد ( مثلا  $\text{NO}_x$  ) این اجزاء به انتقال اکسیژن به سطح ذره در حال احتراق کمک خواهد کرد.

فصل سوم؛

# اندازه گیری تجربی سرعت سوزش در ابر ذرات آلومینیوم

در زمینه شناخت مکانیزم شعله آشفته می‌توان به کارهای جاروسینسکی و چومیاک<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۲م. که جهت مشاهده رفتار شعله آشفته انجام پذیرفت اشاره نمود [۱۲]. آزمایشهای آنها در یک لوله عمودی به طول ۱/۵ متر با سطح مقطع مربعی ۵۰×۵۰ میلیمتری از جنس شیشه نشکن انجام شد که آشفته‌گی در لوله را با استفاده از یک پنکه با سرعت بالا ایجاد می‌کردند. آنها از مشاهده ساختار شعله‌های مغشوش دریافتند که شعله به یک ناحیه واکنش توزیع شده تبدیل نمی‌شود، بلکه به نواحی واکنشی متنوع با ابعاد کوچکتر از مقیاس صحیح توربولانس تقسیم می‌گردد. در سال ۱۹۸۶م. بوند<sup>۲</sup> در آزمایشات خود مشاهده نمود که نرخ افزایش فشار در طول انفجار بسیار وابسته به سطح اولیه آشفته‌گی موجود در لوله (محل انجام آزمایشات احتراق ابر ذرات) می‌باشد [۲۱].

دو سال بعد برادلی<sup>۳</sup> [۲۲] و پو<sup>۴</sup> [۲۳] نیز با انجام آزمایشهایی به همین نتایج دست یافتند. آنها توربولانس اولیه در دستگاه آزمایش خود را توسط مقایسه با اندازه‌گیریهای انجام شده در شرایط مشابه در مخلوطهای گازی همگن تخمین زده‌اند. اما این روش براین فرض استوار گردیده که آشفته‌گی نباید تحت تأثیر ذرات جامد قرار گیرد. در همان سال نقش آشفته‌گی در حدود اشتعال‌پذیری ابر ذرات توسط نتلتون<sup>۵</sup> نشان داده شد [۲۴]. در سال ۱۹۹۲م. پروست و ویزیو آزمایشات خود را در دو لوله با طول متفاوت و سطح مقطع متفاوت انجام دادند [۲۵]. آنها با انجام یک سری آزمایشات اولیه نشان دادند که اگر افزایش سطح اولیه توربولانس به روش مشابهی مانند مخلوطهای گازی پیش آمیخته، سرعت آشفته‌گی شعله را افزایش دهد، نرخ این افزایش به طور کلی در

<sup>۱</sup>. Chomiak

<sup>۲</sup>. Bond

<sup>۳</sup>. Bradley

<sup>۴</sup>. Pu

<sup>۵</sup>. Nettleton

مخلوطهای گازی و ذرات متفاوت است. آنها به این نتیجه رسیدند که مقدار سرعت شعله آشفته کمی بیشتر از سرعت شعله آرام در غلظت مشابه است و همچنین در محدوده آزمایش شده غلظت ذرات، سرعت شعله با افزایش غلظت ذرات افزایش می‌یابد.

در این بخش ابتدا به بررسی دستگاه آزمایش و تشریح نحوه آزمایش می‌پردازیم. سپس نتایج آزمایش در خصوص سرعت سوزش و جزئیات آن ارائه و مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

### ۳-۲- شرح دستگاه:

در این بخش به تشریح قسمتهای مهم دستگاه آزمایش می‌پردازیم.

### ۳-۲-۱- ذرات سوخت:

برخلاف ذرات زغالسنگ که دارای شرایط ناپایدار و متغیری می‌باشند، ذرات فلزات برای مطالعات بنیادی احتراق ذرات ریز جامد مناسب می‌باشند. این ذرات خالص بوده و جنس یکنواخت دارند، در مقابل ذرات آلی تجزیه‌پذیر بوده و به علت این تجزیه شدن و تشکیل بخارات گسترده درجه حرارت زیادی دارند. درجه حرارتی که این سوختها شروع به تجزیه شدن می‌کنند، بسیار پایین‌تر از دمای شعله می‌باشد. بنابراین ساختار این شعله‌ها بسیار شبیه به شعله هیدروکربنهای سنگین اسپری شده می‌باشد. در مقابل این خاصیت، درجه حرارت ذوب بسیاری از فلزات نزدیک و یا حتی بالاتر از دمای آدیاباتیک شعله می‌باشد و این بدان معنی است که فرایند احتراق غیر یکنواخت نقش مهمی در شعله ذرات فلزی دارد.

برای ذرات آلومینیوم که برای این آزمایشات انتخاب شده‌اند مشخصات اشتعال و احتراق یک ذره تنها، نسبتاً به خوبی شناخته شده است. پودر آلومینیوم اتمی که در این آزمایش مورد

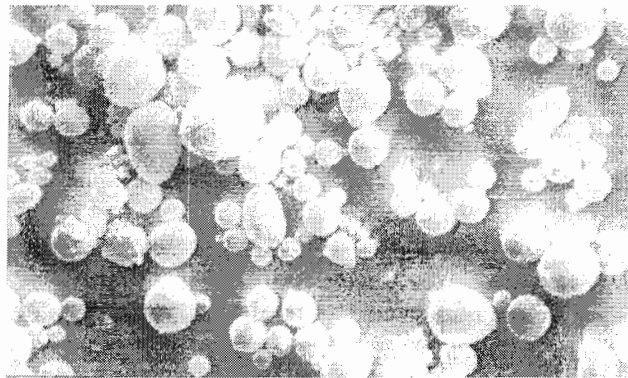


استفاده قرار گرفته است دارای حداقل درجه خلوص ۹۹٪ و ذرات آن دارای شکل کروی می باشد. برای بدست آوردن قطر متوسط ذرات که در مراحل بعدی مورد استفاده قرار می گیرند می توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i d_i^2} \quad (1-3)$$

که نشان دهنده متوسط حجم ذرات به متوسط سطح ذرات می باشد.

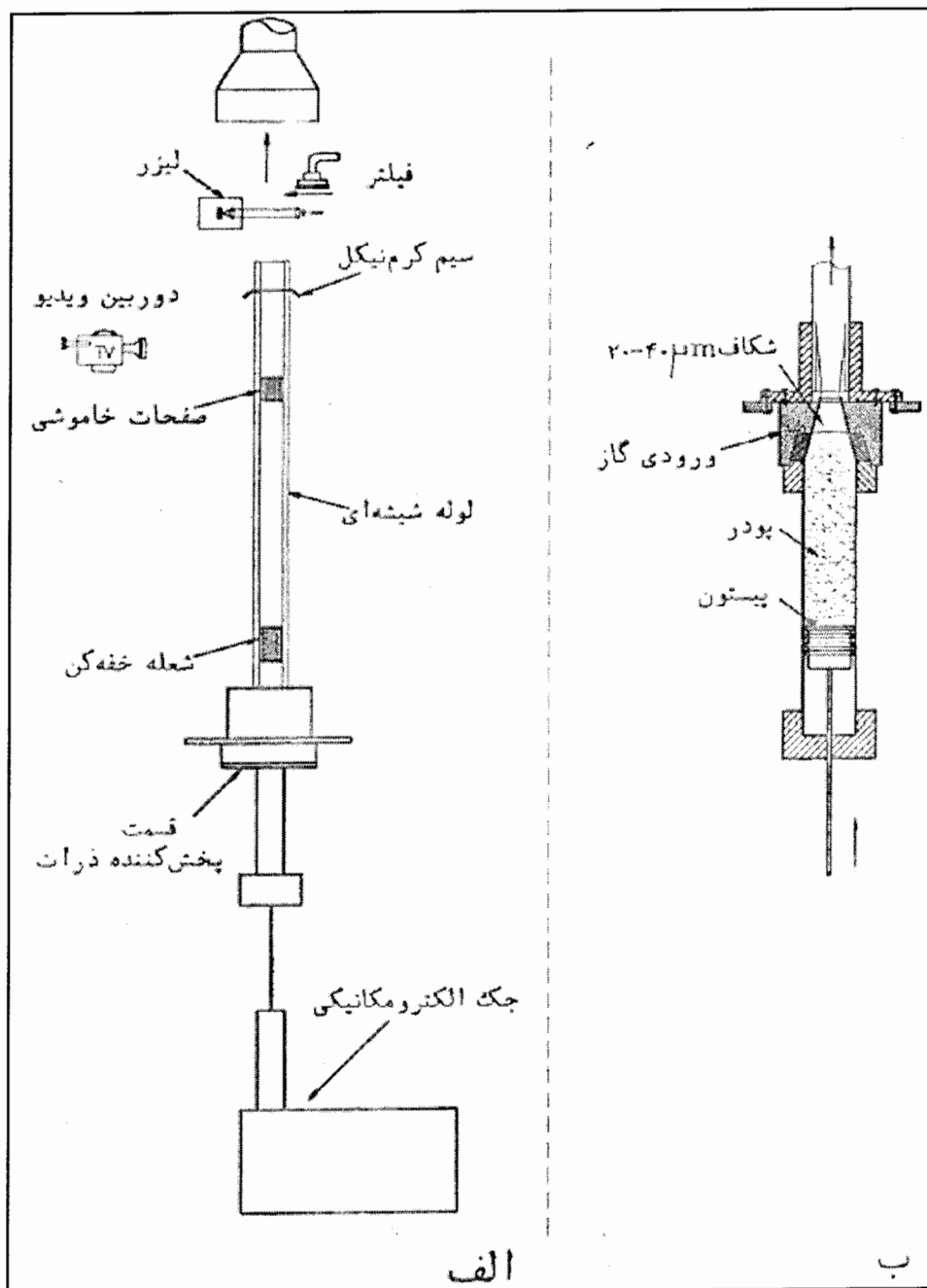
شکل (۱-۳) تصویر بزرگنمایی شده ذرات آلومینیوم را نشان می دهد. این تصویر نشان می دهد که ذرات دارای شکل کروی هستند.



شکل ۱-۳- تصویر میکروسکوپی با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر

### ۳-۲-۲- سیستم تزریق ذرات:

شکل شماتیک دستگاه آزمایش و قسمت تزریق ذرات در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل ۳-۲- الف) نمایی از دستگاه آزمایش آزمایشگاه احتراق دانشگاه علم و صنعت ایران  
 ب) جزئیات قسمتهای تغذیه کننده و پخش کننده ذرات

سیستم پخش کننده ذرات شامل دو قسمت می‌باشد:

۱- تغذیه کننده ذرات

۲- پخش کننده ذرات

ذرات سوخت بوسیله قسمتی سرنگ مانند که دارای قطر داخلی ۲/۵ سانتیمتر و حداکثر طول کورس ۱۷ سانتیمتر است به سمت بالا حرکت داده شده تا توسط قسمت پخش کننده، پخش شوند. نسبت تزریق این ذرات به داخل جریان با تغییر سرعت پیستون به کمک یک جک الکترومکانیکی مخصوص کنترل می‌شود. محدودیت تغییرات جک ( $0.01 - 0.05 \text{ cm/s}$ ) می‌باشد.

ذرات سوخت در پایین قسمت کله قندی به علت برخورد به جت هوای ورودی با شدت جریانی حدود ( $3 - 90 \text{ lit/min}$ ) که بوسیله روتامتر اندازه‌گیری شده و از سوراخ دایره‌ای تغذیه می‌شود پخش می‌گردند. یک لوله به قطر ۴/۶ سانتی‌متر و طول ۱۵۰ سانتیمتر که از جنس شیشه پیرکس می‌باشد به قسمت بالای محفظه پخش‌کنندگی که دارای یک دیفیوزر کله‌قندی ۸ درجه‌ای است متصل می‌باشد. وظیفه این پخش‌کننده، انبساط مخلوط و ایجاد جریانی لایه‌ای است چرا که مخلوط در ابتدا به صورت آشفته می‌باشد.

### ۳-۲-۳ - قسمت اندازه‌گیری غلظت ذرات

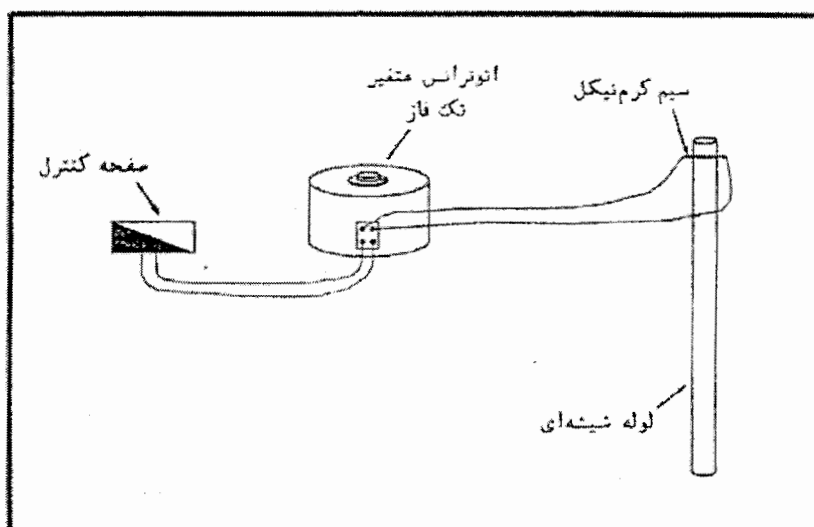
در طرحی که برای اندازه‌گیری غلظت ذرات مورد استفاده قرار گرفته است از یک دستگاه لیزر هلیوم - نئون (مدل IR۲۰۰۰ ساخت مرکز تحقیقات لیزر) به عنوان منبع تولید نور استفاده شده است. نور پس از عبور از ابری از ذرات قدرت خود را از دست داده و با اندازه‌گیری قدرت نور عبوری از ابر ذرات و میزان ذراتی که روی فیلتری متصل به مکش یک جاروبرقی در مدت زمانی

مشخص جمع می‌شود، می‌توان لیزر را کالیبره کرده و غلظت ذرات را بدست آورد. این فیلترها حدود ۹۵٪ ذرات را در مدت زمان کوتاه جذب می‌نمایند.

### ۳-۲-۴- سیستم جرقه

برای ایجاد شعله در این دستگاه دو سیستم پیش‌بینی شده است؛ یکی سیستم ایجاد شعله با استفاده از سیم گرم- نیکل یا تنگستن و دیگری سیستم ایجاد شعله با استفاده از شعله گاز پروپان. از آنجا که در تمامی آزمایشات از سیستم نوع اول استفاده شد تنها به شرح این سیستم بسنده می‌نماییم.

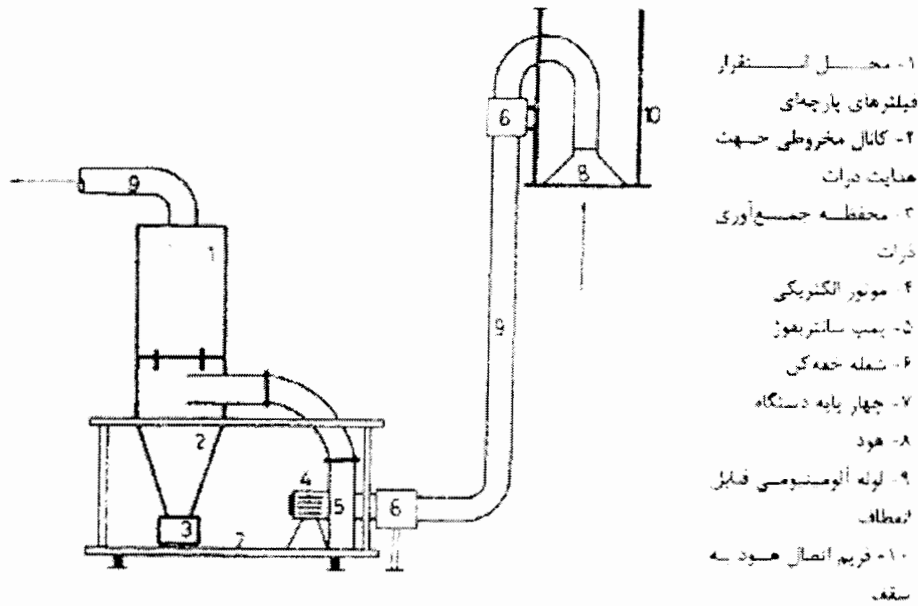
همانطور که می‌دانیم اجسام در مقابل عبور الکتریسیته از خود مقاومت نشان می‌دهند که فلزات نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشند. همچنین می‌دانیم که مقاومت یک تکه سیم در مقابل عبور جریان الکتریسیته با طول سیم نسبت مستقیم و با سطح مقطع سیم نسبت عکس دارد. با توجه به این موارد برای ایجاد حرارت می‌توان با عبور دادن جریان الکتریسیته از سیمی نازک تولید گرما نمود. در این روش با به کارگیری یک اتوترانس با دور متغیر، جریانی را به دو طرف سیمی نازک از جنس گرم-نیکل یا تنگستن اعمال کرده تا با استفاده از حرارت ایجاد شده که توسط سیم نازک در ابر ذرات، شعله تشکیل گردد. شکل (۳-۳) طرحی از سیستم جرقه با استفاده از جریان الکتریسیته و سیم نازک گرم-نیکل می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود این سیستم مثال یک منبع تغذیه متغیر بوده که ولتاژی بین صفر تا ۲۵۰ ولت متناوب و حداکثر شدت جریانی معادل ۱۰ آمپر تولید می‌کند. با آزمایشات مختلفی که برای بوجود آمدن شعله انجام شد با استفاده از سیمی با قطر ۰/۵mm و طول ۱۰cm و اعمال ولتاژی حدود ۲۰ ولت می‌توان در مخلوط رقیق شعله را ایجاد نمود.



شکل ۳-۳- سیستم جرقه با استفاده از سیم کرم - نیکل

### ۳-۲-۵- سیستم تهویه

به منظور جلوگیری از پخش ذرات سوخته و نسوخته آلومینیوم در محیط و عدم آلودگی محیط زیست، این ذرات باید توسط یک سیستم جمع آوری شوند. به این منظور یک هود در بالای دستگاه آزمایش قرار داده شده است تا مخلوط سوخت و هوا پس از خروج از لوله آزمایش توسط این قسمت جذب شده و پس از عبور از فیلترهایی که ذرات معلق را در خود نگه می‌دارند به محیط خارج تخلیه شود. شکل (۳-۴) طرحواره ای از سیستم تهویه و متعلقات آن را نشان می‌دهد.

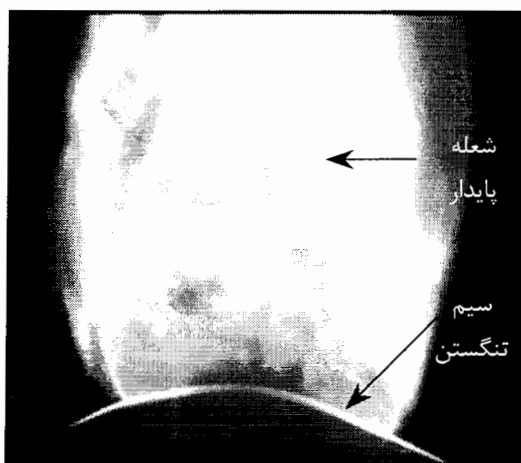


شکل ۳-۴- نمایشی از سیستم تهویه و متعلقات آن

### ۳-۳- روش انجام آزمایش

همانگونه که پیشتر نیز ذکر شد ذرات سوخت در پایین دستگاه با گاز ورودی که در آزمایشات ما شامل ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن بوده مخلوط شده و در بالای لوله به وسیله سیستم ایجاد شعله با استفاده از سیم کرم سیکل و یا تنگستن مشتعل می‌شوند. اما هنگام عبور مخلوط سوخت و هوا از داخل لوله تعدادی از این ذرات به بدنه لوله می‌چسبند و در نتیجه غلظت مخلوط ورودی به لوله بیشتر از غلظت مخلوط خروجی از لوله می‌باشد. به این دلیل ابتدا باید چندثانیه‌ای برای بوجود آوردن شرایط پایا، مخلوط سوخت و هوا را از داخل لوله عبور داد. پس از اینکه غلظت مخلوط خروجی ثابت شد دستگاه به حالتی پایا رسیده و آماده آزمایش می‌باشد.

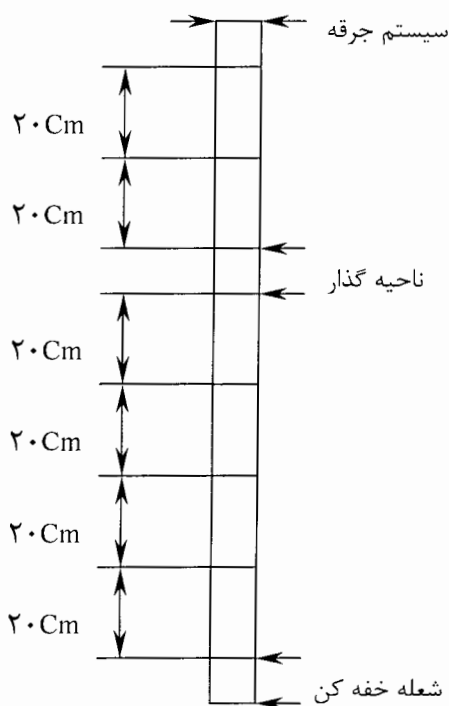
مخلوط سوخت و هوا در انتهای باز بالای لوله بوسیله سیم تنگستن مشتعل می‌گردد. این شعله به علت فشار هوای خروجی از لوله که به سمت بالا می‌باشد در بالای لوله ساکن می‌ماند. البته اگر شدت هوای خروجی از لوله یا هوای ورودی به دستگاه تهویه خیلی کم یا زیاد باشد شعله یا به طرف بالا حرکت کرده، یا خاموش شده و یا به سمت پایین لوله حرکت می‌کند. زمانی که شکل شعله در دهانه خروجی لوله به حالتی پایدار رسید، جریان گاز بوسیله شیر برقی قطع شده و شعله در لوله به سمت پایین حرکت می‌نماید. تشکیل شعله و انتشار آن توسط یک دوربین تصویری در سرعت بالا با قابلیت ۸۰۰۰ فریم در ثانیه ثبت می‌شود. در شکل (۳-۵)، تصویری از شعله ذرات آلومینیوم در مخلوطی از گاز ذکر شده که در بالای لوله شیشه‌ای تشکیل گردیده نشان داده شده است.



شکل ۳-۵- تصویری از شعله پایدار ذرات آلومینیوم ، غلظت ذرات  $95g/m^3$

در انتهای لوله شیشه‌ای از یک شعله خفه کن استفاده شده که برای خاموش نمودن شعله‌های احتمالی مورد استفاده قرار گرفته تا از ورود شعله به منبع تغذیه ذرات جلوگیری شود.

برای بدست آوردن سرعت انتشار شعله، لوله شیشه‌ای (محفظه احتراق) به فواصل مساوی تقسیم می‌گردد تا هنگام عبور شعله بتوان زمان طی شده فواصل معین شده را بدست آورد. این عمل با شمارش تعداد فریم‌ها که هر فریم کسری از ثانیه را تشکیل می‌دهد انجام می‌گیرد. با داشتن زمان و فاصله طی شده توسط شعله، سرعت انتشار شعله محاسبه می‌گردد. شکل (۳-۶) نمایشگر تقسیم‌بندی محفظه احتراق می‌باشد.



شکل ۳-۶- نمایشگر تقسیم‌بندی محفظه احتراق

سرعت سوزش نیز از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$S = \frac{V}{A_f / A_i} \quad (۳-۲)$$



که در آن  $S$  سرعت سوزش،  $V$  سرعت انتشار،  $A_i$  مساحت سطح مقطع لوله و  $A_f$  مساحت سطح شعله می‌باشد. مقدار کسر  $\frac{A_f}{A_i}$  برای شعله آرام  $1/5$  و برای شعله آشفته  $2$  در نظر گرفته شده است [۲۶].

### ۳-۴- نحوه کالیبراسیون:

قبل از انجام آزمایش، لیزر را به مدت ۱۵ دقیقه روشن می‌کنیم تا گرم شود. آنگاه سیلندر سیستم تزریق دستگاه را از ذرات آلومینیوم با قطر مورد نظر پر می‌نمائیم. سپس ۲ عدد فیلتر از نوع فیلترهای مورد مصرف در پزشکی را به یکدیگر دوخته و به پمپ مکنده نصب می‌کنیم. سپس دستگاه را جهت انجام آزمایش آماده می‌نمائیم. شیر هوا را باز نموده و دبی جرمی را از روتامتر می‌خوانیم.

کلید تزریق را چندین بار به حالت خاموش و روشن می‌زنیم. پس از اینکه ابر ذرات تشکیل شده در بالای لوله به حالت یکنواخت درآمد، به مدت ۵ ثانیه فیلتر را جلوی لوله قرار می‌دهیم تا ذرات به داخل آن نفوذ کنند. همزمان تغییر آمپر جریان دو طرف مقاومت آشکارساز<sup>۱</sup> پس از تحلیل دیجیتالی روی مانیتور کامپیوتر نشان داده می‌شود. ذرات رسوب کرده روی فیلتر با استفاده از ترازوی دیجیتالی توزین می‌شوند.

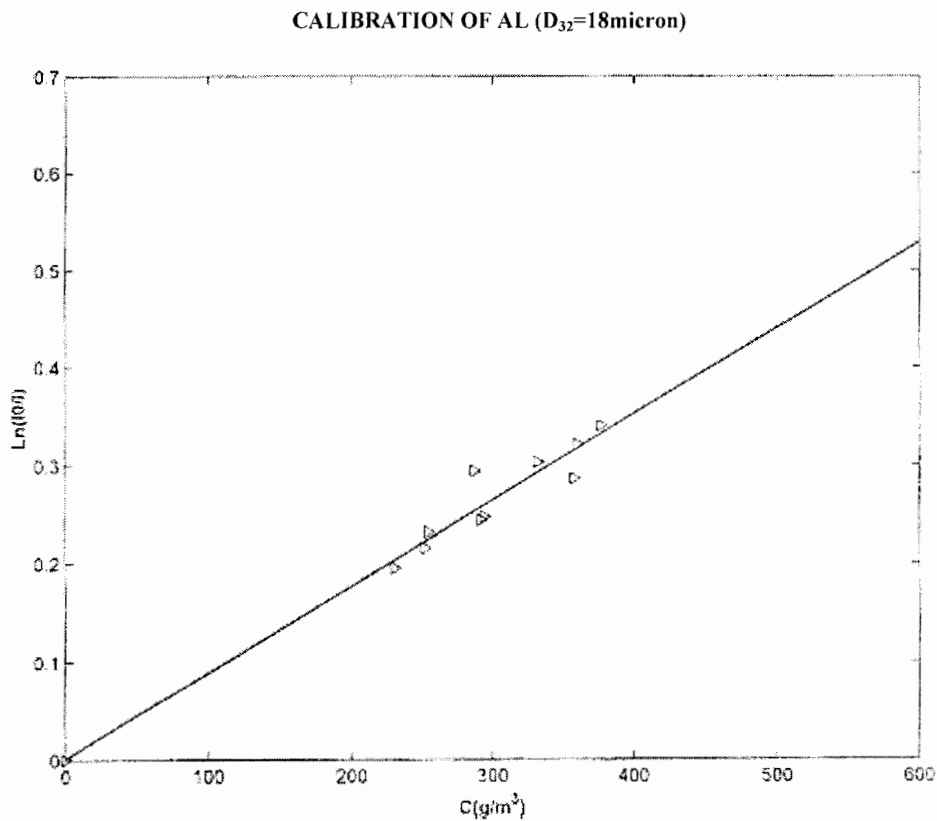
نتایج اخذ شده از آزمایش را در فرمول ذیل قرار می‌دهیم:

$$C = \frac{m_f - m_i}{t} \times \frac{1}{Q} \quad (3-3)$$

که در آن  $m_f$  جرم نهایی فیلتر،  $m_i$  جرم اولیه فیلتر،  $t$  زمان رسوب بر روی فیلتر و  $Q$  دبی جرمی هوا می‌باشد.

<sup>۱</sup>. Detector

مقادیر  $C$  و  $\ln(I_o/I)$  به ترتیب روی محور عرضی ( $y$ ) و طولی ( $x$ ) ترسیم می‌شوند. با استفاده از روشهای آماری (حداقل مجذور فاصله)، از مجموعه داده‌ها یک خط عبور داده می‌شود. ضریب زاویه این خط برای کالیبراسیون نتایج آزمایشاتی که غلظت ذرات از لیزر خوانده شده است به کار می‌رود. نمونه‌ای از نمودارهای کالیبراسیون در شکل (۷-۳) نشان داده شده است [۲۷].



شکل ۷-۳- نمودار کالیبراسیون ذرات آلومینیوم با قطر ۱۸ میکرون

### ۳-۵- نتایج آزمایش

در این بخش ابتدا رفتار شعله در حال انتشار را مورد بررسی قرار داده و سپس به ذکر و بررسی آزمایشات انجام شده به همراه نمودارهای مربوطه می پردازیم.

#### ۳-۵-۱- بررسی رفتار انتشار شعله

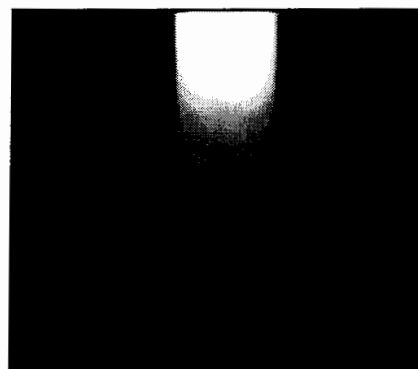
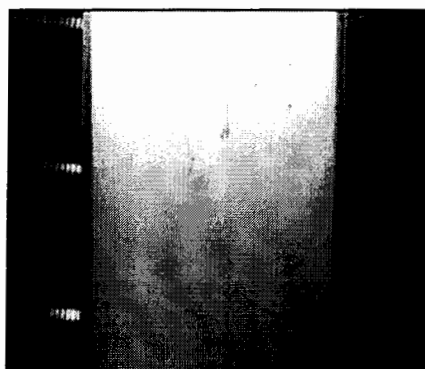
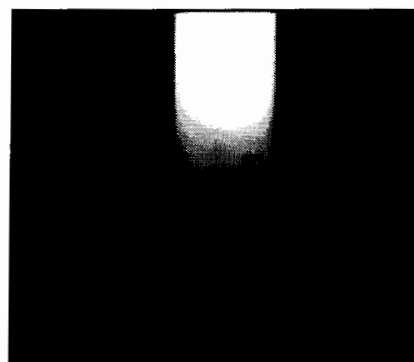
با انجام آزمایشات متعدد و بررسی تصاویر بدست آمده از دوربین سرعت بالا مشاهده می شود که انتشار شعله در جهت شتاب ثقل در داخل لوله شیشه ای را می توان به دو ناحیه عمده تقسیم نمود.

در ناحیه اول که حدود  $\frac{1}{3}$  تا  $\frac{1}{2}$  طول بالایی لوله را شامل می شود، شعله آرام بوده و تقریباً با سرعتی ثابت منتشر می گردد. پیشانی شعله در این ناحیه بدون اعوجاج و تقریباً تخت و یا سهمی شکل<sup>۱</sup> می باشد. اشکال (۳-۸) و (۳-۹) تصاویری از پیشانی شعله آرام ذرات آلومینیوم را در مخلوطی از گاز اکسیژن - نیتروژن نشان می دهد که با استفاده از دوربین سرعت بالا بدست آمده است. همچنین در غلظتهای پایین، تعدادی اعوجاج با مقیاسی در حدود  $\frac{1}{3}$  قطر لوله مشاهده می شود (شکل (۳-۱۰)).

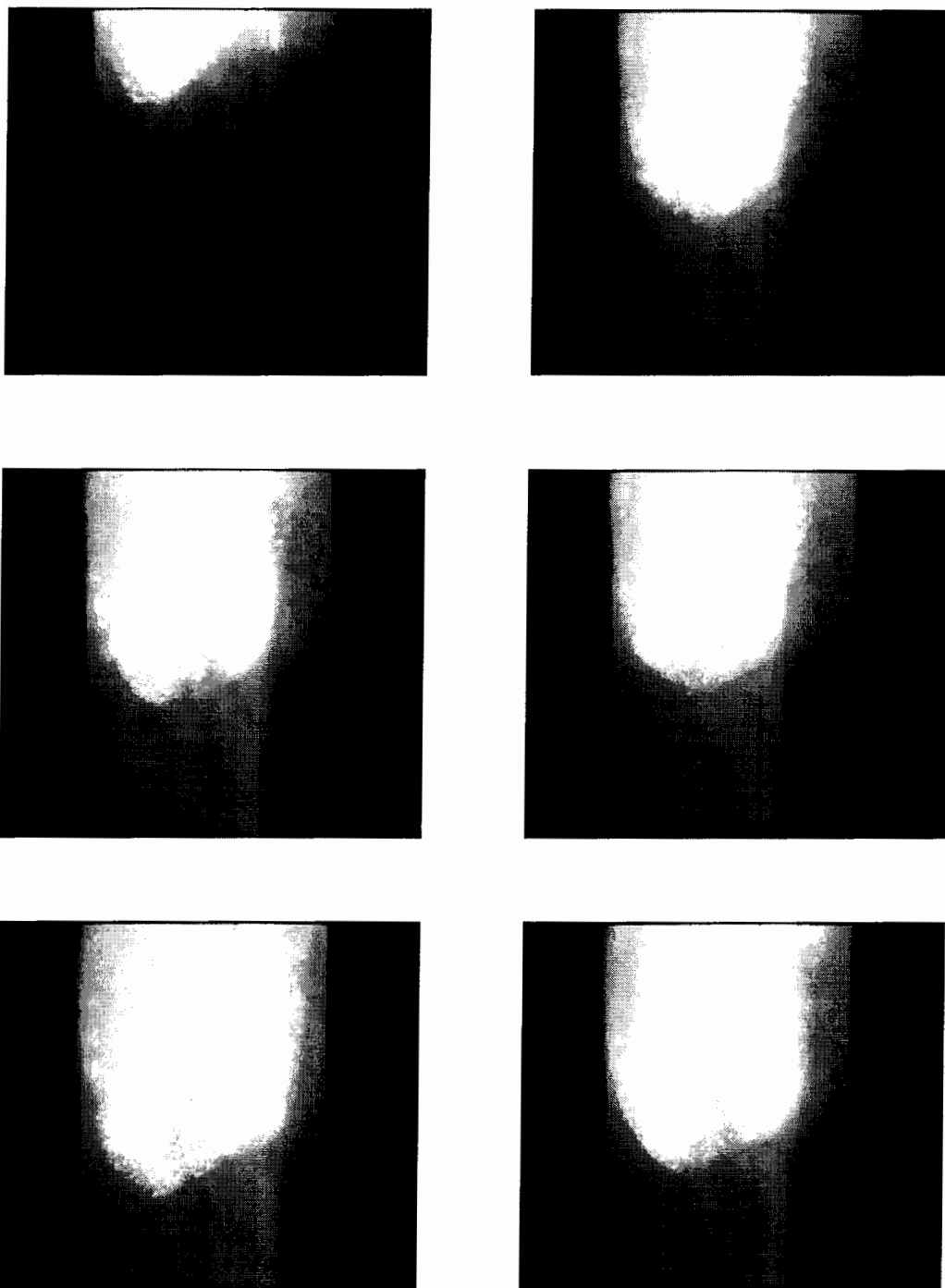
<sup>۱</sup> Parabolic



شکل ۳-۸- تصاویری از شعله آرام ذرات آلومینوم با پیشانی تخت  
غلظت ذرات  $90 \text{ g/m}^3$



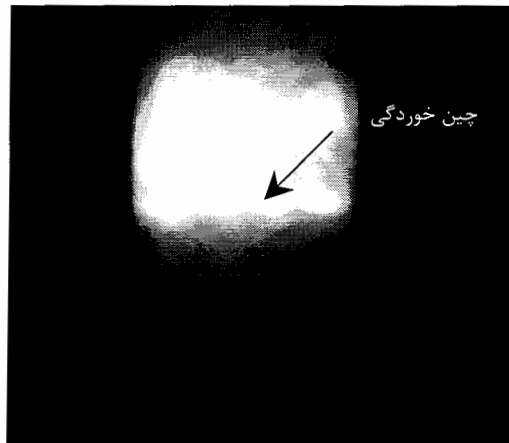
شکل ۳-۹- تصاویری از شعله آرام با پیشانی سهمی شکل  
غلظت ذرات  $100 \text{ g/m}^3$



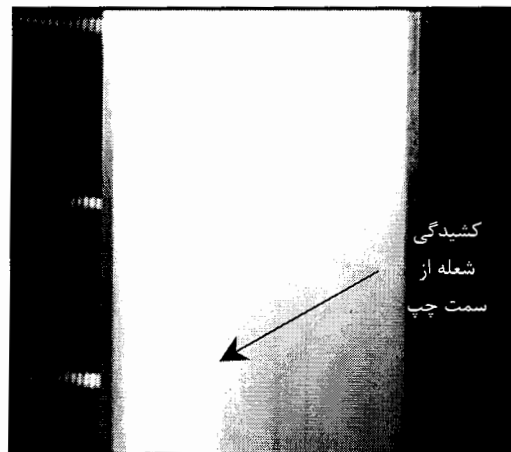
شکل ۳-۱۰- اوجاچه‌های مشاهده شده در ناحیه آرام  
غلظت ذرات  $64 \text{ g/m}^3$

ناحیه دوم معمولاً زمانی که غلظت ذرات نزدیک به مقدار استوکیومتریک ( $310 \frac{g}{m^3}$ )

باشد بوجود می‌آید. این ناحیه با نوسان شعله آغاز می‌گردد به طوریکه نور شعله به صورت متناوب کم و زیاد می‌گردد. دومین مرحله انتشار شعله ذرات، بعد از اینکه شعله حدود ۲۰ تا ۴۰ سانتیمتر در ناحیه نوسانی همراه با افزایش دامنه نوسانات انتشار یافت، آغاز می‌شود. شعله در این ناحیه ناگهان مجبور به تحمل نوسانات سریع نامنظم گردیده که شعله را آشفته نموده و شتاب سریعی به آن می‌دهد. در ناحیه آشفته سرعت شعله با شتاب زیادی افزایش یافته و پیشانی شعله در این ناحیه دارای اشکال مختلفی می‌باشد. از جمله این اشکال می‌توان به چین خوردگیهای نامنظم، کشیدگی بیش از حد شعله از یک سمت، عدم پیشروی بخشی از شعله برخلاف بخشهای دیگر، وجود ورتکسها در شعله و چند تکه شدن شعله اشاره نمود. شکل (۳-۱۱) تصویری از یک شعله آشفته را نشان داده که در آن پیشانی شعله دارای چین خوردگیهای نامنظم می‌باشد. شکل (۳-۱۲) تصویری از یک شعله آشفته که پیشانی آن از سمت چپ به پایین کشیده شده را نشان می‌دهد. شکل (۳-۱۳) عدم پیشروی بخشی از شعله را در پیشانی شعله نشان می‌دهد. شکل (۳-۱۴) چند تکه شدن شعله آشفته را به تصویر می‌کشد. شکل (۳-۱۵) نیز نمایانگر وجود ورتکسها در شعله آشفته می‌باشد. شکل (۳-۱۶) نمایی نزدیک از یک شعله آشفته را نشان داده که در آن ویژگیهای یک شعله آشفته مشهود است.



شکل ۳-۱۱- شعله آشفته با چین خوردگیهای در پیشانی شعله  
غلظت ذرات  $240 \text{ g/m}^3$



شکل ۳-۱۲- کشیدگی در پیشانی شعله آشفته  
غلظت ذرات  $270 \text{ g/m}^3$



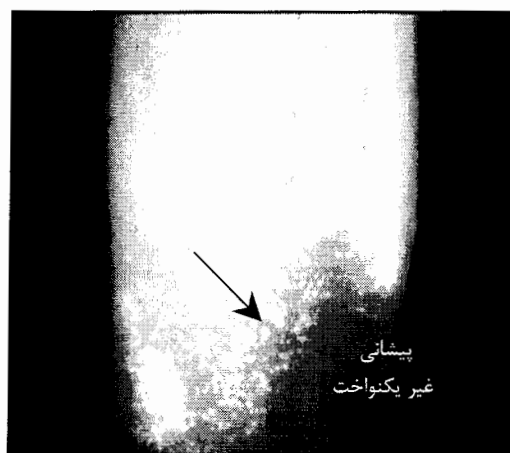
شکل ۳-۱۳- پیشروی ناحیه پیشگرم در داخل شعله  
غلظت ذرات  $240 \text{ g/m}^3$



شکل ۳-۱۴- چند تکه شدن شعله آشفته  
غلظت ذرات  $240 \text{ g/m}^3$



شکل ۳-۱۵- وجود ورتکسها در شعله آشفته  
غلظت ذرات  $240 \text{ g/m}^3$



شکل ۳-۱۶- نمای نزدیک شعله آشفته  
غلظت ذرات  $240 \text{ g/m}^3$

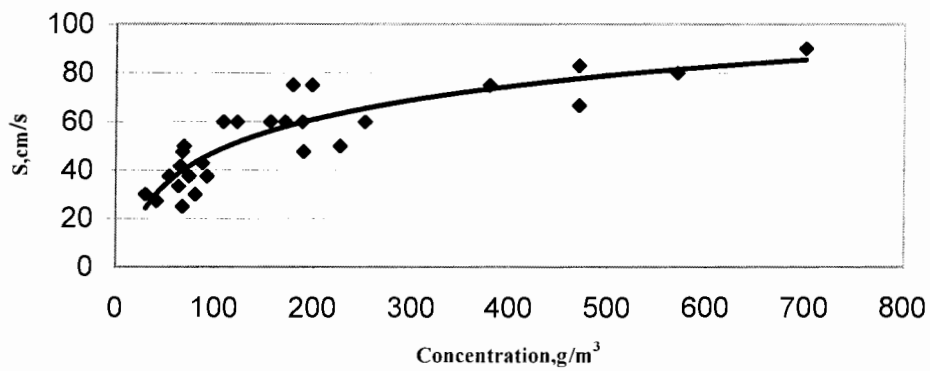


### ۳-۵-۲- آزمایش سرعت سوزش ذرات آلومینیوم با قطر ۱۸ میکرون:

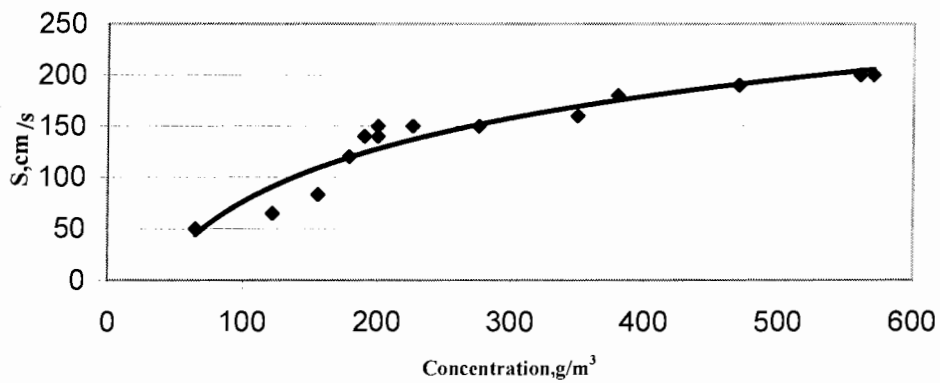
قبل از انجام آزمایش، ذرات ۱۸ میکرون را به مدت ۴۸ ساعت در کوره خشک کن قرار می‌دهیم تا کاملاً خشک شوند. سپس این ذرات را در داخل سیلندر مربوطه می‌ریزیم. آنگاه به ترتیبی که در قسمتهای قبلی ذکر شد، ذرات را به داخل لوله آزمایش تزریق می‌نمائیم و پس از ایجاد جریان یکنواخت ذرات در بالای لوله، ذرات را توسط سیم تنگستنی ملتهب مشتعل می‌کنیم و آنگاه سیستم تزریق را قطع نموده و اجازه می‌دهیم تا شعله در امتداد لوله به سمت پایین منتشر شود. همزمان از انتشار شعله توسط یک دوربین سرعت بالا تصویربرداری می‌گردد تا با بازبینی فیلم بتوان با کمک علائم روی محفظه احتراق ( لوله شیشه‌ای )، سرعت انتشار و سپس به طریقی که پیشتر ذکر شد سرعت سوزش را بدست آورد.

جزئیات احتراق ابر ذرات آلومینیوم به قطر ۱۸ میکرون در مخلوطی از اکسیژن - نیتروژن ( $21\% O_2 + 79\% N_2$ ) در جدول (الف - ۱) بخش ضمیمه آمده است.

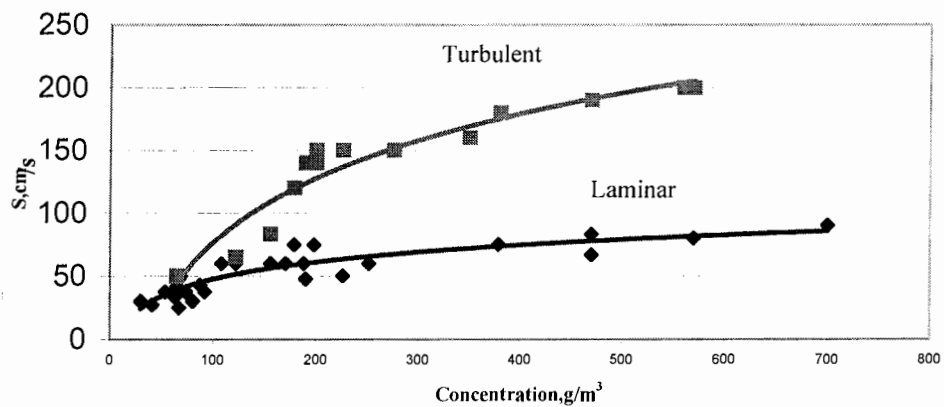
در شکل (۳-۱۷) نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش بدست آمده برای نواحی آرام و آشفته برحسب غلظت ذرات برای ذرات با قطر ۱۸ میکرون ترسیم شده است. همانطور که دیده می‌شود در یک غلظت خاص، همواره سرعت سوزش در ناحیه آشفته بیشتر از سرعت سوزش ناحیه آرام بوده و همچنین با افزایش غلظت ذرات، سرعت سوزش آرام و آشفته نیز افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)



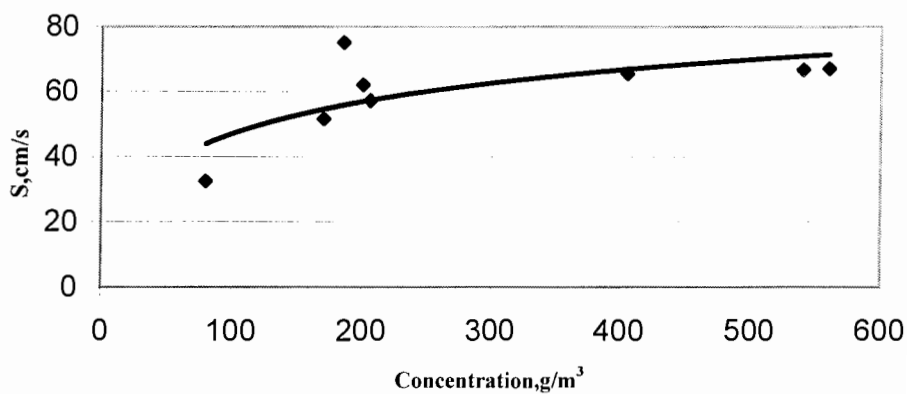
(ج)

شکل ۳-۱۷- نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش بر حسب غلظت، قطر ذره ۱۸ میکرون (الف) شعله آرام (ب) شعله آشفته (ج) مقایسه سرعت سوزش شعله های آرام و آشفته

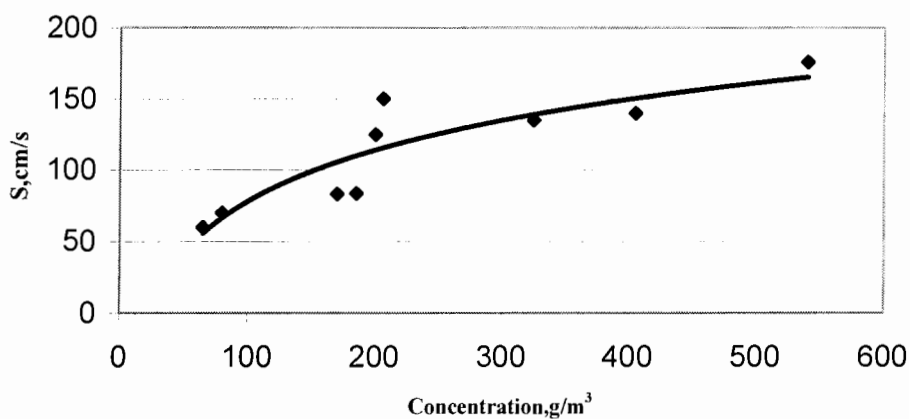
### ۳-۵-۳- آزمایش سرعت سوزش ذرات آلومینیوم با قطر ۲۸ میکرون:

با اعمال شرایط مشابه نسبت به آزمایشات قبلی ( به لحاظ مدت زمان خشک شدن ذرات، دمای کوره و نحوه آزمایش ) این بار با قطر ذرات ۲۸ میکرون، ۲۲ مرحله آزمایش انجام گرفت که نتایج آزمایشات موفق در جدول ( الف - ۲ ) ضمیمه درج شده است.

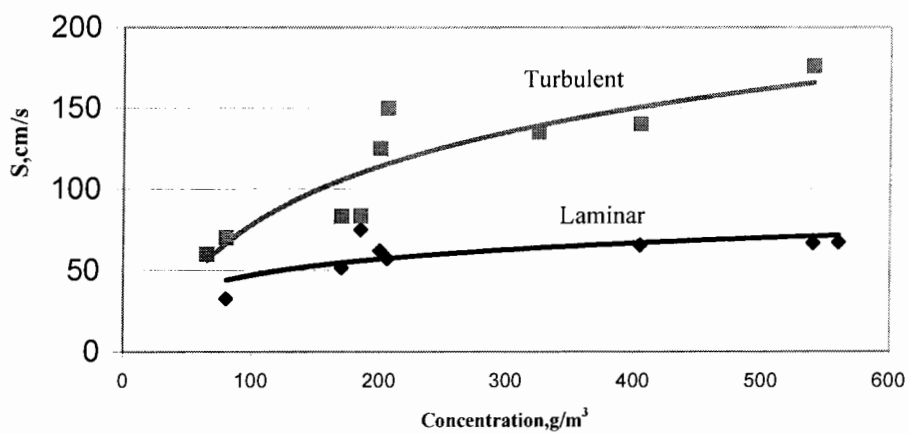
نمودار نتایج تجربه سرعت سوزش برای نواحی آرام و آشفته بر حسب غلظت در شکل (۳-۱۸) ترسیم شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳-۱۸- نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش برحسب غلظت، قطر ذره ۲۸ میکرون  
 (الف) شعله آرام (ب) شعله آشفته (ج) مقایسه سرعت سوزش شعله های آرام و آشفته

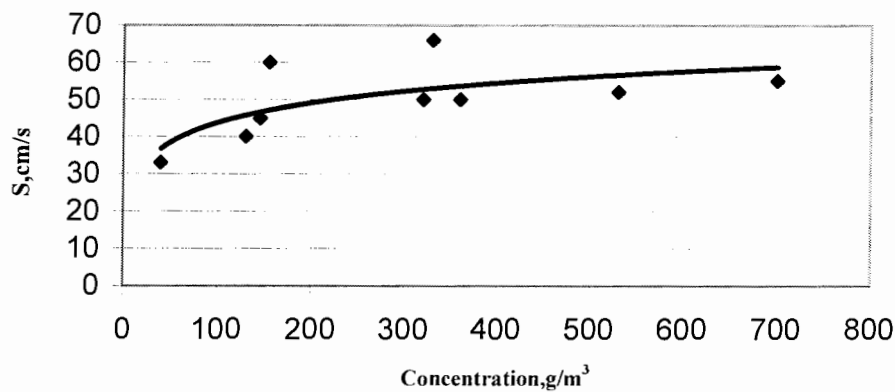
### ۳-۵-۴- آزمایش سرعت سوزش ذرات آلومینیوم با قطر ۳۸ میکرون:

تحت شرایط مشابه، ۱۸ مرحله آزمایش با قطر ۳۸ میکرون انجام پذیرفت که نتایج آن در جدول ( الف -۳ ) ضمیمه آمده است. نکته قابل ذکر اینکه در طی مراحل آزمایش، با افزایش قطر ذرات، پراکنش و تعلیق ذرات بعضاً با مشکل مواجه می‌شد. البته این موضوع قابل انتظار است، چرا که به عنوان مثال در ذرات با قطر ۳۸ میکرون، ذرات به علت سنگینی به سرعت از حالت تعلیق در آمده و در انتهای لوله آزمایش بر روی یکدیگر انباشته می‌شوند و لذا پخش یکنواخت در ابر ذرات که از شرایط اجرای آزمایش می‌باشد احراز نمی‌شد.

نکته دیگر اینکه در خلال آزمایشات با ذرات ۳۸ میکرون ناحیه آشفته هرگز مشاهده نشد، بلکه شعله همواره تا ابتدای  $\frac{1}{3}$  پایانی محفظه احتراق با ویژگیهای یک شعله آرام منتشر می‌شد اما از این ناحیه به بعد نتایج آزمایشات همواره متفاوت بود. به نظر می‌رسد این عدم تطابق به عدم تعلیق یکنواخت ذرات برمیگردد. از آنجا که سوسپانسیون یکنواخت ذرات در این گونه آزمایشات از جمله الزامات می‌باشد لذا با عدم احراز این شرایط در قسمت پایانی لوله آزمایش نتایج به هیچ وجه قابل اتکا نمی‌باشد. بنابراین در آزمایشات با ذرات ۳۸ میکرون تنها نتایج مربوط به ناحیه آرام آورده شده است.

نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش بدست آمده به صورت تابعی از غلظت برای ناحیه آرام

در شکل (۳-۱۹) ترسیم شده است.

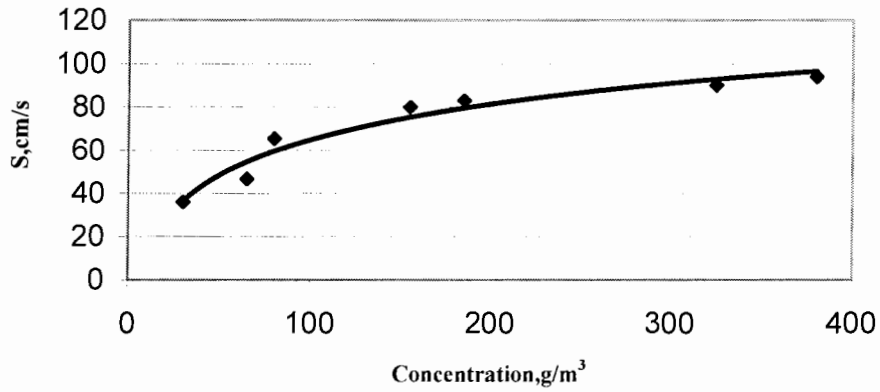


شکل ۳-۱۹- نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش شعله آرام برحسب غلظت، قطر ذره ۳۸ میکرون

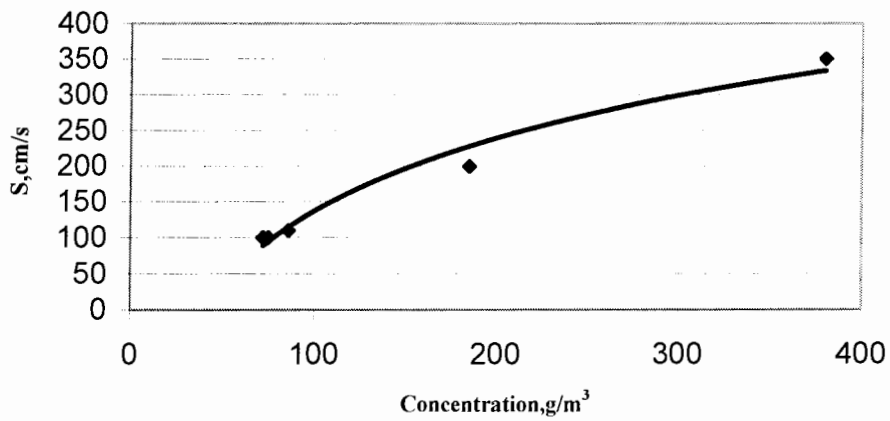
### ۳-۵-۵- آزمایش سرعت سوزش ذرات آلومینیوم با قطر ۵ میکرون:

ذرات آلومینیوم با قطر ۵ میکرون به دلیل اندازه‌های بسیار کوچک، حالت غبار دارند و به همین علت برای خشک نمودن این ذرات که تمایل به چسبیدن به یکدیگر (agglomeration) دارند زمانی حدود سه برابر نمونه‌های قبلی در نظر گرفته شد. ضمن اینکه دمای کوره نیز نسبت به آزمایشات قبلی در دمای بیشتری تنظیم گردید. نکته دیگر در خصوص ذرات با قطر بسیار کم مثل ۵ میکرون این بود که این ذرات با سرد شدن، به سرعت رطوبت جذب نموده و به هم می‌چسبیدند، به همین دلیل برای انجام آزمایشات موفق و تعلیق و پراکنش مناسب ذرات، می‌بایست به طور دائم از ذرات گرم استفاده می‌شد. برای ذرات با قطر ۵ میکرون هفده مرحله آزمایش انجام گرفت که نتایج آزمایشات موفق در جدول ( الف - ۴ ) ضمیمه درج شده است.

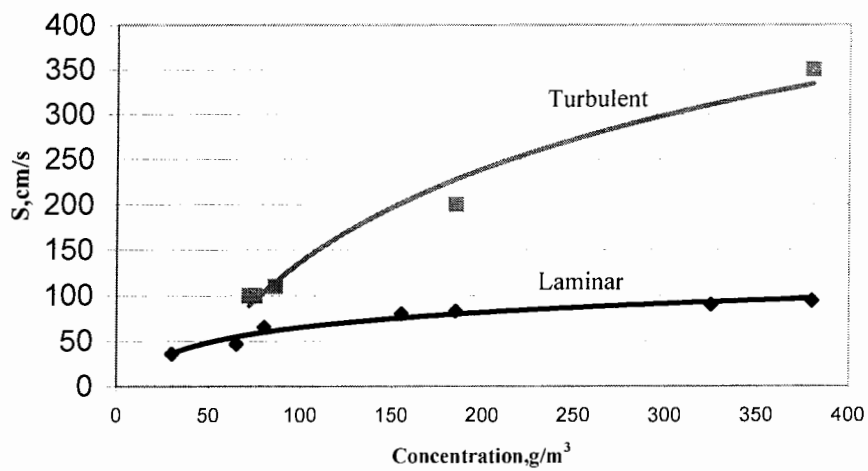
در شکل (۳-۲۰) نمودار سرعت سوزش برحسب غلظت در دو ناحیه آرام و آشفته رسم شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳-۲۰- نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش برحسب غلظت، قطر ذره ۵ میکرون  
 (الف) شعله آرام (ب) شعله آشفته (ج) مقایسه سرعت سوزش شعله های آرام و آشفته

### ۳-۵-۶- آزمایش سرعت سوزش ذرات آلومینیوم با قطر ۲ میکرون:

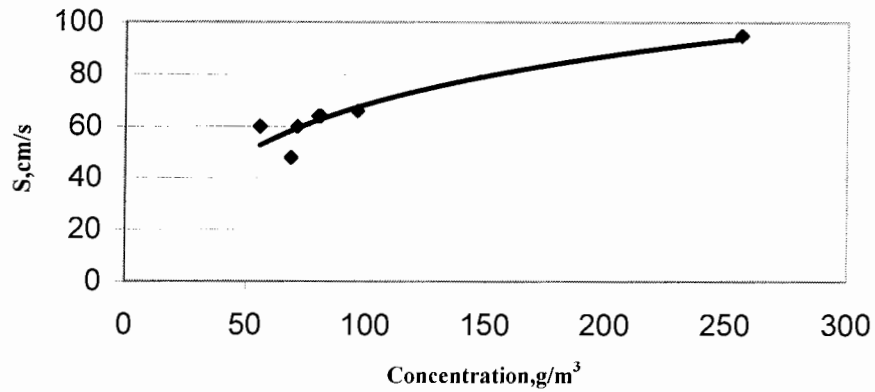
با اعمال شرایط مشابه آزمایش ذرات ۵ میکرون آزمایشات در ۱۴ مرحله انجام گرفت که

نتایج آزمایشات موفق در جدول ( الف - ۵ ) ضمیمه درج شده است.

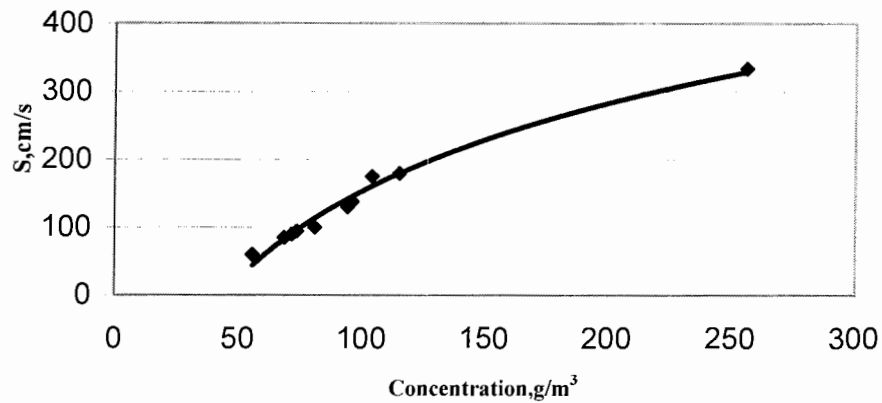
در شکل (۳-۲۱) نمودار سرعت سوزش بدست آمده از آزمایشات برحسب غلظت ذرات برای نواحی

آرام و آشفته رسم شده است.

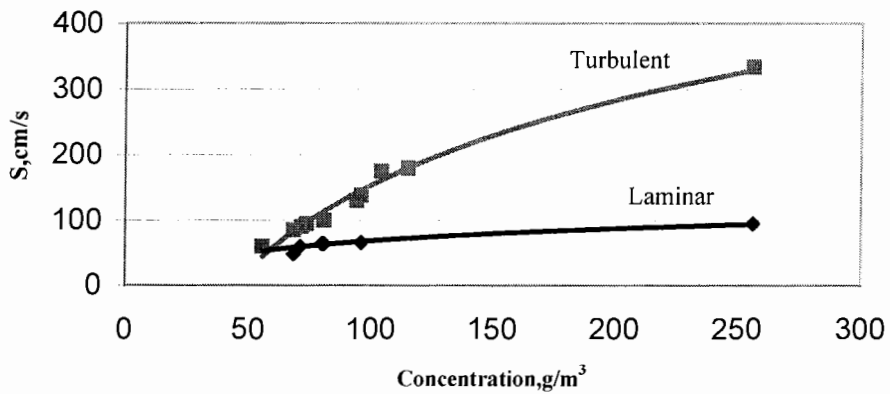




(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳-۲۱- نمودار نتایج تجربی سرعت سوختن برحسب غلظت، قطر ذرات ۲ میکرون  
 (الف) شعله آرام، (ب) شعله آشفته (ج) مقایسه سرعت سوختن شعله های آرام و آشفته

### ۳-۶- بحث و نتیجه گیری:

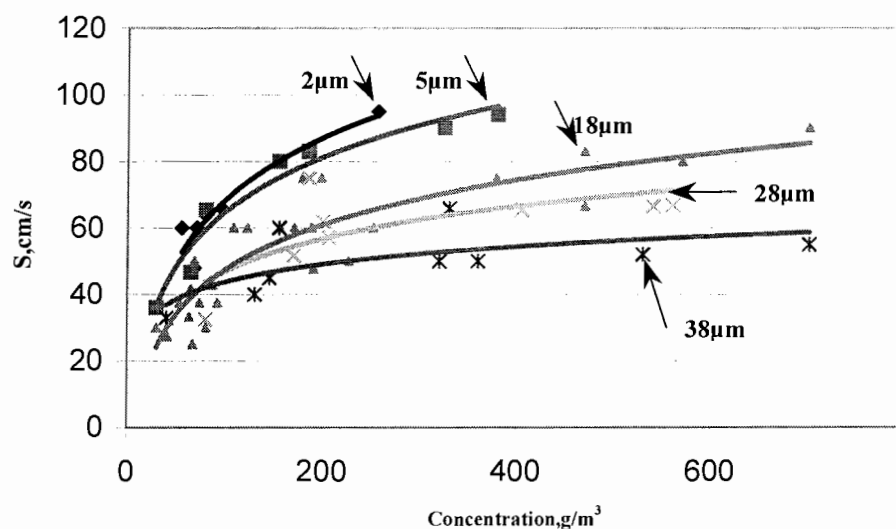
با مشاهده اشکال (۳-۱۷) تا (۳-۲۱) که هر کدام از آنها نمایانگر میزان وابستگی سرعت سوزش به غلظت ذرات در دو ناحیه آرام و آشفته و البته برای قطرهای مختلف می باشند، در می یابیم که در یک غلظت خاص، سرعت سوزش ناحیه آشفته بیشتر از ناحیه آرام است. این نکته در خصوص تمامی قطرها (به جز ذرات ۳۸ میکرون که موفق به ایجاد شعله آشفته در آن نشدیم) صادق است که البته با توجه به خصوصیات سیال آشفته و احتراق در ناحیه آشفته این نتیجه دور از انتظار نبود. در واقع افزایش عدد رینولدز و ناپایداری در انتشار شعله، منجر به تولید ادی‌هایی می‌گردد که ناحیه آشفته از آنجا آغاز می‌شود. با از بین رفتن اثر پیشانی شعله و فاصله ذرات سوخته نشده، جریان‌هایی از شعله خلاف جهت انتشار به پشت ناحیه پیشانی شعله می‌رسند. به این ترتیب نه تنها شکل پارابولیک شعله کاملاً به هم می‌خورد، بلکه شاهد چند نوع شعله در حال انتشار هستیم. به عبارت دیگر شعله آشفته به یک ناحیه واکنشی تبدیل نمی‌شود بلکه به نواحی واکنشی متعدد و متنوع تقسیم می‌گردد. مجموعه این عوامل باعث می‌شود سرعت سوزش در هنگام ورود شعله به ناحیه آشفته افزایش یابد. با پیشروی شعله در این ناحیه همزمان با پایین آمدن زمان سوزش بر شدت سرعت سوزش افزوده می‌شود.

همچنین از اشکال فوق‌الذکر پیداست که با افزایش غلظت ذرات در ناحیه رقیق، سرعت سوزش در هر دو ناحیه آرام و آشفته افزایش می‌یابد. که این مورد به علت افزایش نرخ نفوذ اکسیژن به داخل ناحیه احتراقی ذرات می‌باشد که در نتیجه آن اکسیژن کافی جهت احتراق در اختیار ذرات قرار می‌گیرد. اما با توجه به روند رو به افول افزایش سرعت در غلظتهای بالا می‌توان پیش‌بینی نمود که در مخلوطهای غنی، سرعت تقریباً ثابت خواهد بود. به عبارت دیگر در مخلوطهای غنی مقدار غلظت

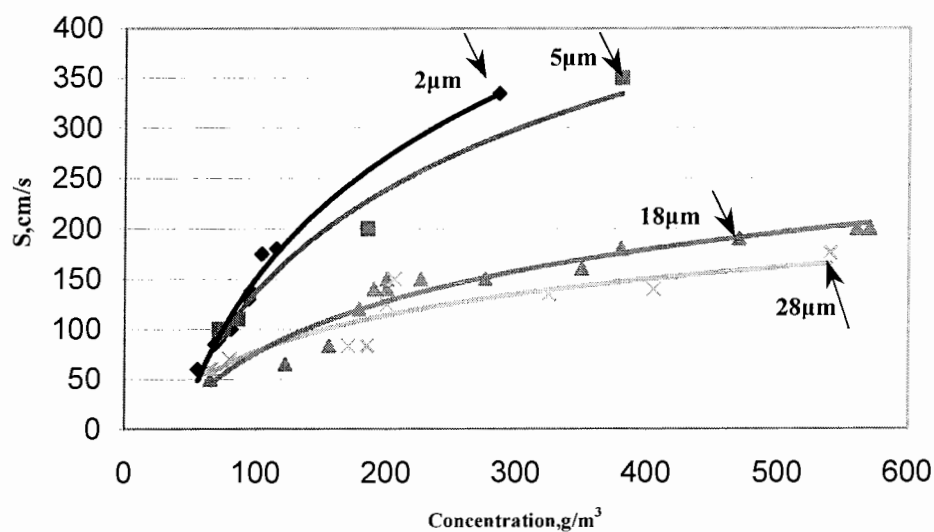
جرمی سوخت بر میزان سرعت شعله تقریباً بی تأثیر است. در واقع چون در غلظتهای بالا نسبت ذرات به اکسیدایزر به شدت افزایش می یابد لذا اکسیژن کافی در اختیار ذرات جهت احتراق کامل قرار نمی گیرد و در نتیجه با افزایش غلظت، سرعت انتشار شعله رشد قبلی را نخواهد داشت. بنابراین در مخلوطهای رقیق سرعت تابعی قوی از غلظت بوده و با افزایش غلظت سرعت سوزش نیز افزایش می یابد. نکته قابل ذکر اینکه با افزایش غلظت، اختلاف بین سرعت در نواحی آرام و آشفته افزایش می یابد.

نتایج اندازه گیریهای سرعت سوزش مربوط به ذرات با قطرهای ۲ و ۵ و ۱۸ و ۲۸ و ۳۸ میکرون به صورت تابعی از غلظت ذرات در مخلوط اکسیژن - نیتروژن در ناحیه آرام در شکل (۳-۲۲) نمایش داده شده است. همچنین نتایج اندازه گیریهای سرعت سوزش مربوط به ذرات با قطرهای ۲ و ۵ و ۱۸ و ۲۸ میکرون به صورت تابعی از غلظت ذرات در مخلوط اکسیژن - نیتروژن در ناحیه آشفته در شکل (۳-۲۳) آمده است. از شکل (۳-۲۲) پیداست که در یک غلظت معین در شعله آرام، با کاهش قطر ذره سرعت سوزش شدت بیشتری می یابد. این نکته را می توان به پراکنش یکنواخت تر ذرات ریزتر و همچنین کاهش سطح خارجی ذره نسبت دارد، به این معنی که کاهش سطح خارجی ذره باعث افزایش نرخ نفوذ اکسیدایزر به سطح ذره و در نتیجه افزایش شدت سوزش ذره می گردد. نکته فوق در شکل (۳-۲۳) نیز نمایان است. در این ناحیه با ایجاد تلاطم، زمانهای سوزش ذرات ریزتر مثل ذرات با قطر ۲ و ۵ میکرون به شدت کاهش یافته و چون اندازه این ذرات بسیار کوچک می باشد در همان ابتدای ناحیه آشفته و با قرار گرفتن در ادی های مختلف به سرعت می سوزند، حال آنکه برای ذرات بزرگتر این نسبت کوچکتر است؛ چرا که ذرات بزرگتر زمان بیشتری برای

سوزش طلب می‌کنند. از طرفی چون ما تنها مراحل ابتدائی ناحیه آشفته را می‌بینیم و به دنبال آن شعله خفه کن وجود دارد، ذرات بزرگتر، فرصت کافی جهت افزایش سرعت سوزش ندارند.



شکل ۳-۲۲- مقایسه سرعتهای سوزش شعله آرام برای ذرات با قطرهای ۲ و ۵ و ۱۸ و ۲۸ و ۳۸ میکرون



شکل ۳-۲۳- مقایسه سرعتهای سوزش شعله آشفته برای ذرات با قطرهای ۲ و ۵ و ۱۸ و ۲۸ میکرون

آنچه مسلم است رفتار شعله مخلوط‌های دو فازي گازذرات ریز جامد در مقایسه با شعله‌های گازی همگن از قبیل متان دارای پیچیدگی‌های بیشتری می‌باشد. به عنوان مثال وجود سرعت‌های یکنواخت و تقریباً ثابت در مخلوط‌های غنی شعله ذرات ریز جامد، از وجوه تمایز رفتار این گونه شعله‌ها با شعله‌های گازی همگن می‌باشد. مسئله حائز اهمیت دیگر که در آزمایش‌های ما ملاحظه گردید مشکل ایجاد مخلوط‌های دو فازي نسبتاً یکنواخت در حالت‌های خیلی غلیظ می‌باشد. به هر حال انجام آزمایشات در شرایط جاذبه نرمال باعث بروز مشکلات فراوانی در ایجاد مخلوط یکنواخت می‌گردد. این مشاهدات، دقیقاً در کارهای گرین و آدائل در شرایط جاذبه معمولی گزارش گردیده است [۱۹]. آنها بیان می‌دارند که تشکیل گرادبه‌هایی با اندازه‌های نسبتاً بزرگ در غلظت‌های بالا حتی برای ذرات بسیار ریز و در اعداد رینولدز بسیار پایین باعث عدم موفقیت در مشاهده شعله‌های آرام می‌گردد و شعله به سرعت دچار آشفستگی می‌شود. در کار ما نیز تشکیل گرادبه‌ها و تمایل حرکت آنها به سمت انتهایی محفظه احتراق مشاهده گردید که این امر شانس مشاهده شعله‌های آرام را به شدت کاهش می‌دهد. از طرفی وجود این گرادبه‌ها در احتراق باعث تمایل ذرات به رسوب و پدیده تجمع ذرات بر روی یکدیگر می‌گردد. برای غلبه بر این مشکل نیاز به انجام آزمایشات در شرایط جاذبه ناچیز می‌باشد.

فصل چهارم؛

# بررسی تجربی فاصله خاموشی شعله در ابر ذرات آلومینیوم

#### ۴-۱- مقدمه :

در این بخش در ادامه بررسی احتراق ذرات ریز جامد به بحث و بررسی در خصوص پارامتر فاصله خاموشی می‌پردازیم. برای این منظور از همان دستگاه آزمایش فصل قبل به علاوه صفحات خاموشی که در فاصله  $\frac{1}{3}$  از بالای لوله به کار گرفته شده بود استفاده نمودیم. آزمایشات این بخش با هدف بررسی تأثیر اکسیدایزر و گاز بستر بر حد رقیق غلظت و فاصله خاموشی شعله ابر ذرات آلومینیوم با قطر ۱۸ میکرون انجام شده است.

اولین بار مطالعه بر روی فاصله خاموشی بوسیله همفری دیوی<sup>۱</sup> در ۱۸۱۵ م. زمانی که وی علاقمند به ابداع راههایی برای جلوگیری از انفجار در معادن زغالسنگ شد، انجام گرفت. همچنین او موفق به طراحی چراغ ایمنی دیوی شد که براساس قوانین انفجار، اجازه عبور گاز از دستگاهها یا لوله های کوچک را نمی داد. پیمان و ویلر<sup>۲</sup> در ۱۹۲۳ م. یک سری آزمایشات را در ارتباط با انتشار شعله های هوا - ذرات زغالسنگ و هوا - متان در بین لوله هایی با قطر کوچک انجام دادند. آنها متوجه اثر سرعت شعله بر توانایی و قابلیت برای عبور از لوله ها یا سوراخهایی با قطر ریز شدند و این حقیقت را که هرچه سرعت انتشار شعله ها افزایش یابد خاموش کردن آنها مشکلتر می شود را دریافتند. در سال ۱۹۳۲ م. هلم<sup>۳</sup> با استفاده از روش برنر<sup>۴</sup> ، فاصله خاموشی را اندازه گیری نمود. اصل روش بر این بود که اگر جریان مخلوط احتراق قطع شود، آیا شعله پایدار شده پس میزند و یا اینکه خاموش میگردد.

1-Humphry Davy  
2-Payman & Wheeler  
3-Holm  
4-Burner Method

هلم که آزمایشات خود را بر روی مخلوطهای متان - هوا و هوا - زغالسنگ در غلظتهای مختلف انجام داد نتیجه گرفت که خاموشی شعله به علت اثر خنک کاری گاز نسوخته می باشد که در تماس با سطح خارجی شعله است [۲۸].

اثر پارامترهای مختلف جریان نظیر فشار ، سرعت و آشفستگی بر روی فاصله خاموشی توسط بالال و لیبور<sup>۱</sup> در میان سالهای ۱۹۷۶ تا ۱۹۷۷م. مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. آنها یکسری آزمایشات بر روی مخلوطهای قابل احتراق در حال جریان، با ترکیبات مختلفی انجام داده و گزارش دادند که فرایندهای دیفیوژن حرارتی حتی در سرعتهای زیاد جریان نیز با اهمیت بوده و نیز دریافتند که فاصله خاموشی با افزایش شدت آشفستگی افزایش و با افزایش فشار کاهش می یابد. اما آنها هیچگونه اثر قابل ملاحظه ای از مقیاس آشفستگی یا سرعت جریان بر فاصله خاموشی را پیدا نکردند. همچنین آنها اثبات نمودند که عوامل حاکم بر فاصله خاموشی شعله، انتقال حرارت هدایتی، تابشی و دیفیوژنی می باشد [۲۹]. در تمامی آثار فوق حدود یا قطر خاموشی بدین صورت تعریف می گردد؛ حداقل فاصله ای که به شعله اجازه عبور داده یا بیشترین فاصله ای که باعث خاموش شدن شعله می شود.

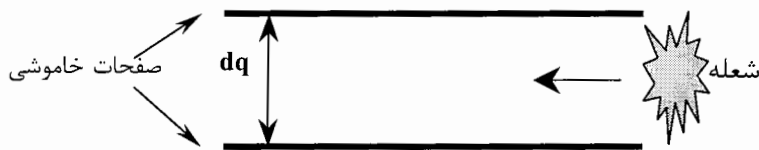
روشهای مختلفی جهت اندازه گیری فاصله خاموشی وجود دارد که عبارتند از روش برنر، روش لوله، روش انرژی جرقه، روش دیاگرام پایداری و روش صفحات خاموشی [۲۸]. روش مورد استفاده در آزمایشگاه احتراق دانشگاه علم و صنعت ایران روش صفحات خاموشی می باشد که به ذکر مختصری در خصوص این روش و نحوه عملکرد آن می پردازیم.

1-Ballal & Lefebver



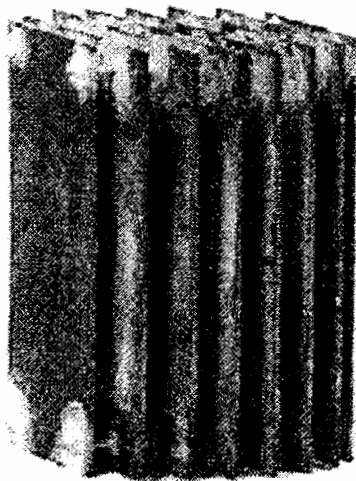
#### ۴-۱-۱- روش صفحات خاموشی :

یکی از روشهای بدست آوردن فاصله خاموشی استفاده از صفحات خاموشی می‌باشد. در این روش با قرار دادن یک سری از صفحات موازی فلزی در مسیر حرکت شعله باعث استهلاک و در نتیجه خاموش شدن شعله می‌شویم. اگر شعله در عبور از بین صفحات خاموشی، خاموش گردید، فاصله بین صفحات را فاصله خاموش نامیده و آنرا با نماد  $d_q$  نمایش می‌دهیم شکل ( ۴-۱ ).



شکل ۴-۱- طرحواره عملکرد صفحات خاموشی

شکل ( ۴-۲ ) نمونه‌ای از صفحات خاموشی مورد استفاده در آزمایشگاه احتراق را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲- صفحات خاموشی  
مورد استفاده در آزمایشگاه  
تحقیقاتی احتراق  
(دانشگاه علم و صنعت ایران)

#### ۴-۱-۲- نحوه عملکرد صفحات خاموشی:

قبل از انجام آزمایش، صفحات خاموشی در دمای محیط قرار دارند و اصطلاحاً می‌گوئیم که سرد می‌باشند. به همین خاطر شعله در هنگام عبور از بین صفحات، با آنها تبادل حرارتی انجام می‌دهد. بخش اعظم این تبادل حرارتی به شیوه انتقال حرارت هدایتی می‌باشد. اگر کل انرژی حرارتی که توسط شعله ایجاد می‌شود به صفحات انتقال یابد، شعله خاموش می‌گردد. به عبارت دیگر هنگامی شعله در بین صفحات خاموشی، خاموش می‌گردد که داشته باشیم:

نرخ حرارت تلف شده از ناحیه شعله به دیواره صفحات خاموشی = نرخ حرارت تولید شده در شعله

نکته قابل ذکر اینکه پس از خاموش شدن شعله در بین صفحات خاموشی، دمای صفحات بیش از چند درجه افزایش نمی‌یابد به گونه‌ای که می‌توان صفحات را بدست گرفت. علت این نکته جرم بسیار کم ذرات در حال احتراق می‌باشد. لذا با وجود دمای بیش از هزار درجه کلویین شعله مقدار حرارت انتقال یافته توسط شعله اندک می‌باشد. هر چه فاصله بین صفحات خاموشی کمتر شود باعث تلفات بیشتر شعله گشته تا حدی که این افزایش تلفات دیگر قابل جبران نبوده و منجر به خاموش شدن شعله می‌گردد. بنابراین اگر در آزمایش، شعله از بین صفحات خاموشی عبور کرد باید از صفحاتی با فاصله کمتر استفاده نمود تا در نهایت بتوان فاصله خاموشی شعله را بدست آورد.

#### ۴-۱-۳- دیدگاه کاربردی صفحات خاموشی:

بحثی که در این خصوص در صنایعی که با ذرات ریز جامد سروکار دارند مطرح می‌باشد بیشتر بحث ایمنی است. اینکه آیا منافذ و سوراخهایی که در مجموعه و سیستم‌های درگیر با ذرات ریز جامد وجود دارند دارای حداقل ابعاد می‌باشند یا نه بحثی است که از این طریق قابل پیگیری می‌باشد. بدیهی است که منافذ موجود باید از حداقل فاصله خاموشی یعنی  $d_{qmin}$  کوچکتر باشد. چرا که اگر انفجار و یا احتراقی بوجود آید ابتدا از شیارها شروع به نفوذ می‌کند. اگر فاصله شیارها کمتر از حداقل فاصله خاموشی نباشد جت گرم گاز به ناحیه بعدی تزریق می‌شود. در صورتیکه در ناحیه بعدی مواد قابل اشتعال و یا قابل احتراق موجود باشند امکان وقوع انفجار افزایش می‌یابد و بنابراین شیارها باید طوری طراحی شده باشند که جت گرم نیز نتواند رسوخ کند. به این فاصله، حداکثر فاصله تجربی ایمنی می‌گویند.

#### ۴-۲- روش انجام آزمایش:

روش انجام آزمایش دقیقاً همانند آزمایشات فصل پیش می‌باشد.

#### ۴-۳- نتایج آزمایش:

در این قسمت ابتدا به ذکر مختصری در مورد رفتار شعله آرام در صفحات خاموشی و سپس به بحث در خصوص آزمایشات انجام شده و نمودارهای بدست آمده می‌پردازیم.

### ۴-۳-۱- رفتار شعله آرام در صفحات خاموشی

در تمامی آزمایشات مشاهده شد که شکل پیشانی شعله آرام در هنگام برخورد با صفحات خاموشی به صورت یک خط تخت در می آید. به شکل (۴-۳) دقت کنید.

در خصوص انتشار شعله در داخل صفحات خاموشی باید گفت در صورتیکه غلظت ذرات به قدری باشد که از حد خاموشی دور باشد نفوذ شعله در داخل همه کانالهای صفحات خاموشی صورت می پذیرد. چگونگی انتشار شعله در بین صفحات خاموشی در شکل (۴-۴) نشان داده شده است.



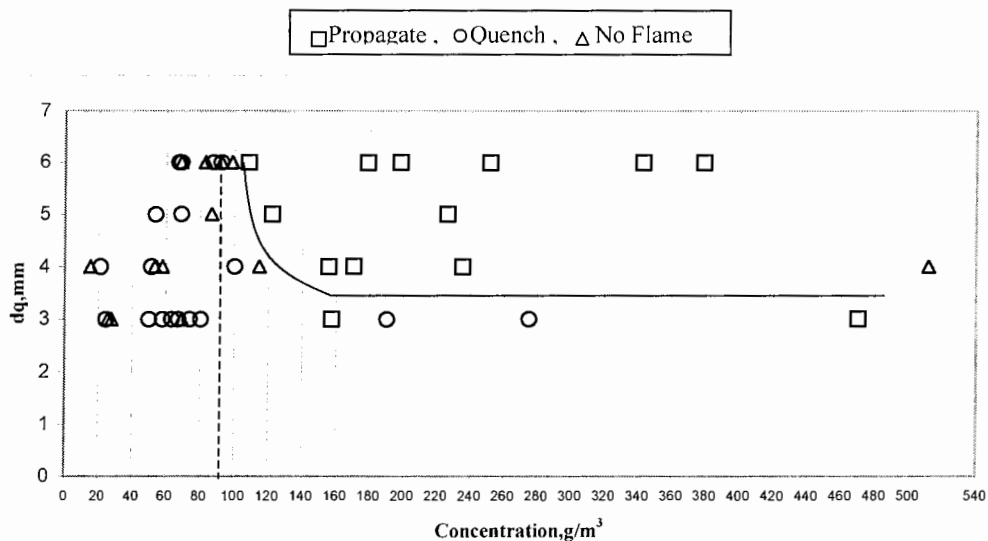
شکل ۴-۳- تصویر شعله در هنگام برخورد با صفحات خاموشی



شکل ۴-۴- رفتار شعله در صفحات خاموشی

#### ۴-۳-۲- آزمایش فاصله خاموشی ذرات آلومینیوم با قطر ۱۸ میکرون:

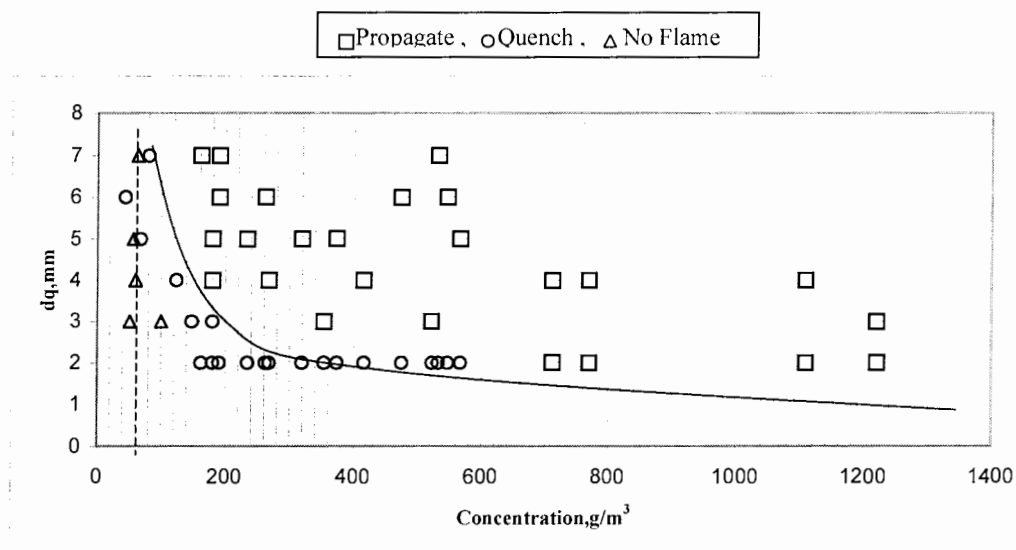
قبل از انجام آزمایش، ذرات ۱۸ میکرون را به مدت ۴۸ ساعت در کوره خشک کن قرار می‌دهیم تا کاملاً خشک شوند. سپس این ذرات را در داخل سیلندر مربوطه می‌ریزیم. صفحات خاموشی را تمیز نموده و به ترتیب از فواصل کوچک به بزرگ مرتب می‌کنیم. ابتدا از صفحات ۳ میلی‌متر شروع می‌نمائیم. صفحات ۳ میلی‌متر را در فاصله  $\frac{1}{3}$  از انتهای باز لوله به طور عمودی در داخل لوله نصب می‌کنیم. آنگاه به ترتیبی که در قسمت قبل اشاره شد، ذرات را به داخل لوله آزمایش تزریق می‌کنیم و پس از ایجاد جریان یکنواخت ذرات در بالای لوله، ذرات را توسط سیم تنگستنی ملتهب مشتعل می‌کنیم و آنگاه سیستم تزریق را قطع نموده و اجازه می‌دهیم تا شعله در امتداد لوله به سمت پایین منتشر شود. آزمایشات نشان می‌دهند که شعله انتشار یافته به سمت پایین در شرایط مختلف می‌تواند از صفحات خاموشی عبور کند و در پشت صفحات همچنان به حرکت خود ادامه دهد و یا اینکه در گذر از صفحات، حرارت خود را از دست داده و خاموش شود. جزئیات احتراق ابر ذرات آلومینیوم به قطر ۱۸ میکرون در مخلوطی از ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن در جدول (الف-۶) ضمیمه آمده است. نتایج تغییرات فاصله خاموشی برحسب غلظت به صورت انتشار و خاموشی و عدم تشکیل شعله در شکل (۴-۵) آمده است. آنگاه با استفاده از یک خط، منحنی نقاط انتشار و خاموشی شعله را از یکدیگر جدا می‌کنیم. همانطور که ملاحظه می‌شود حد اشتعال در غلظتهای پایین‌تر از  $(95 \text{ g/m}^3)$  می‌باشد و حداقل فاصله خاموشی برابر ۳ میلی‌متر است.



شکل ۴-۵- فاصله خاموشی بر حسب تغییرات غلظت برای ذرات با قطر ۱۸ میکرون در مخلوط گازی ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن

دومین سری از آزمایشات با ذرات آلومینیوم به قطر ۱۸ میکرون در مخلوطی از ۳۰٪ اکسیژن و ۷۰٪ نیتروژن انجام شد. جزئیات این آزمایشات در جدول (الف-۷) ضمیمه آمده است. نتایج آزمایشات به صورت انتشار و خاموشی و عدم تشکیل شعله در شکل (۴-۶) ترسیم شده است. همانطور که دیده می‌شود در غلظتهای پایین‌تر از ۸۵ گرم بر متر مکعب، شعله در همه صفحات خاموش می‌شود؛ بنابراین حد اشتعال پذیری در این غلظت می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در غلظتهای مختلف، شعله در فاصله خاموشی بین ۱ تا ۲ میلی‌متر خاموش می‌شود و به عبارت دیگر پیش‌بینی می‌کنیم که حداقل

فاصله خاموشی برای ذرات آلومینیوم ۱۸ میکرون در مخلوطی از ۳۰٪ اکسیژن و ۷۰٪ نیتروژن، ۱ میلیمتر می‌باشد.

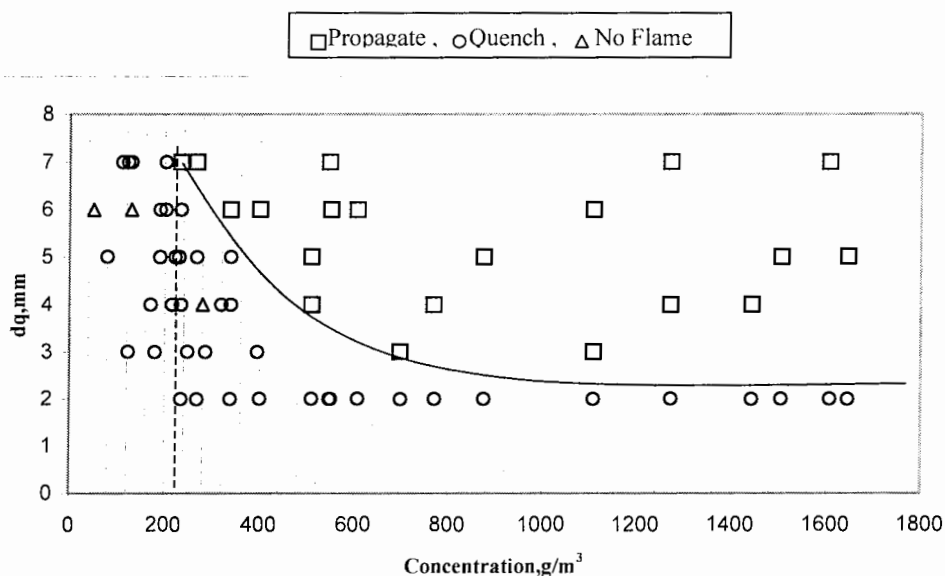


شکل ۴-۶- فاصله خاموشی بر حسب تغییرات غلظت برای ذرات با قطر ۱۸ میکرون در مخلوط گازی ۳۰٪ اکسیژن و ۷۰٪ نیتروژن

سری سوم آزمایشات با تغییر گاز بستر انجام شد. به این معنی که در این سری از آزمایشات گاز آرگون را جایگزین گاز نیتروژن که در آزمایشات قبلی از آن به عنوان گاز بستر استفاده می‌شد نمودیم. ترکیب گاز استفاده شده به صورت ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ آرگون می‌باشد. آزمایشات فاصله خاموشی با مخلوط گازی فوق نیز به همان ترتیب آزمایشات قبلی دنبال شد. جزئیات این آزمایشات در جدول (الف - ۸) بخش ضمیمه آمده است.



نتایج این آزمایشات به لحاظ تغییرات فاصله خاموشی در شکل (۷-۴) آمده است. همانطور که ملاحظه می‌شود حد اشتعال برای گاز ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ آرگون، در حدود ۲۰۵ گرم برمتر مکعب و حداقل فاصله خاموشی ۲ میلی‌متر است.



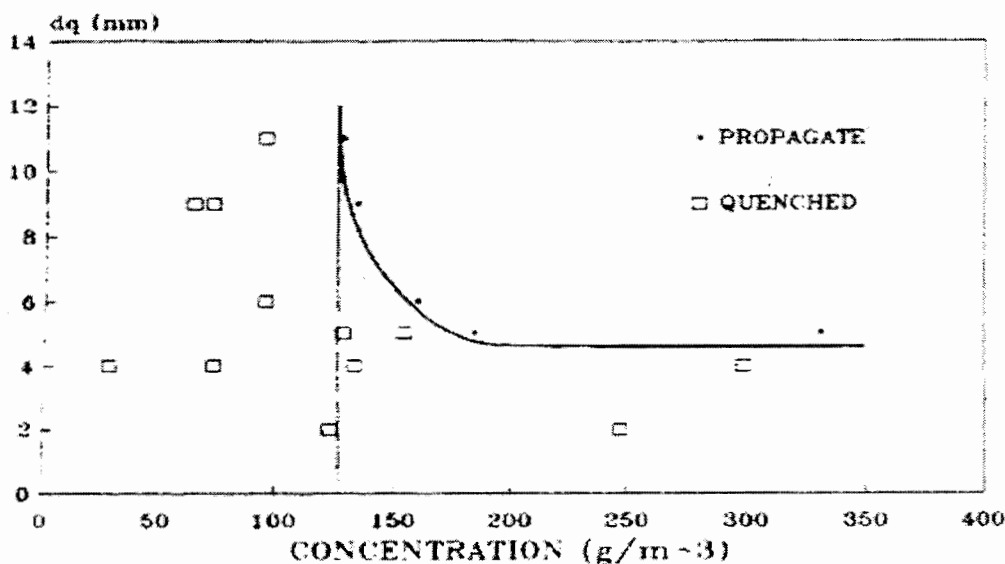
شکل ۷-۴- فاصله خاموشی بر حسب تغییرات غلظت برای ذرات با قطر ۱۸ میکرون در مخلوط گازی ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ آرگون

نکته حائز اهمیتی که در مبحث فاصله خاموشی مطرح می‌باشد، این است که ما در نمودار تغییرات فاصله خاموشی بر حسب تغییر غلظت یک مرز نداریم که به صورت یک خط دو ناحیه خاموشی شعله و انتشار آن را جدا کند، بلکه یک باند داریم که این دو ناحیه را از هم جدا می‌نماید.

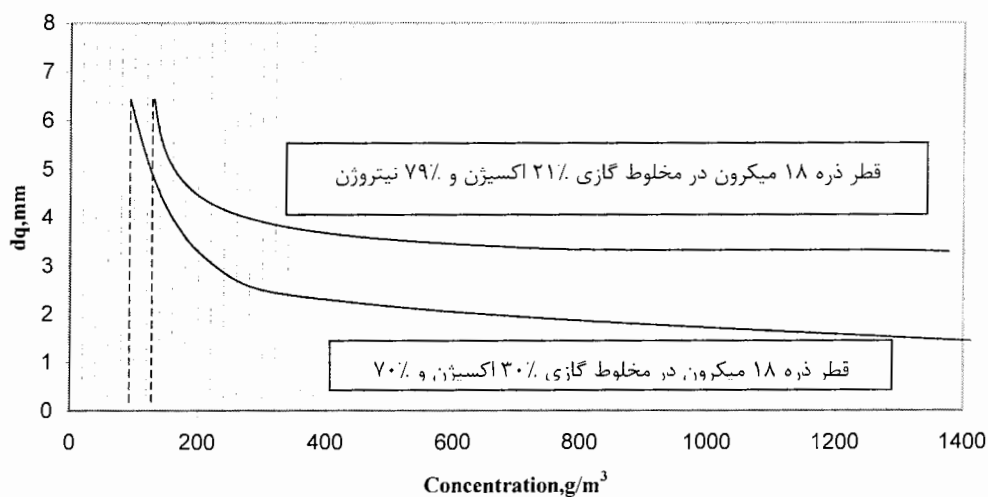
#### ۴-۴- بحث و مقایسه در نتایج:

همانگونه که ملاحظه گردید حد رقیق غلظت جهت انتشار شعله ذرات آلومینیوم با قطر ۱۸ میکرون برای مخلوطهای گازی (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن)، (۳۰٪ اکسیژن و ۷۰٪ نیتروژن) و (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ آرگون) به ترتیب ۹۵، ۸۵ و ۲۰۵ گرم بر مترمکعب و حداقل فاصله خاموشی به ترتیب ۳، ۲ و  $1 \leq d_q < 2$  میلیمتر بدست آمد.

در آزمایشات آقای صدیقی [۳۰] برای ذرات ۱۸ میکرون و مخلوط گازی (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) حد اشتغال ۱۳۰ گرم به مترمکعب و حداقل فاصله خاموشی ۴ میلیمتر بدست آمده بود (شکل ۴-۸).



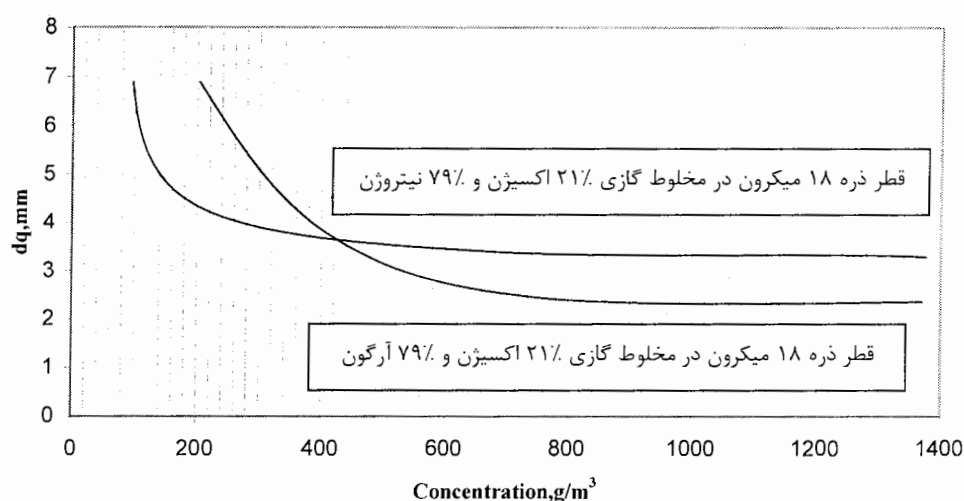
شکل ۴-۸- نتایج تجربی فاصله خاموشی بر حسب غلظت ذرات آلومینیوم با قطر ۱۸ میکرون در مخلوط گازی ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن (بر اساس نتایج صدیقی [۳۰])



شکل ۴-۹- مقایسه نتایج تجربی فاصله خاموشی ذرات ۱۸ میکرون در مخلوطهای گازی (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) و (۳۰٪ اکسیژن و ۷۰٪ نیتروژن)

نتایج حاصل از آزمایشات مربوط به مخلوطهای گازی (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) و (۳۰٪ اکسیژن و ۷۰٪ نیتروژن) در شکل (۴-۹) آمده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش غلظت اکسیژن، حد رقیق غلظت جهت انتشار شعله از ۹۵ به ۸۵ گرم بر مترمکعب و حداقل فاصله خاموشی از ۳ به  $2 < d_q \leq 1$  میلیمتر کاهش می‌یابد. که این امر نشان دهنده میزان تأثیر اکسیدایزر بر روند احتراق ذرات می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش میزان اکسیژن در مخلوط گازی و در نتیجه افزایش نفوذ اکسیژن به داخل توده ذرات، ذرات در غلظت پایین‌تر محترق می‌گردند. همچنین از آنجا که حداقل فاصله خاموشی کاهش می‌یابد می‌توان نتیجه گرفت که بر شدت واکنش نیز افزوده می‌گردد.

نتایج حاصل از آزمایشات ( ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن ) و ( ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ آرگون ) در شکل (۱۰-۴) آمده است. این شکل نشان می‌دهد که با جایگزینی آرگون به جای نیتروژن در مخلوط گازی، حد رقیق غلظت برای انتشار شعله از ۹۵ تا حدود ۲۰۵ گرم مترمکعب افزایش می‌یابد. علت این موضوع به میزان تشکیل مولکول اکسید توسط گاز بستر بر می‌گردد. در واقع اگر مخلوط گازی بتواند مولکول اکسید تشکیل دهد ( مثل  $NO_x$  ) این اجزا به انتقال اکسیژن به سطح ذره در نتیجه احتراق آن کمک خواهد کرد [۶]. در میان مخلوطهای گازی استفاده شده در این تحقیق تنها نیتروژن است که می‌تواند اکسیدهایی تشکیل دهد که به همراه اکسیدهای آلومینیوم به انتقال اکسیژن به سطح ذره کمک کند. به عبارت ساده‌تر نرخ پخش  $N_2$  بیشتر از Ar است. همچنین شکل ( ۱۰-۴ ) نشان می‌دهد که تغییر فاصله خاموشی در حدود ۱ میلی‌متر است.



شکل ۱۰-۴- مقایسه نتایج تجربی فاصله خاموشی ذرات ۱۸ میکرون در مخلوطهای گازی (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) و (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ آرگون)

#### ۴-۵- نتیجه گیری:

وجه تمایز احتراق سوخته‌های گازی همگن با شعله مخلوط ذرات غیر همگن آن است که در مورد شعله‌های همگن در غلظت‌های پایین یک حد رقیق اشتعال داریم و به عبارتی در غلظت‌های پایین‌تر از حد رقیق اشتعال نداریم. همچنین در غلظت‌های بالا نیز یک حد غنی اشتعال داریم که برای غلظت‌های بالاتر از حد غنی، شعله وجود ندارد. اما در خصوص سوخته‌های غیرهمگن (مخلوط ذرات)، حد غنی اشتعال وجود ندارد. احتراق این گونه سوخته‌ها در غلظت‌های بالاتر به لحاظ نکات ایمنی (خطر انفجار) و همچنین به علت ته‌نشینی ذرات تحت جاذبه زمین و در نتیجه برهم خوردن طیف یکنواخت آنها، عملاً در آزمایش‌های روی زمین امکان پذیر نمی‌باشد. لذا در آزمایشات ما با توجه به موارد فوق، حد غنی اشتعال در غلظت‌های بالا مشاهده نشد. البته در مجموعه آزمایشاتی که اشخاص مختلف در سایر کشورها انجام داده‌اند به جز کلور [۳۱] که به مقدار ناچیزی حد غنی اشتعال را مشاهده نموده است، در سایر موارد مشاهده حد غنی اشتعال گزارش نشده است. بنابراین در این مورد میان نتایج آزمایشات ما و سایر محققین، اتفاق نظر نسبتاً زیادی وجود دارد اما در خصوص نتایج حد رقیق اشتعال تا حدودی اختلاف وجود دارد که به نظر نگارنده، این اشکال به میزان قابل توجهی به خطاهای تجربی در خصوص تولید سوسپانسیون یکنواخت و آرام ذرات، قابلیت مناسب کنترل غلظت، داده برداری غلظتها توسط لیزر و حساسیت بالای لیزر به نور محیط مرتبط می‌باشد.

ضمیمہ

جدول الف-۱- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۱۸ میکرون جهت اندازه گیری سرعت سوزش

شماره آزمایش	$I_0$	I	$\ln(I_0/I)$	$C(\text{gr/m}^3)$	$dq(\text{mm})$	قطر ذره (میکرون)	نتیجه آزمایش
1	0.211	0.178	0.17	190	--	18	P
2	0.217	0.205	0.057	65	--	18	P
3	0.229	0.15	0.423	470	--	18	P
4	0.22	0.131	0.513	570	--	18	P
5	0.221	0.198	0.11	122.1	--	18	P
6	0.225	0.219	0.027	30	--	18	Q
7	0.212	0.202	0.048	53.67	--	18	Q
8	0.239	0.195	0.204	226.1	--	18	P
9	0.222	0.193	0.14	155.6	--	18	P
10	0.225	0.193	0.153	170.4	--	18	Q
11	0.225	0.16	0.341	378.8	--	18	P
12	0.0.232	0.185	0.226	251.6	--	18	Q
13	0.239	0.225	0.06	67.11	--	18	Q
14	0.239	0.22	0.083	92	--	18	Q
15	0.239	0.2	0.178	197.9	--	18	Q
16	0.229	0.195	0.161	178.6	--	18	P
17	0.234	0.22	0.062	68.56	--	18	Q
18	0.237	0.215	0.097	108.2	--	18	Q
19	0.238	0.22	0.079	87.33	--	18	Q
20	0.239	0.225	0.06	67.11	--	18	Q
21	0.22	0.212	0.037	41.11	--	18	Q
22	0.215	0.203	0.057	63.22	--	18	Q
23	0.215	0.2	0.072	80.33	--	18	Q
24	0.225	0.19	0.169	187.9	--	18	P
25	0.232	0.181	0.248	275.8	--	18	P
26	0.213	0.178	0.176	200	--	18	P
27	0.22	0.16	0.318	350	--	18	P
28	0.19	0.1	0.641	700	--	18	Q

جدول الف-۲- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۲۸ میکرون جهت اندازه گیری سرعت سوزش

شماره آزمایش	$I_0$	I	$\ln(I_0/I)$	$C(\text{gr/m}^3)$	$dq(\text{mm})$	قطر ذره (میکرون)	نتیجه آزمایش
1	0.225	0.214	0.05	170	--	28	P
2	0.22	0.207	0.058	185	--	28	P
3	0.219	0.195	0.116	405	--	28	P
4	0.21	0.205	0.02	80	--	28	P
5	0.227	0.213	0.06	206	--	28	P
6	0.231	0.228	0.01	65	--	28	P
7	0.217	0.198	0.09	325	--	28	P
8	0.231	0.228	0.01	63	--	28	Q
9	0.21	0.178	0.16	540	--	28	P
10	0.218	0.185	0.162	560	--	28	P
11	0.234	0.22	0.006	200	--	28	P
12	0.21	0.205	0.02	80	--	28	Q



جدول الف-۳- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۳۸ میکرون جهت اندازه گیری سرعت سوزش

شماره آزمایش	$I_0$	$I$	$\ln(I_0/I)$	$C(\text{gr}/\text{m}^3)$	$dq(\text{mm})$	قطر ذره (میکرون)	نتیجه آزمایش
1	0.242	0.239	0.01	40	--	38	Q
2	0.237	0.21	0.12	530	--	38	P
3	0.22	0.201	0.09	360	--	38	P
4	0.227	0.209	0.08	320	--	38	P
5	0.218	0.201	0.085	330	--	38	P
6	0.212	0.205	0.03	155	--	38	Q
7	0.222	0.215	0.028	130	--	38	P
8	0.234	0.227	0.029	145	--	38	Q
9	0.215	0.179	0.18	700	--	38	P

جدول الف-۴- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۵ میکرون جهت اندازه گیری سرعت سوزش

شماره آزمایش	$I_0$	I	$\ln(I_0/I)$	$C(\text{gr/m}^3)$	$dq(\text{mm})$	قطر ذره (میکرون)	نتیجه آزمایش
1	0.23	0.139	0.5	30	--	5	Q
2	0.22	0.029	2	185	--	5	P
3	0.232	0.007	3.5	325	--	5	P
4	0.222	0.05	1.5	155	--	5	Q
5	0.231	0.004	4	380	--	5	P
6	0.217	0.113	0.65	65	--	5	Q
7	0.21	0.077	1	80	--	5	Q
8	0.215	0.096	0.8	72	--	5	P
9	0.225	0.075	1.1	86	--	5	P

جدول الف-۵- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۲ میکرون جهت اندازه گیری سرعت سوزش

شماره آزمایش	$I_0$	I	$\ln(I_0/I)$	$C(\text{gr/m}^3)$	$dq(\text{mm})$	قطر ذره (میکرون)	نتیجه آزمایش
1	0.242	0.085	1.046	95.94	--	2	P
2	0.228	0.014	2.79	255.9	--	2	P
3	0.215	0.102	0.746	68.36	--	2	P
4	0.229	0.095	0.88	80.66	--	2	P
5	0.229	0.125	0.605	55.49	--	2	P
6	0.229	0.16	0.359	32.83	--	2	Q
7	0.232	0.106	0.783	71.81	--	2	P
8	0.228	0.135	0.524	48.03	--	2	Q
9	0.234	0.105	0.801	73.47	--	2	P
10	0.227	0.073	1.135	104	--	2	P
11	0.227	0.065	1.251	114.7	--	2	P

جدول الف-۶- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۱۸ میکرون در مخلوط گازی (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن)  
جهت بررسی فاصله خاموشی

شماره آزمایش	$I_0$	I	$\ln(I_0/I)$	$C(\text{gr/m}^3)$	$dq(\text{mm})$	قطر ذره (میکرون)	نتیجه آزمایش
1	0.225	0.16	0.341	378.8	6	18	P
2	0.245	0.18	0.308	342.6	6	18	P
3	0.232	0.185	0.226	251.6	6	18	P
4	0.234	0.22	0.062	68.56	6	18	عدم تشکیل شعله
5	0.239	0.22	0.083	92	6	18	عدم تشکیل شعله
6	0.237	0.22	0.074	82.67	6	18	عدم تشکیل شعله
7	0.239	0.22	0.083	92	6	18	عدم تشکیل شعله
8	0.239	0.225	0.06	67.11	6	18	Q
9	0.239	0.22	0.083	92	6	18	Q
10	0.239	0.2	0.178	197.9	6	18	P
11	0.224	0.205	0.089	98.44	6	18	عدم تشکیل شعله
12	0.229	0.195	0.161	178.6	6	18	P
13	0.234	0.22	0.062	68.56	6	18	Q
14	0.237	0.215	0.097	108.2	6	18	P
15	0.238	0.22	0.079	87.33	6	18	Q
16	0.227	0.21	0.078	86.44	5	18	عدم تشکیل شعله
17	0.234	0.22	0.062	68.56	5	18	P
18	0.221	0.198	0.11	122.1	5	18	P
19	0.225	0.219	0.027	30	5	18	Q
20	0.212	0.202	0.048	53.67	5	18	Q
21	0.239	0.195	0.204	226.1	5	18	P
22	0.237	0.225	0.052	57.78	5	18	P
23	0.235	0.224	0.048	53.22	4	18	عدم تشکیل شعله
24	0.212	0.208	0.019	21.11	4	18	Q
25	0.222	0.212	0.046	51.22	4	18	Q
26	0.237	0.225	0.052	57.78	4	18	عدم تشکیل شعله
27	0.222	0.193	0.14	155.6	4	18	P
28	0.22	0.178	0.212	235.3	4	18	P

ادامه جدول الف-۶

شماره آزمایش	$I_0$	I	$\ln(I_0/I)$	$C(\text{gr/m}^3)$	$dq(\text{mm})$	قطر ذره (میکرون)	نتیجه آزمایش
29	0.22	0.217	0.014	15.22	4	18	عدم تشکیل شعله
30	0.225	0.142	0.46	511.44	4	18	عدم تشکیل شعله
31	0.225	0.203	0.103	114.3	4	18	عدم تشکیل شعله
32	0.22	0.201	0.09	100.3	4	18	Q
33	0.225	0.193	0.153	170.4	4	18	P
34	0.222	0.217	0.023	25.33	3	18	عدم تشکیل شعله
35	0.237	0.225	0.052	57.78	3	18	Q
36	0.239	0.225	0.06	67.11	3	18	Q
37	0.232	0.181	0.248	275.8	3	18	P
38	0.23	0.225	0.022	24.44	3	18	Q
39	0.22	0.212	0.037	41.11	3	18	Q
40	0.217	0.205	0.057	63.22	3	18	Q
41	0.227	0.173	0.272	301.9	3	18	عدم تشکیل شعله
42	0.23	0.193	0.175	194.9	3	18	عدم تشکیل شعله
43	0.216	0.203	0.062	69	3	18	عدم تشکیل شعله
44	0.203	0.198	0.025	27.67	3	18	عدم تشکیل شعله
45	0.218	0.204	0.066	73.78	3	18	Q
46	0.215	0.2	0.072	80.33	3	18	Q
47	0.225	0.19	0.169	187.9	3	18	P
48	0.228	0.218	0.045	49.89	3	18	Q
49	0.229	0.15	0.423	470.1	3	18	P
50	0.227	0.197	0.142	157.4	3	18	Q
51	0.212	0.178	0.175	194.2	3	18	P

جدول الف-۷- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۱۸ میکرون در مخلوط گازی (۳۰٪ اکسیژن و ۷۰٪ نیتروژن)  
جهت بررسی فاصله خاموشی

شماره آزمایش	$I_0$	I	$\ln(I_0/I)$	$C(\text{gr/m}^3)$	$dq(\text{mm})$	قطر ذره (میکرون)	نتیجه آزمایش
1	0.21	0.13	0.479	532.22	7	18	P
2	0.18	0.17	0.057	63.33	7	18	عدم تشکیل شعله
3	0.22	0.19	0.146	162.22	7	18	P
4	0.19	0.16	0.171	190	7	18	P
5	0.2	0.19	0.051	56.66	7	18	عدم تشکیل شعله
6	0.18	0.16	0.072	80	7	18	Q
7	0.18	0.11	0.492	546.66	6	18	P
8	0.234	0.225	0.039	43.33	6	18	Q
9	0.19	0.15	0.236	262.22	6	18	P
10	0.23	0.15	0.427	474.44	6	18	P
11	0.19	0.16	0.171	190	6	18	P
12	0.21	0.17	0.211	234.44	5	18	P
13	0.14	0.1	0.336	373.33	5	18	P
14	0.117	0.11	0.061	67.77	5	18	Q
15	0.2	0.15	0.287	318.88	5	18	P
16	0.15	0.09	0.51	566.66	5	18	P
17	0.2	0.19	0.051	56.66	5	18	عدم تشکیل شعله
18	0.2	0.17	0.162	180	5	18	P
19	0.19	0.17	0.111	123.33	4	18	Q
20	0.2	0.17	0.162	180	4	18	P
21	0.19	0.18	0.054	60	4	18	عدم تشکیل شعله
22	0.2	0.1	0.693	770	4	18	P
23	0.19	0.07	0.998	1108.88	4	18	P
24	0.21	0.165	0.241	267.77	4	18	P
25	0.16	0.11	0.374	415.55	4	18	P
26	0.19	0.1	0.641	712.22	4	18	P
27	0.22	0.16	0.318	353.33	3	18	P
28	0.2	0.17	0.162	180	3	18	Q

ادامه جدول الف-۷

شماره آزمایش	$I_0$	I	$\ln(I_0/I)$	$C(\text{gr/m}^3)$	$dq(\text{mm})$	قطر ذره (میکرون)	نتیجه آزمایش
29	0.22	0.21	0.046	51.11	3	18	عدم تشکیل شعله
30	0.23	0.21	0.09	100	3	18	عدم تشکیل شعله
31	0.16	0.14	0.133	147.77	3	18	Q
32	0.24	0.08	1.098	1220	2	18	P
33	0.08	0.05	0.47	522.22	2	18	P
34	0.19	0.07	0.998	1108.88	2	18	P
35	0.19	0.1	0.641	712.22	2	18	P
36	0.24	0.08	1.098	1220	2	18	P
37	0.2	0.1	0.693	770	2	18	P
38	0.21	0.13	0.479	532.22	2	18	Q
39	0.22	0.19	0.146	162.22	2	18	Q
40	0.19	0.16	0.171	190	2	18	Q
41	0.18	0.11	0.492	546.66	2	18	Q
42	0.19	0.15	0.236	262.22	2	18	Q
43	0.23	0.15	0.427	474.44	2	18	Q
44	0.19	0.16	0.171	190	2	18	Q
45	0.21	0.17	0.211	234.44	2	18	Q
46	0.14	0.1	0.336	373.33	2	18	Q
47	0.08	0.05	0.47	522.22	2	18	Q
48	0.15	0.09	0.51	566.66	2	18	Q
49	0.2	0.17	0.162	180	2	18	Q
50	0.21	0.165	0.241	267.77	2	18	Q
51	0.16	0.11	0.374	415.55	2	18	Q
52	0.22	0.16	0.318	353.33	2	18	Q
53	0.2	0.17	0.162	180	2	18	Q
54	0.2	0.15	0.287	318.88	2	18	Q

جدول الف-۸- نتایج احتراق ابر ذرات آلومینیوم ۱۸ میکرون در مخلوط گازی (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ آرگون)  
جهت بررسی فاصله خاموشی

شماره آزمایش	$I_0$	$I$	$\ln(I_0/I)$	$C(\text{gr/m}^3)$	$dq(\text{mm})$	قطر ذره (میکرون)	نتیجه آزمایش
1	0.14	0.11	0.241	267.77	7	18	P
2	0.18	0.15	0.182	202.22	7	18	Q
3	0.21	0.17	0.211	234.44	7	18	P
4	0.22	0.07	1.145	1272.22	7	18	P
5	0.17	0.04	1.446	1606.66	7	18	P
6	0.19	0.17	0.111	123.33	7	18	Q
7	0.18	0.16	0.117	130	7	18	Q
8	0.18	0.11	0.492	546.66	7	18	P
9	0.18	0.15	0.182	202.22	7	18	Q
10	0.18	0.16	0.117	130	7	18	Q
11	0.21	0.19	0.1	111.111	7	18	Q
12	0.19	0.14	0.305	338.88	6	18	P
13	0.19	0.07	0.998	1108.88	6	18	P
14	0.19	0.11	0.546	606.66	6	18	P
15	0.19	0.16	0.171	190	6	18	Q
16	0.18	0.16	0.117	130	6	18	عدم تشکیل شعله
17	0.22	0.21	0.046	51.11	6	18	عدم تشکیل شعله
18	0.18	0.15	0.182	202.22	6	18	Q
19	0.18	0.16	0.117	130	6	18	عدم تشکیل شعله
20	0.21	0.17	0.211	234.44	6	18	Q
21	0.21	0.146	0.36	400	6	18	P
22	0.22	0.134	0.495	550	6	18	P
23	0.115	0.107	0.072	80	5	18	Q
24	0.19	0.14	0.305	338.88	5	18	Q
25	0.22	0.05	1.481	1645.55	5	18	P
26	0.28	0.22	0.241	267.77	5	18	Q
27	0.11	0.09	0.2	222.222	5	18	Q
28	0.16	0.13	0.207	230	5	18	Q



ادامه جدول الف- ۸

شماره آزمایش	$I_0$	$I$	$\ln(I_0/I)$	$C(\text{gr}/\text{m}^3)$	$dq(\text{mm})$	قطر ذره (میکرون)	نتیجه آزمایش
29	0.22	0.1	0.788	875.55	5	18	P
30	0.19	0.14	0.305	338.88	5	18	Q
31	0.19	0.16	0.171	190	5	18	Q
32	0.19	0.12	0.459	510	5	18	P
33	0.19	0.05	1.355	1505.55	5	18	P
34	0.17	0.14	0.194	215.55	4	18	Q
35	0.18	0.14	0.251	278.88	4	18	عدم تشکیل شعله
36	0.19	0.12	0.459	510	4	18	P
37	0.19	0.14	0.305	338.88	4	18	Q
38	0.165	0.045	1.299	1443.44	4	18	P
39	0.21	0.18	0.154	171.11	4	18	Q
40	0.2	0.15	0.287	318.88	4	18	Q
41	0.2	0.1	0.693	770	4	18	P
42	0.21	0.17	0.211	234.44	4	18	Q
43	0.22	0.07	1.145	1272.22	4	18	P
44	0.22	0.06	1.299	1443.33	4	18	P
45	0.2	0.16	0.223	247.77	3	18	Q
46	0.19	0.07	0.998	1108.88	3	18	P
47	0.19	0.17	0.111	123.33	3	18	Q
48	0.2	0.14	0.356	395.55	3	18	Q
49	0.15	0.08	0.628	697.77	3	18	P
50	0.22	0.17	0.257	285.55	3	18	Q
51	0.2	0.17	0.162	180	3	18	Q
52	0.19	0.17	0.111	123.33	3	18	Q
53	0.14	0.11	0.241	267.77	2	18	Q
54	0.21	0.17	0.211	234.44	2	18	Q
55	0.22	0.07	1.145	1272.22	2	18	Q
56	0.17	0.04	1.446	1606.66	2	18	Q

ادامه جدول الف- ۸

شماره آزمایش	$I_0$	I	$\ln(I_0/I)$	$C(\text{gr}/\text{m}^3)$	$dq(\text{mm})$	قطر ذره (میکرون)	نتیجه آزمایش
57	0.18	0.11	0.492	546.66	2	18	Q
58	0.19	0.14	0.305	338.88	2	18	Q
59	0.19	0.07	0.998	1108.88	2	18	Q
60	0.19	0.11	0.546	606.66	2	18	Q
61	0.21	0.146	0.36	400	2	18	Q
62	0.22	0.134	0.495	550	2	18	Q
63	0.22	0.05	1.481	1645.55	2	18	Q
64	0.22	0.1	0.788	875.55	2	18	Q
65	0.19	0.12	0.459	510	2	18	Q
66	0.19	0.05	1.355	1505.55	2	18	Q
67	0.19	0.12	0.459	510	2	18	Q
68	0.165	0.045	1.299	1443.44	2	18	Q
69	0.2	0.1	0.693	770	2	18	Q
70	0.22	0.07	1.145	1272.22	2	18	Q
71	0.22	0.06	1.299	1443.33	2	18	Q
72	0.19	0.07	0.998	1108.88	2	18	Q
73	0.15	0.08	0.628	697.77	2	18	Q

## منابع و مراجع:

- [1] Potter,A.E., “Flame Quenching”,Proc Comb,Sci. and Technology(1960).
- [2] Plamer,K.N., “Dust Explosion & Filters”, Chapman and Hall,London(1973).
- [3] Warnatz,J., Maas,U., Dibble,R.W., “Combustion” , Springer - Verlag Berlin , Heidelberg (1999).
- [4] Schmitt,CharlesR. “Pyrophoric Materials Hand Book,Flammable Metals and Materials,Chapter 3 & 8 (1998).
- [5] Dreizin,Edward L., Trunov,Michael A., “Surface Phenomena in Aluminum Combustion”,Combustion and flame, Vol. 101,pp. 378-362 (1995).
- [6] Dreizin,Edward L., “On the Mechanism of Asymmetric Aluminum Particle Combustion”,Combustion and flame, Vol. 117,pp. 841-850 (1999).
- [7] Lee,J.H., Perladi,O., Knystautas,R., Thirsk,R., “Micro Gravity Combustion of Dust Suspension in a Spherical Chamber” ,presented at the 2<sup>nd</sup> Japan-Canada space workshop, Tokyo, Jan.1992.
- [8] Ballal,D.R., “Flame Propagation through Dust Clouds of Carbon , Aluminum , and Magnesium in an environment of zero Gravity” , Proc.Roc.Soc. , A385 , pp.21-51 (1983).
- [9] Fournier,Y., Lavoie, M., “Electrostatic Particulate Suspension”, Final Report McGill University Dept. of Mech. Eng., (1989).
- [10] Berlad,A., Ross,M., Facca,L., Tangirila,V., “Feasibility of Reduced Gravity Experiment Involving Quiescent Uniform Particle Cloud Combustion”, NASA Tech.,(1989).
- [11] Proust,C., Veyssiere,B., “New Experimental Apparatus for Studying the Propagation of Dust Air Flames” , Progress in Astronautics and Aeronautics , AIAA. , Vol.113 , pp.43-61 ,(1988).

- [12] Jarosinski,J., Chomiak,J., “Flame Quenching by Turbulence”, Combustion and Flame , Vol.48, (1982).
- [13] Borman,Grey L., Regland,Kenneth W., “Combustion Engineering”, Mc Graw-Hill International Editions (1998).
- [14] Ballal,D.R., “Ignition and Flame Quenching of Quiescent Dust Clouds of Solid Fuels” , Proc.R.Soc.Lond.A, Vol.369 , pp.479-500 , (1980).
- [15] Shevchuk,V.G., Boychuk,L.V., Goroshin,S.V., Kostyshin,Yu.N., “Comparative Research of the Flame Propagation in Boron and Al,Mg,Zr,Fe Dust Clouds”, Combustion of Boron-Based Solid Propellants and Solid Fuels, pp. 478-484.
- [16] Goroshin,S.V., Ageyev,N.D., Shoshin,Yu.L., Shevchuk,V.G.,“The premixed Laminar Flames in the Boron Dust Clouds”, Combustion of Boron-Based Solid Propellants and Solid Fuels, pp. 469-477.
- [17] Goroshin,S.V., Fomenko,I., Lee,J.H.S., “Burning Velocities in Fuel-Rich Aluminum Dust Clouds”, 26<sup>nd</sup> Symposium (International) on Combustion Institute, pp.1961-1967, (1996).
- [18] Jarosinski,J., Lee,J.H., Kynstatutas,R., Crowly,J.D., “Quenching of Dust-Air Flames”, Proc.21<sup>st</sup> Symp.(international) on Combustion> pp.1917-1924 (1986).
- [19] Greene,F.T., O'Donnell,J.E., “Quenching Behavior of Coal Dust-Air Mixtures,”Bureau of Mines, open file report 4-83(Aug.1981).
- [20] Ballal,D.R., Lefebver,A.H., “Ignition and Flame Quenching of Flowing Heterogeneous Fuel-Air Mixtures” , Combustion and Flame, Vol.35 , pp.155-168 , (1979).
- [21] Bond,J.F., Knystautas,R., Lee, J.H.S., “Influence of Turbulence on Dust Gas Explosion in Closed Vesseles” , Dynamics of Explosions , Vol.106, (1986).

[22] Bradley,D., Chen,Z., “Burning Rates in Turbulent Fine Dust Air Explosions”, 2<sup>nd</sup> Symposium on Combustion, (1988).

[23] Pu,Y.K., Jarosinski,J., Tai,C.S., Kauffman,C.W., Sichel,M., “The Investigation of the Feature of Dispersion in Closed Vesseles”, 2<sup>nd</sup> Symposium on Combustion, (1988).

[24] Nettleton,A.M., “The Influence of Turbulent on Flammability Limits of Dust Clouds”, AIAA, (1988).

[25] Proust,C., Veyssiere,B., “Explosions on Turbulent Flame Propagation in Dust –Air mixtures”, AIAA, (1992).

[26] Ageyev,N., Vovchuck,Ya., Gorohin,S., Poletayev,N., Zlotko,A., Combust. Explos. Shock Waves 26: 668-677(1991).

[۲۷] فدوی کاشانی، محمدرضا، «بررسی تأثیر قطر روی فاصله خاموشی شعله ذرات ریز جامد»، پایان نامه

کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۰.

[۲۸] هاشمی، علی، «بررسی ساختار شعله ذرات فلزی»، سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه

علم و صنعت ایران، ۱۳۸۱.

[29] Ballal,D.R., Lefebver,A.H., “A General Model of Spark Ignition for Gaseous and liquid Fuel-Air Mixture”, Eighteenth Symposium (international) on Combustion 18 (1980a), pp.1737-1746.

[۳۰] صدیقی، محمد، «مطالعه تجربی و تحلیلی مکانیزم شعله ذرات ریز جامد»، پایان نامه کارشناسی ارشد،

دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۷.

[31] Clover,G.M., “An Electrostatic Suspension Method for testing Spark Breakdown, Ignition and Quenching of Powders”, Journal of Electrostatic 37, pp. 151-157,(1996).